



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DA HABILIDADE DOS MODELOS
PERTENCENTES AO CMIP5 E CMIP6 EM
REPRESENTAR OS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR E
IMPACTOS NA REPRESENTAÇÃO DO GELO
MARINHO.**

Letícia Stachelski
Ronald Buss de Souza
Fernanda Casagrande

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. Ronald Buss de Souza e co-orientada pela Dr. Fernanda Casagrande.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/>>



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DA HABILIDADE DOS MODELOS
PERTENCENTES AO CMIP5 E CMIP6 EM
REPRESENTAR OS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR E
IMPACTOS NA REPRESENTAÇÃO DO GELO
MARINHO.**

Letícia Stachelski
Ronald Buss de Souza
Fernanda Casagrande

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. Ronald Buss de Souza e co-orientada pela Dr. Fernanda Casagrande.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/>>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Stachelski, Letícia.

Análise da habilidade dos modelos pertencentes ao CMIP5 e CMIP6 em representar os dados de Radiação Solar e impactos na representação do Gelo Marinho. / Letícia Stachelski; Ronald Buss de Souza; Fernanda Casagrande. – : , 2022.

p. ; ()

Relatório () – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, , 2022.

Ronald Buss de Souza; Fernanda Casagrande : .

1. Gelo Marinho. 2. Modelagem 3. CMIP. 4. Radiação Solar.
5. Temperatura da Superfície do Mar I. Título.

CDU



Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

RESUMO

O gelo marinho é considerado um componente importante e com alta complexidade que devido a sua interação com oceano e atmosfera, torna-se um indicador sensível as mudanças climáticas. A variação sazonal do congelamento e descongelamento do gelo marinho contribui para trocas de calor entre atmosfera e oceano e também na salinidade oceânica, assim o balanço energético entre as baixas e altas latitudes é influenciada pelas alterações do gelo marinho devida às mudanças provocadas nas circulações oceânicas e atmosféricas. A modelagem numérica climática é possível simular o comportamento do gelo marinho nas diversas escalas temporais e espaciais. Neste trabalho, avaliou-se a habilidade de onze modelos climáticos, onde se comparando suas versões CMIP5 e CMIP6 que simulam o ciclo sazonal da área, concentração de gelo marinho e a radiação de onda longa. Durante o período de 1980 a 2005 do CMIP5 (1980 a 2014 do CMIP6), os modelos de ambas versões são capazes de reproduzir o ciclo sazonal da área de gelo marinho em comparação com o observado por satélite, onde a mínima área é em fevereiro e a máxima é em setembro. A versão mais recente CMIP6, apresentou melhorias na média multimodelo, entretanto, regiões como o mar de Weddell, no mar de Amundsen, no mar de Bellingshausen e no mar de Ross mostrou os maiores vieses negativos no mês de fevereiro quando comparadas ao observado. Os maiores vieses no mês de setembro, foram encontrados nas bordas do gelo marinho, no Oceano Antártico. Embora os modelos possam ter avançado nas versões mais recentes, neste estudo os resultados obtidos mostram que a habilidade dos modelos em representar as mudanças regionais do gelo marinho Antártico o mais próximo do observado por satélite ainda é um dificuldade encontrada pela modelagem climática.

Palavras-chave: Gelo Marinho. Modelagem. CMIP. Radiação.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 3.1 Ciclo sazonal da Área de Gelo Marinho da Antártica. Modelos CMIP5 (linha pontilhada) e CMIP6 (linha contínua) em relação ao observado por satélite (linha cinza contínua), referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 6 |
| 3.2 Padrão espacial da tendência da Concentração de Gelo Marinho (SIC) no mês de fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 8 |
| 3.3 Padrão espacial da tendência da Concentração de Gelo Marinho (SIC) no mês de setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 9 |
| 3.4 Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de <i>Upwelling</i> (RLUS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 11 |
| 3.5 Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de <i>Upwelling</i> (RLUS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 12 |
| 3.6 Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de <i>Upwelling</i> (RLUS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 13 |
| 3.7 Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de <i>Upwelling</i> (RLUS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 14 |
| 3.8 Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de <i>Downwelling</i> (RLDS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 15 |
| 3.9 Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de <i>Downwelling</i> (RLDS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 16 |
| 3.10 Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de <i>Downwelling</i> (RLDS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 17 |
| 3.11 Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de <i>Downwelling</i> (RLDS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6). | 18 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|-----------------------|-------------|
| 2.1 Modelos | 3 |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 2 METODOLOGIA | 3 |
| 2.1 Modelos | 3 |
| 2.2 Experimento | 3 |
| 2.3 Dados | 4 |
| 3 ANÁLISE E RESULTADOS | 5 |
| 3.1 Gelo Marinho | 5 |
| 3.1.1 Padrão Espacial | 6 |
| 3.1.1.1 Antártica | 7 |
| 3.2 Radiação de Onda Longa | 9 |
| 3.2.0.1 Antártica | 10 |
| 4 CONCLUSÕES | 19 |

1 INTRODUÇÃO

O gelo marinho é formado por meio do congelamento da água do mar, deste modo, desempenha um papel fundamental no sistema climático terrestre. As variações sazonais do gelo marinho modulam o balanço energético das regiões polares e tropicais, contribuindo nas mudanças das circulações oceânicas, atmosféricas e nos mecanismos de *feedbacks*, sendo um significativo indicador das mudanças climáticas globais (CASTRUCCIO et al., 2019; COOK et al., 2005; PARKINSON, 2019; SHU et al., 2020; STAMMERJOHN et al., 2012; VIHMA, 2014).

Nos últimos anos, através de observações ativas e passivas de satélites, dados in-situ, o gelo marinho no continente Antártico apresentou um leve aumento, ao contrário do Ártico, onde o gelo marinho diminuiu abruptamente (EAYRS et al., 2019; MOORE et al., 2019). Este aumento de gelo marinho na Antártica é observado em alguns setores, especialmente no setores dos mares de Weddell e Ross. No entanto, houve uma diminuição significativa ocorrendo desde o ano de 2014, sendo mais expressiva o recuo nos anos de 2017 e 2018, onde os valores estiveram abaixo dos registrados a partir de 1979, eliminando a tendência positiva que encontrava-se o gelo marinho (GORENSTEIN et al., 2022; PARKINSON, 2019).

Os modelos climáticos são ferramentas que auxiliam na compreensão da comunidade científica sobre o sistema climático terrestre, fornecendo simulações referentes ao passado, presente e projeções para o futuro das mudanças globais e a sua interferência no padrão médio conhecido do gelo marinho. Estudos sobre o comportamento dos modelos climáticos globais em relação a representação do gelo marinho são frequentemente utilizados como indicador para as mudanças climáticas, devido a sensibilidade do gelo marinho as mudanças ocorridas no oceano e na atmosfera (ROACH et al., 2020). Os modelos possuem desempenhos distintos na representação das interações oceano-atmosfera para a Antártica, tornando-se um problema para a simulação do gelo marinho atual e conseqüentemente interferindo na identificação de mudanças climáticas futuras (HOLMES et al., 2019; ROACH et al., 2020).

É fundamental verificar a capacidade dos modelos em simular os padrões como o ciclo sazonal e sua variabilidade, bem como com habilidade em capturar as mudanças em diversas escalas temporais e espaciais, acompanhando as deficiências na habilidade dos modelos, pois a representação do gelo marinho Antártico é um problema fundamental em modelos climáticos (EAYRS et al., 2019; ROACH et al., 2020; SHU et al., 2020, TURNER et al., 2013). Em Ludescher et al. (2019), o estudo sugere que esta é a primeira indicação de um "tipping point"(ponto de não retorno) nas

características do gelo marinho da Antártida para uma diminuição ainda maior nos próximos anos. Mais recentemente, um novo recorde mínimo para o gelo marinho Antártico em 1,9 milhão de km² foi registrado em 23 de fevereiro de 2022 (cerca de 32% abaixo dos valores climatológicos), tornando este um novo recorde histórico de baixa extensão de gelo marinho desde que os registros de satélite começaram 43 anos atrás (HANDCOCK e RAPHAEL, 2020).

O Projeto Intercomparação de Modelo Acoplado (*Coupled Model Intercomparison Project* - CMIP) analisa mudanças climáticas globais com estrutura direcionada à busca de aprimoramento da precisão de mais de 40 modelos e também em compreender as mudanças climáticas que ocorreram no âmbito de passado, presente e futuro, permitindo assim que os resultados obtidos pelos modelos estejam disponíveis para serem analisados pela comunidade científica (DOUGLAS e ATWOOD, 2022; STOUFFER et al., 2017). No projeto CMIP5, as simulações realizadas pelos modelos sobre as mudanças climáticas e seus impactos nos ecossistemas, contribuíram no Quinto Relatório de Avaliação (*Fifth Assessment Report* - AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) (TAYLOR et al., 2012). O CMIP6 é a fase mais atual do projeto, seu objetivo foca na investigação das mudanças climáticas com análises através de modelos mais refinados, desenvolvido com base nas respostas do CMIP5, discutidas e desenvolvidas pela comunidade científica envolvida no projeto e contribuindo para o AR6.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Compreender através de revisão bibliográfica o impacto das Mudanças climáticas no Ártico e Antártica bem como fazer uma revisão bibliográfica sobre os principais processos acoplados oceano-atmosfera.
- Analisar os dados de Gelo Marinho (extensão e padrão espacial) e Radiação Solar do Modelo Brasileiro de Sistema Terrestre (BESM) e outros modelos pertencentes ao CMIP5 e CMIP6 nas regiões do Ártico e Antártica para simulações de tempo presente de cenários futuros com variação da forçante radiativa.
- Comparar os dados de Gelo Marinho e Radiação Solar em Altas Latitudes com dados de satélite e reanálise e identificar potenciais melhorias dos modelos CMIP6 em relação aos modelos CMIP5.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, utilizou-se dados de área de gelo marinho (*Sea Ice Area* - SIA), concentração de gelo marinho (*Sea Ice Concentration* - SIC) e Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em escala temporal de presente e passado. Os dados são provenientes de 11 modelos climáticos globais, os quais pertencem ao projeto CMIP5 e CMIP6, Tabela 1, utilizou-se dados observacionais de satélite para comparação do desempenho das simulações realizadas pelos modelos.

2.1 Modelos

A Tabela 1, mostra os modelos e suas versões para os projetos CMIP5 e CMIP6.

Tabela 2.1 - Modelos

| CMIP5 | Referência | CMIP6 | Referência |
|---------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|
| ACCESS1-0 | Collier e Uhe (2012) | ACCESS-ESM1-5 | Ziehn et al. (2020) |
| BESM-OAV2.5 | Veiga et al. (2019) | | |
| CanESM2 | Chylek et al. (2011) | CanESM5 | Swart et al. (2019) |
| EC-EARTH | Hazeleger et al. (2010) | EC-EARTH3 | Massonnet et al. (2020) |
| FGOALS-g2 | Li et al. (2013) | FGOALS-g3 | Pu et al. (2020) |
| GFDL-CM3 | Griffies et al. (2011) | GFDL-CM4 | Held et al. (2019) |
| GISS-E2-H | Schmidt et al. (2014) | GISS-E2-1-H | Miller et al. (2021) |
| HadCM3 | Collins et al. (2011) | HadGEM3-GC31-LL | Kuhlbrodt et al. (2018) |
| IPSL- CM5A-LR | Dufresne et al. (2013) | IPSL-CM6A-LR | Boucher et al. (2013) |
| MIROC5 | Mochizuki et al. (2012) | MIROC6 | Tatebe et al. (2019) |
| MPI-ESM-LR | Giorgetta et al. (2013) | MPI-ESM1.2-LR | Mauritsen et al. 2019) |
| NCAR-CCSM4 | Gent et al. (2011) | NCAR-CESM2 | Danabasoglu et al. (2020) |

Fonte: Autor.

2.2 Experimento

O experimento utilizado foi o historical. Este experimento usa a concentração atmosférica de CO₂ observada, assim como a influência antropogênica e vulcânica na sua composição, forçantes de radiação solar e emissões. Em Taylor et al. (2012), encontra-se os protocolos empregados neste experimento no CMIP5 e em Eyring et al. (2016), encontra-se do projeto CMIP6. O ano inicial do experimento historical se dá no ano de 1850 em ambos projetos, terminando em 2005 no CMIP5 e 2014 no CMIP6. Como as observações de satélite começaram recentemente, optou-se neste

estudo estudar anos com dados observacionais, escolheu-se iniciar em 1980.

2.3 Dados

Os dados dos projetos CMIP5 e CMIP6 foram obtidos na plataforma [The CEDA Archive](#). Os dados observacionais de satélite referentes aos gelo marinho foram obtidos na plataforma online [National Snow and Ice Data Center](#) (NSIDC). Os dados de radiação de onda longa foram obtida em [NCCS Dataserver](#), pertencente a *National Aeronautics and Space Administration* - NASA.

As saídas de modelos são dadas em um arquivo NetCDF, este que foi manuseado para conseguir a SIA - derivação da SIC. O *ensemble* foi o r1i1p1 e o r1i1p1f1, respectivamente, CMIP5 e CMIP6. Estes arquivos possuem distintas grades oceânicas, com isso, reprojeteu-se os dados para uma grade de 360x180. Utilizou-se a ferramenta *Climate Data Operators* (CDO) e a *Analysis and Display System* (GrADS), estas que permitiram a realizam de cálculos estatísticos nos arquivos NetCDF. As imagens plotadas através destes arquivos foram geradas pela ferramenta Python e o R.

3 ANÁLISE E RESULTADOS

Nesta seção, analisa-se a saída de 11 modelos com saídas para a área de gelo marinho (Sea Ice Area - SIA) e concentração de gelo marinho (Sea Ice Concentration - SIC), radiação de onda longa *downwelling* (RLDS) e *upwelling* (RLUS). Buscou-se observar as melhorias na habilidade desses modelos em representar o mês de de mínima e máxima SIA e a relação com a representação da RLDS/RLUS e TSM.

As transições entre o congelamento e derretimento do gelo marinho são importantes para o melhor entendimento dos processos acoplados entre oceano-atmosfera e gelo marinho e são diretamente relacionadas com a temperatura do ar, conteúdo de calor no oceano e variação dos fluxos entre oceano e atmosfera ao longo do ano (CASAGRANDE, 2016).

3.1 Gelo Marinho

Nas Figuras 3.1 observa-se o ciclo sazonal do gelo marinho na Antártica e no Ártico. O ciclo sazonal é dado pelas médias mensais do período de 1980 a 2005 dos modelos com versão para o CMIP5 e de 1980 a 2014 para os modelos com versão para o CMIP6, estes comparados com o observado por satélite.

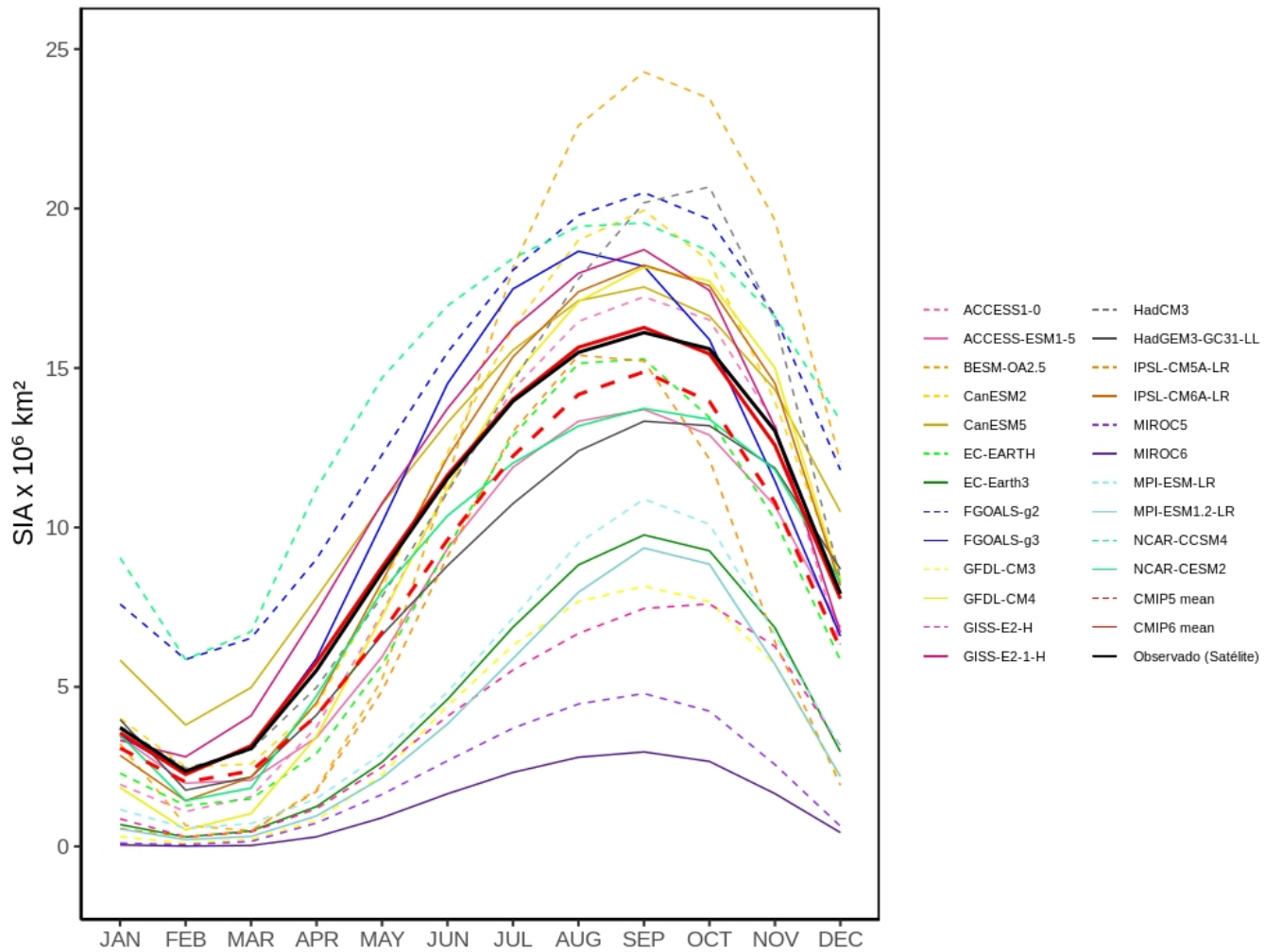
Os modelos representam o ciclo sazonal da SIA em ambos hemisférios. Na Antártica, reproduzem o período de congelamento no outono até o máximo no mês de setembro e o período de descongelamento na primavera até atingir a mínima SIA em fevereiro.

Segundo Shen et al. (2021), a sensibilidade dos modelos ao forçamento solar fornece a habilidade em reproduzir o ciclo sazonal assim como o observado. Embora os modelos reproduzem o ciclo sazonal, há variação nos valores de SIA especialmente em relação a uma versão a outra, onde os modelos tendem a subestimar ou superestimar o observado. A variação dos modelos em relação ao observador é esperado devida a complexidade na interação oceano-atmosfera que ocorre na criosfera.

Na Antártica, os modelos tendem subestimar o observado, especialmente no verão. A maior amplitude intermodelo encontra-se no período de inverno, onde os modelos possuem variações nos valores de SIA simulados em ambas versão. A média multimodelo CMIP6 aproximou-se do observado em relação a média multimodelo CMIP5. Mesmo com essa melhoria nas versões mais recentes dos modelos, o gelo marinho produzido possui baixa confiança (MEREDITH et al., 2019). Ao visualizar-se somente a SIA como resposta do modelo a reprodução do gelo marinho, erros substanciais são encontrados, pois ao olhar o padrão espacial, diferenças nas regiões e

concentrações de gelo marinho são encontradas. Isto será discutido mais a frente.

Figura 3.1 - Ciclo sazonal da Área de Gelo Marinho da Antártica. Modelos CMIP5 (linha pontilhada) e CMIP6 (linha contínua) em relação ao observado por satélite (linha cinza contínua), referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

3.1.1 Padrão Espacial

Nesta seção, o padrão espacial é apresentado, o qual serve para compreendermos como é dada a representação entre as regiões de ambos polos.

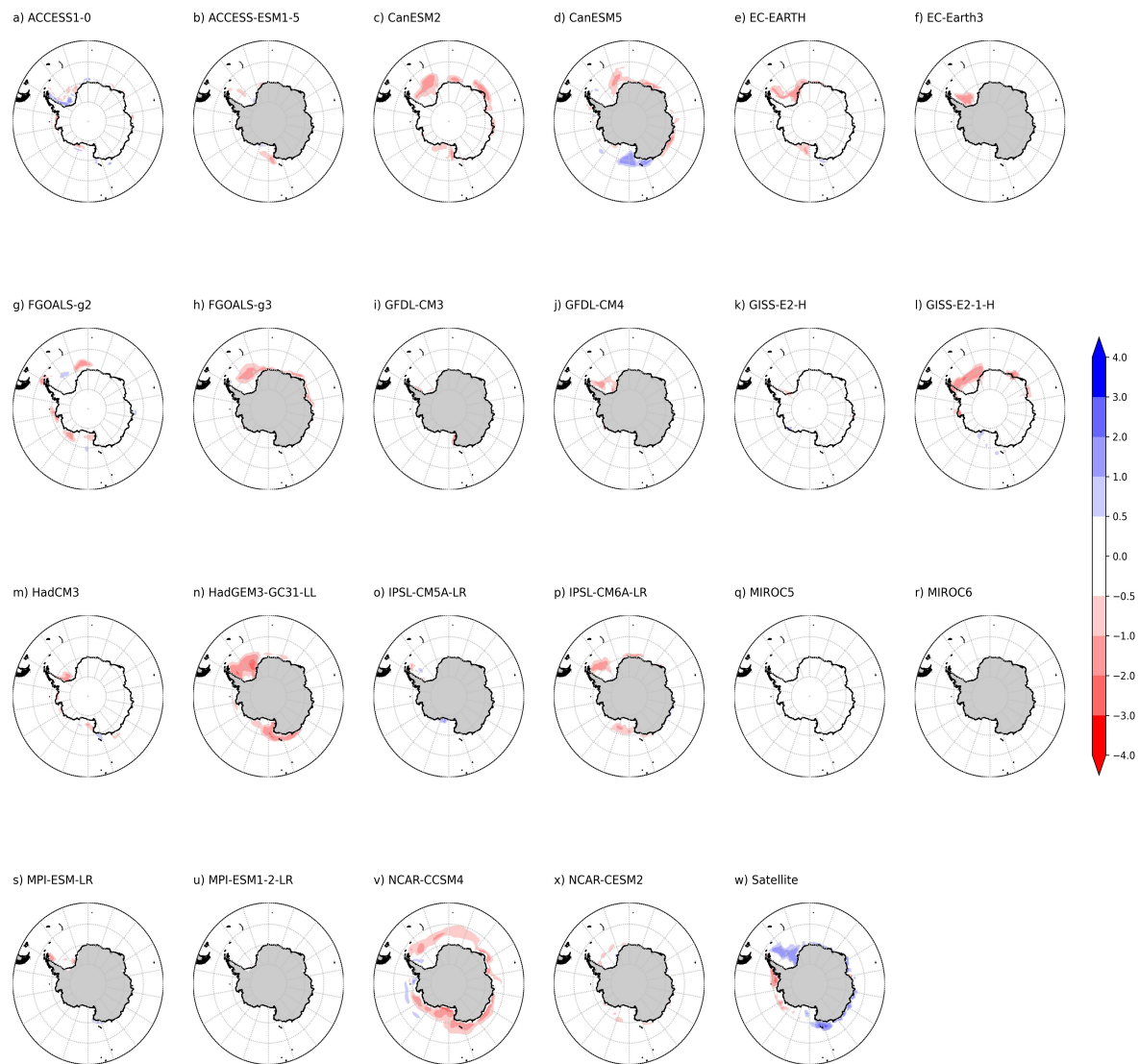
3.1.1.1 Antártica

Na Figura 3.2, visualiza-se a média da tendência do mês de fevereiro do período de 1980 a 2005 (2014) dos modelos CMIP5 (CMIP6). Esta visualização permite compreender as regiões onde os modelos reproduzem o aumento e a diminuição do gelo marinho em relação ao observado.

O observado mostra que setorialmente a Antártica possui diferenças na diminuição e no aumento do gelo marinho. A tendência é positiva nos mares de Weddell e de Ross, no mar de Amundsen e de Bellinghausen a SIC possui tendência negativa. Os modelos mostram uma tendência negativa em quase todas as simulações, principalmente no mar de Weddell onde a tendência é positiva. O modelo CanESM5 reproduz a tendência positiva no mar de Ross, enquanto que o modelo ACCESS1-0 mostra uma leve tendência positiva na região do mar de Weddell.

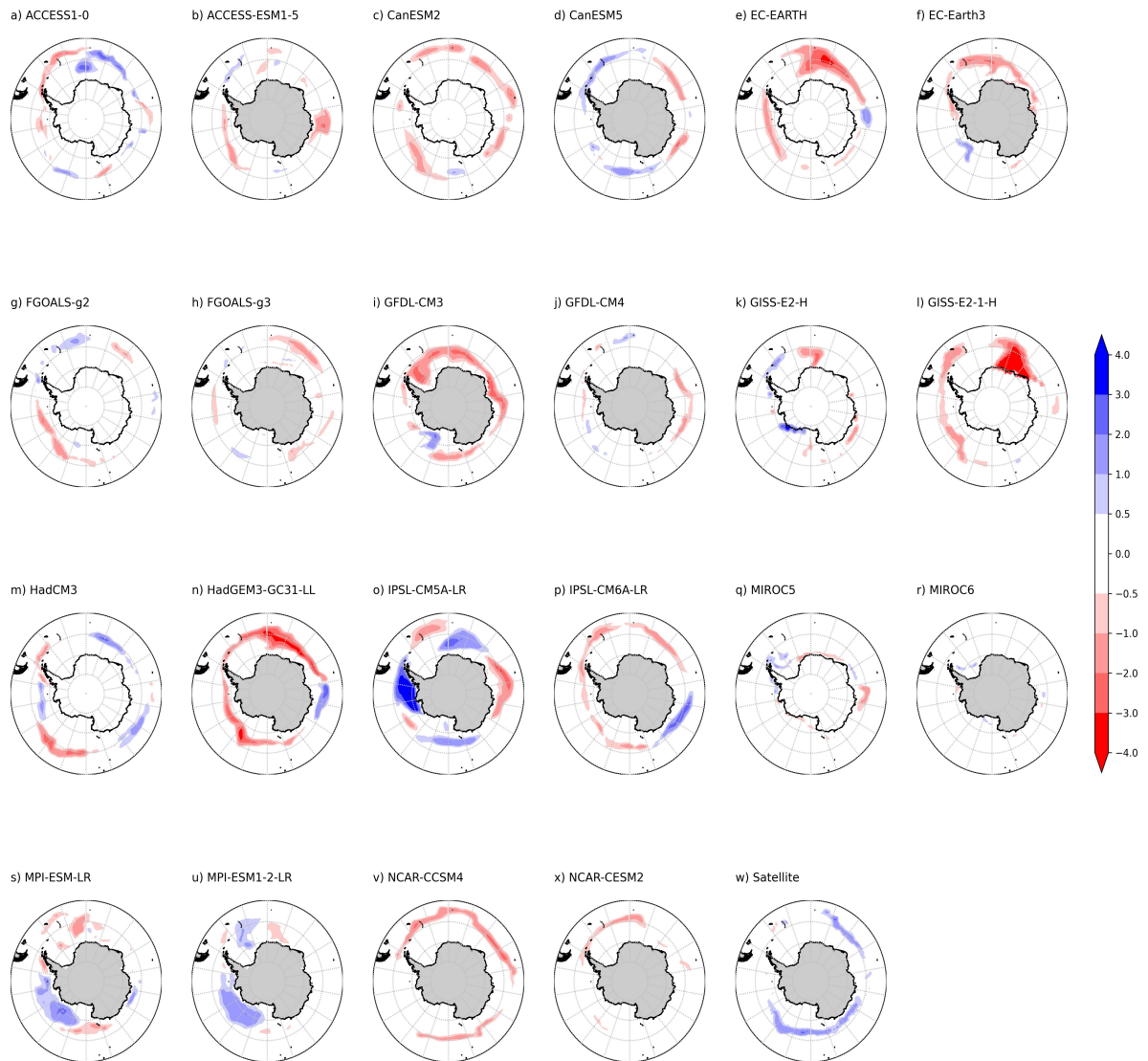
Na Figura 3.3, a tendência no mês de máxima possui maiores divergências nas regiões em torno da borda do gelo marinho. O observado mostra valores de SIC positiva nas regiões do mar de Bellinghausen até o mar de Ross e também no setor do Oceano Índico. Os modelos CMIP6 tiveram melhorias na representação da SIC, refletindo em tendências menos significativas, mesmo que negativas, como pode-se ver no modelo ACCESS-ESM1-5, GFDL-CM4, MIROC6 e NCAR-CESM2.

Figura 3.2 - Padrão espacial da tendência da Concentração de Gelo Marinho (SIC) no mês de fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

Figura 3.3 - Padrão espacial da tendência da Concentração de Gelo Marinho (SIC) no mês de setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

3.2 Radiação de Onda Longa

Nesta seção, analisaremos o ciclo sazonal da radiação de onda longa e sua relação com o congelamento e derretimento do gelo marinho.

No último relatório visualizou-se que o ciclo sazonal da Radiação de Onda Longa de Upwelling de Superfície (RLUS) e Radiação de Onda Longa de Downwelling de

Superfície (RLDS) tinham seu máximo no período do verão na Antártica e no Ártico. Na Antártica, o máximo RLUS e da RLDS é em janeiro e o mínimo em agosto, enquanto que no Ártico, o máximo é em julho e o mínimo em janeiro de ambas RLUS e RLDS. Os fluxos de radiação de onda longa de RLDS, juntamente com a RLUS são indicadores de aquecimento no balanço de energia terrestre (SCOTT et al., 2019; WANG; LIANG; AUGUSTINE, 2009).

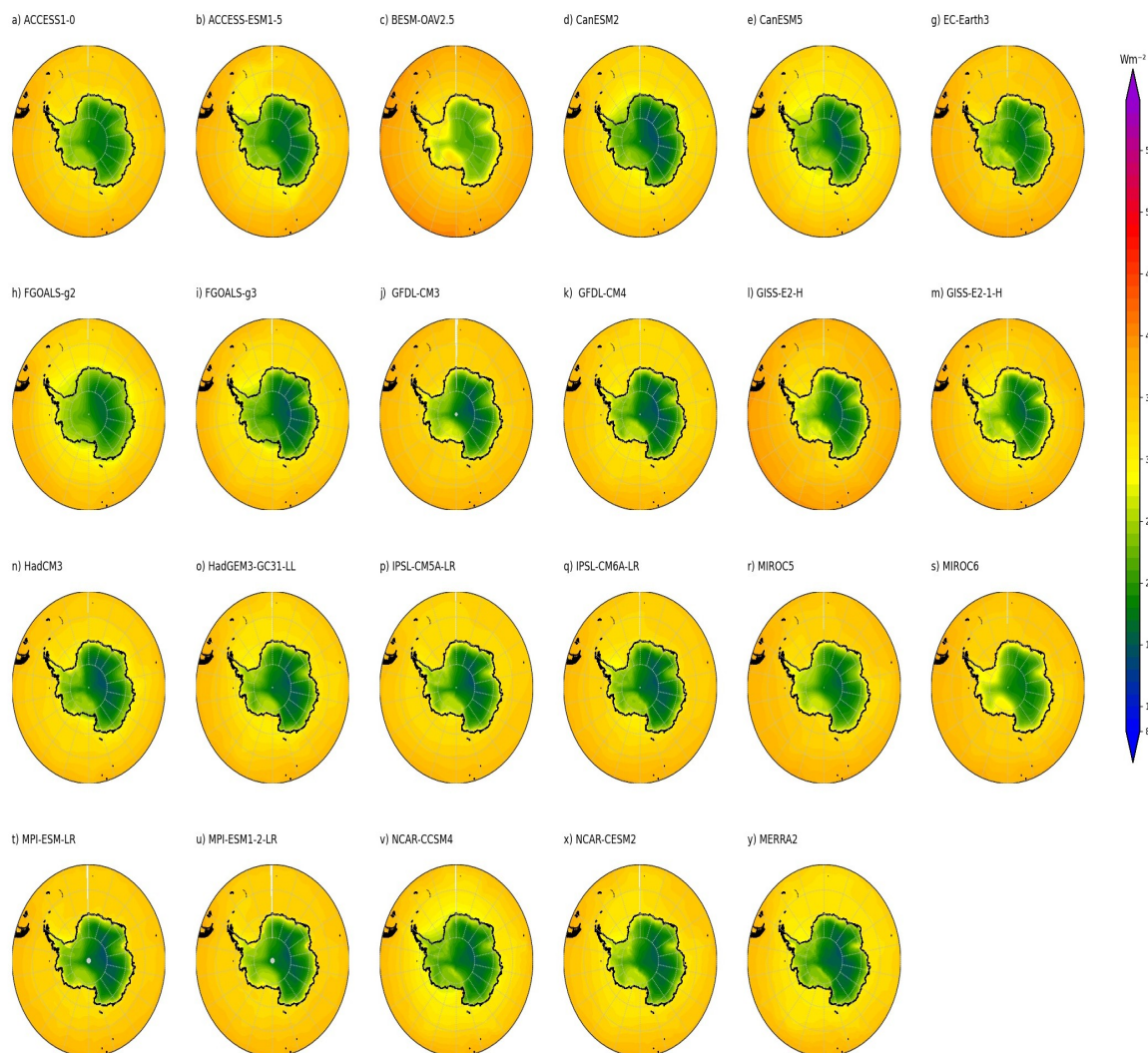
3.2.0.1 Antártica

A RLUS abrange a interação entre a superfície da terra e a atmosfera, onde resulta da troca de energia entre ambos (NIEMELÄ; RÄISÄNEN; SAVIJÄRVI, 2001). Na Figura 3.4, temos a RLUS média para o mês de mínimo gelo marinho, fevereiro. Assim concordando com o último relatório, os valores de RLUS são maiores em fevereiro do que setembro (Figura 3.6). Nas regiões com gelo marinho, como sobre o continente Antártico, os valores de RLUS são menores, enquanto que nas águas dos mares os valores são maiores, pois a RLUS está diretamente ligada com a temperatura da superfície que emite a radiação, então, como a superfície do gelo possui temperatura baixa, conseqüentemente a RLUS será baixa.

A tendência da RLUS é dada na Figura 3.5, onde o observado apresenta valores de tendência negativa não significativos, enquanto que a maioria dos modelos mostram valores positivos, principalmente na regiões do mar de Weddel e no Oceano Índico. Em setembro, a RLUS é visualizada na Figura 3.6 e a tendência na Figura 3.7. Os valores são menores em relação ao mês de fevereiro, devido a camada de gelo marinho sob o oceano, refletindo a radiação solar.

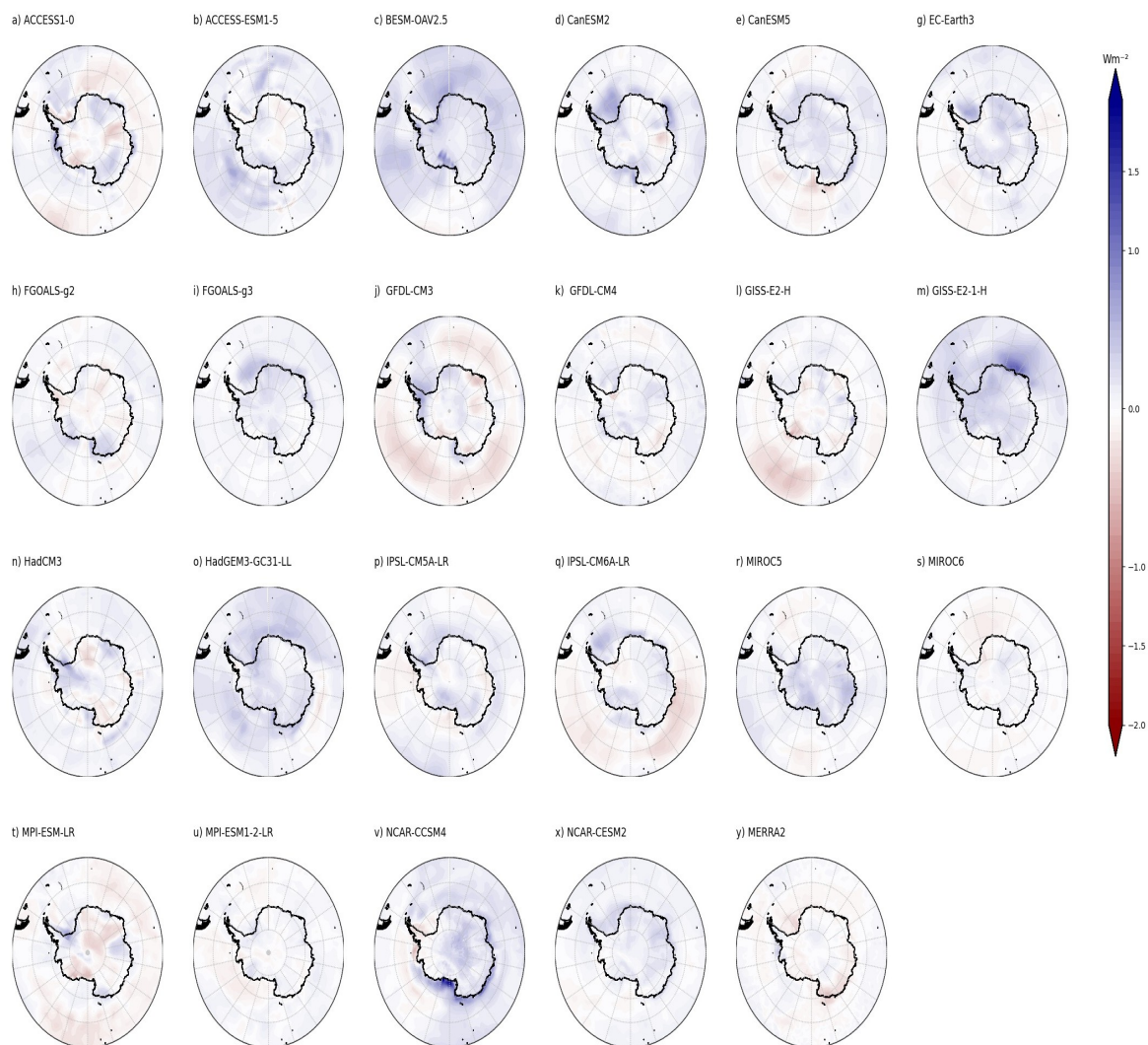
Os modelos que apresentam tendência negativa de SIC, como mostrado na Figura ??, apresentam tendência positiva na RLUS, ou seja, conforme a SIC diminui, a RLUS aumenta. O tendência do MERRA2, quando relacionado a tendência da SIC observada evidencia este comportamento, no qual, evidencia-se que a RLUS está aumentando conforme a SIC aumenta também.

Figura 3.4 - Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de *Upwelling*(RLUS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



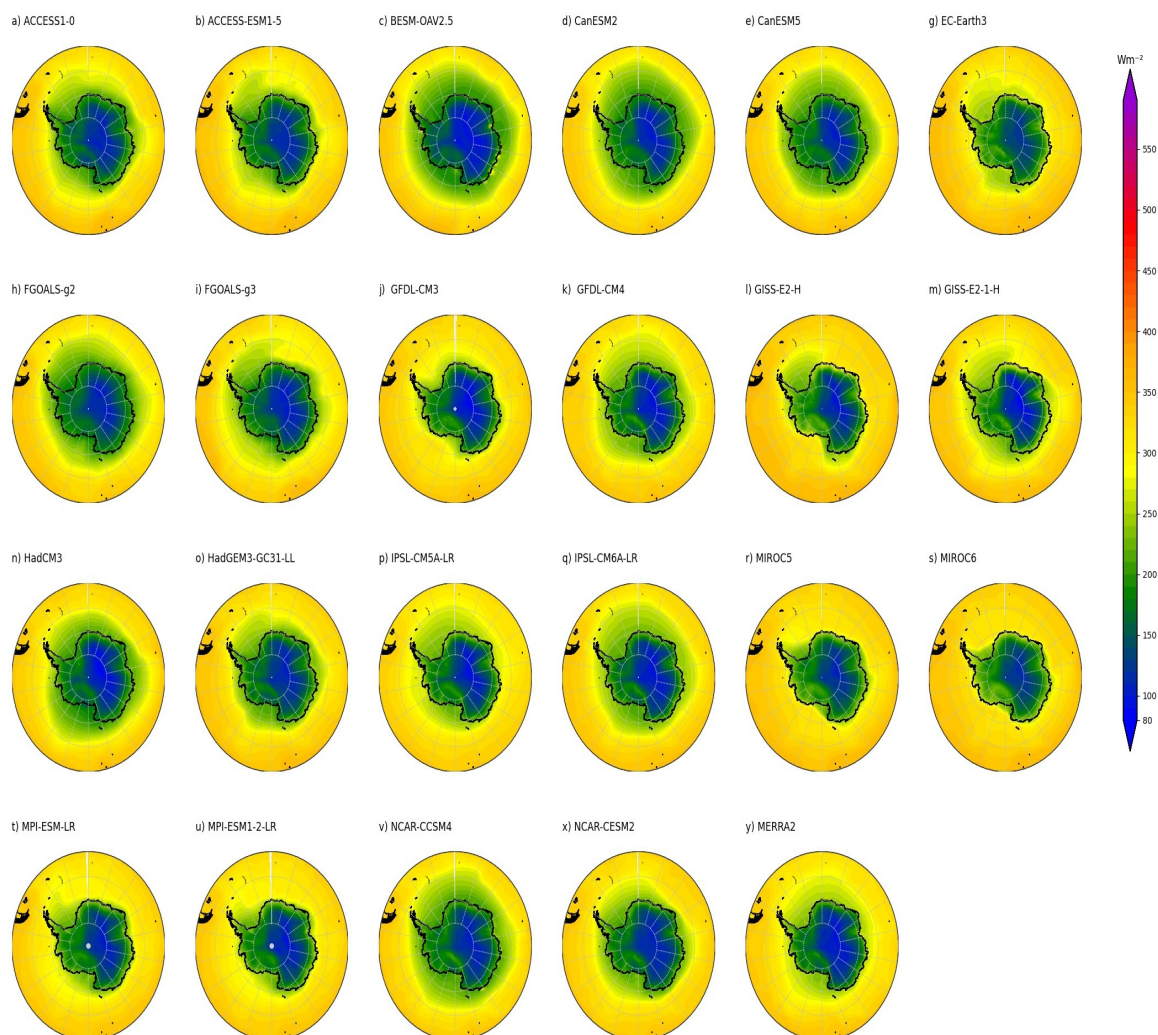
Fonte: Autor.

Figura 3.5 - Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de *Upwelling*(RLUS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



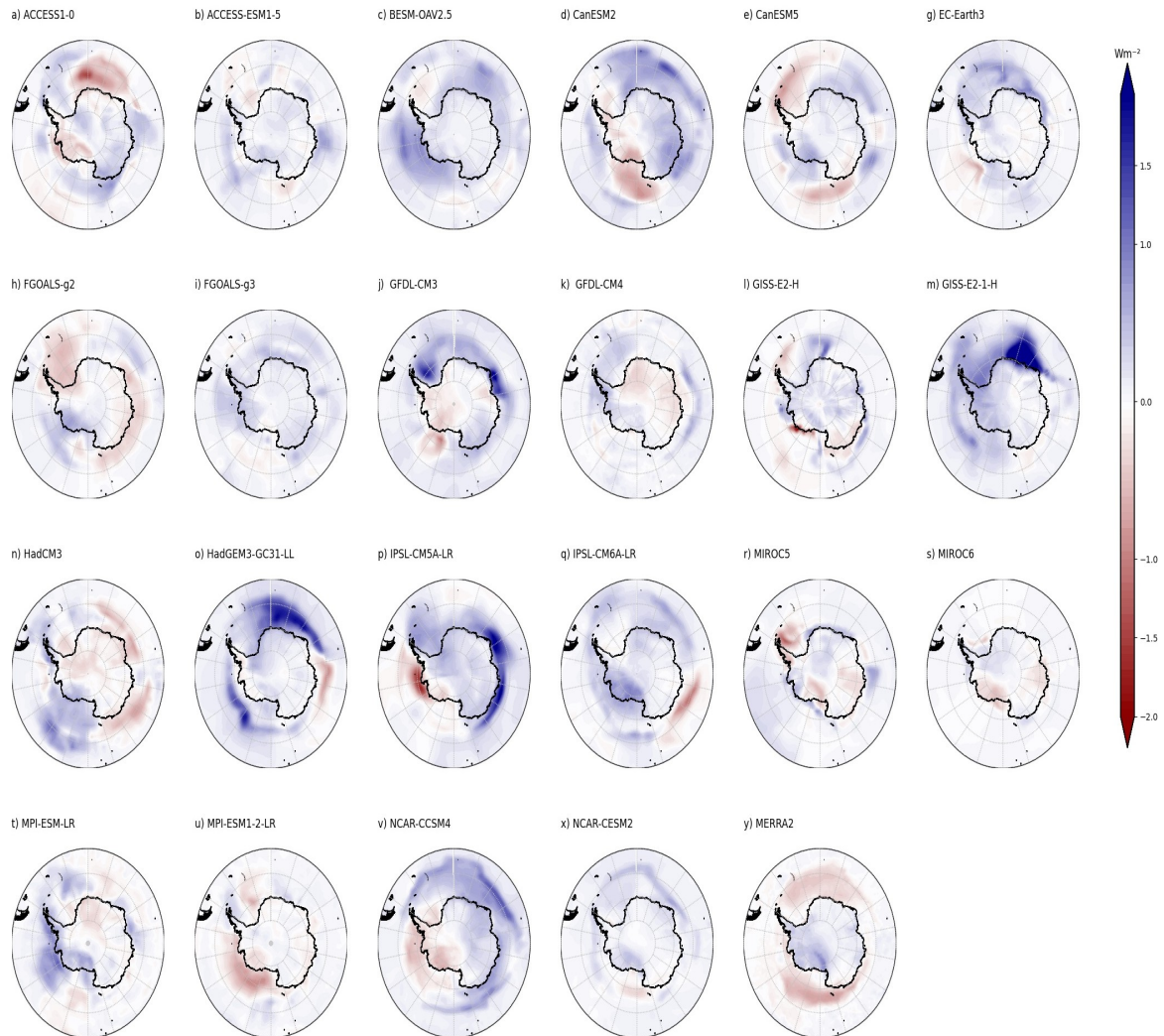
Fonte: Autor.

Figura 3.6 - Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de *Upwelling*(RLUS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

Figura 3.7 - Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de *Upwelling*(RLUS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).

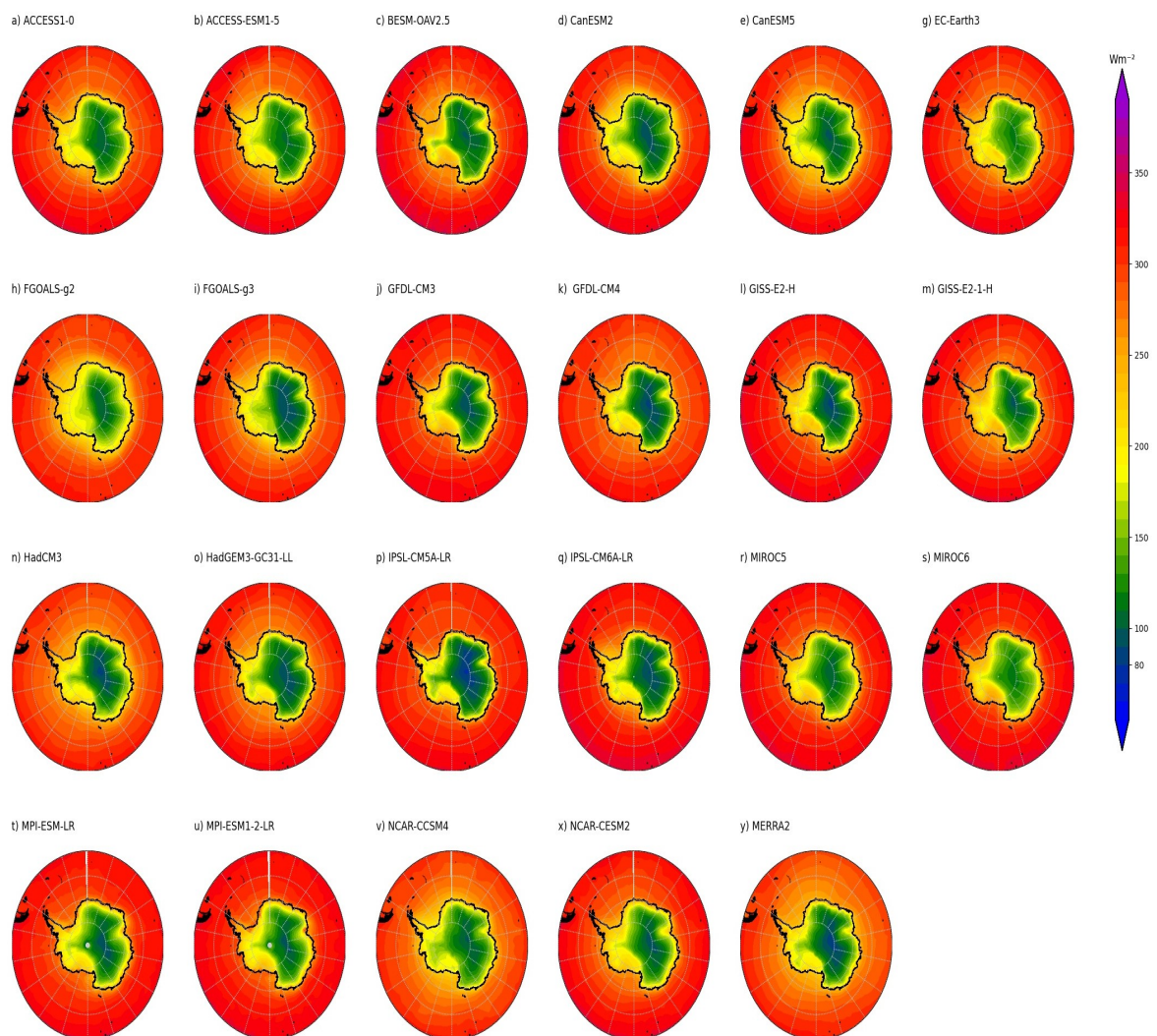


Fonte: Autor.

A RLDS do mês de fevereiro reproduzida pelos modelos é apresentada na Figura 3.8. Em Yeo et al. (2018), afirma-se que a RLDS é afetada pelas propriedades das nuvens e umidade das estações do ano. Assim, conforme o número de nuvens aumenta, maiores valores de RLDS são encontrados, diminuindo o balanço de energia e consequentemente diminuindo o gelo marinho (URREGO-BLANCO; HUNKE; URBAN, 2019).

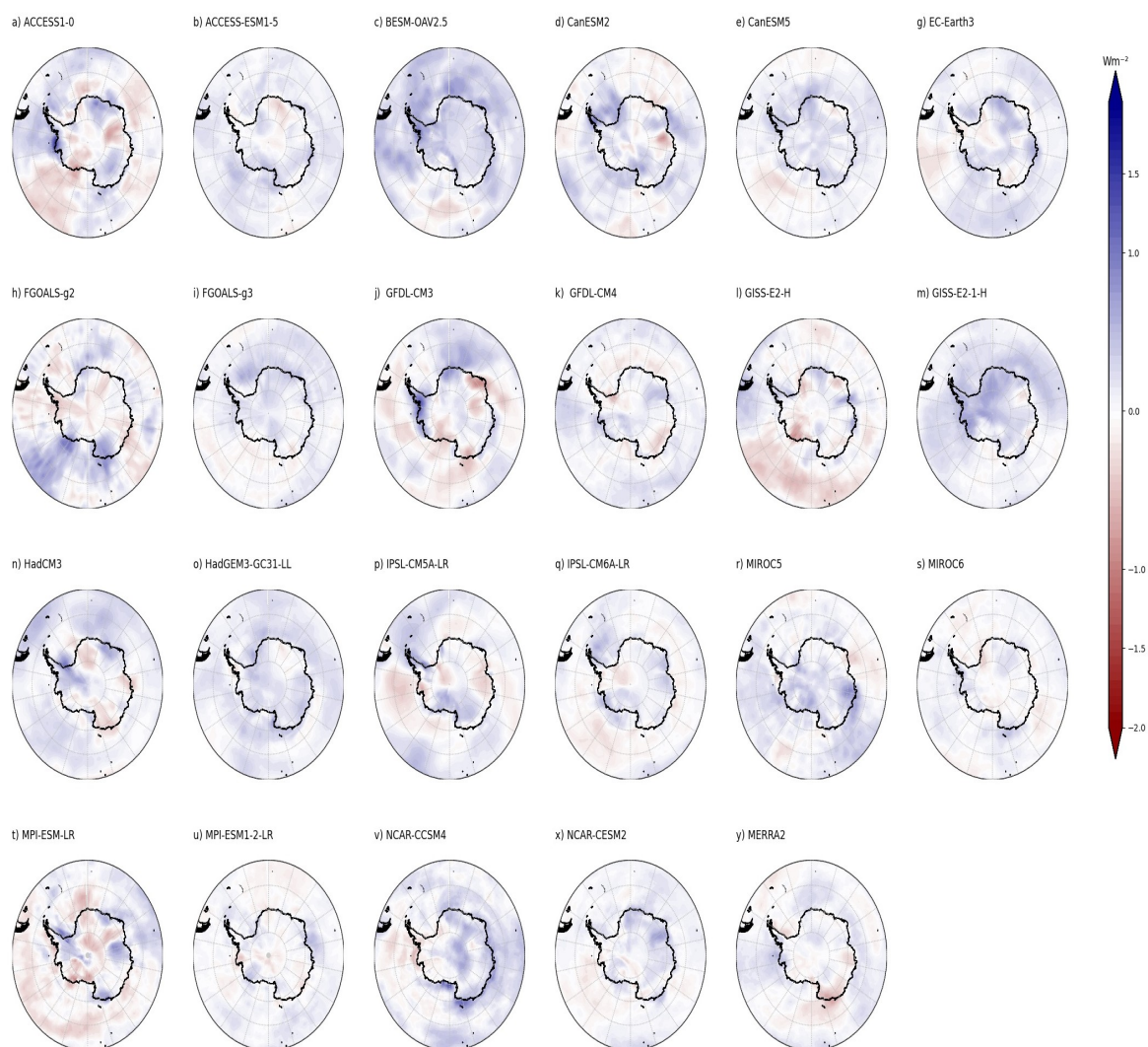
Em fevereiro, os modelos reproduzem a RLDS em torno do continente Antártico com valores superiores ao MERRA2. A tendência da RLDS, Figura 3.9, apresenta-se negativa na região do mar de Ross e localizadamente no mar de Weddell e nas demais regiões, valores positivos. Conforme a temperatura ambiente, nebulosidade e umidade aumentam, a RLDS aumenta.

Figura 3.8 - Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de *Downwelling*(RLDS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



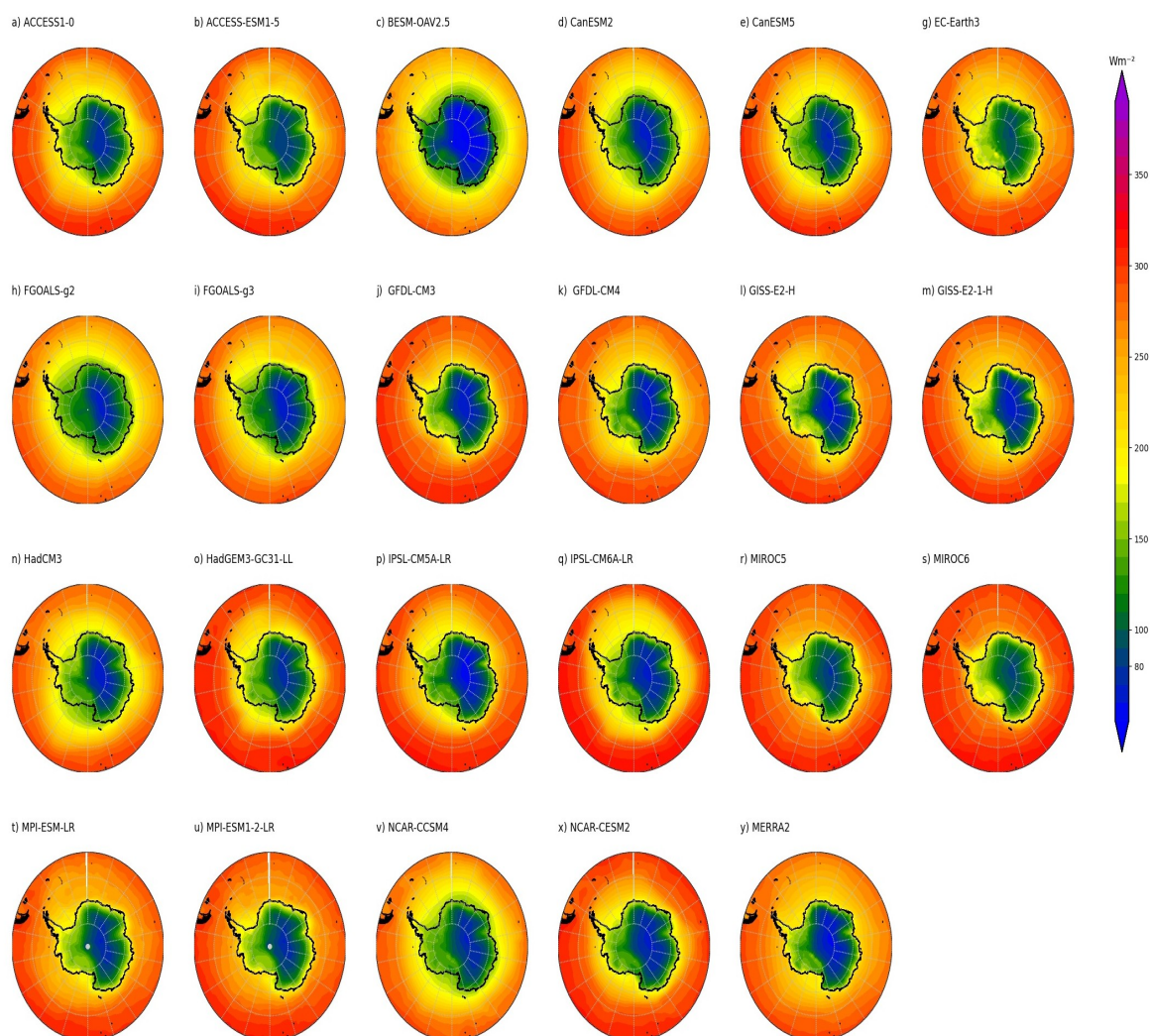
Fonte: Autor.

Figura 3.9 - Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de *Downwelling*(RLDS) no mês fevereiro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



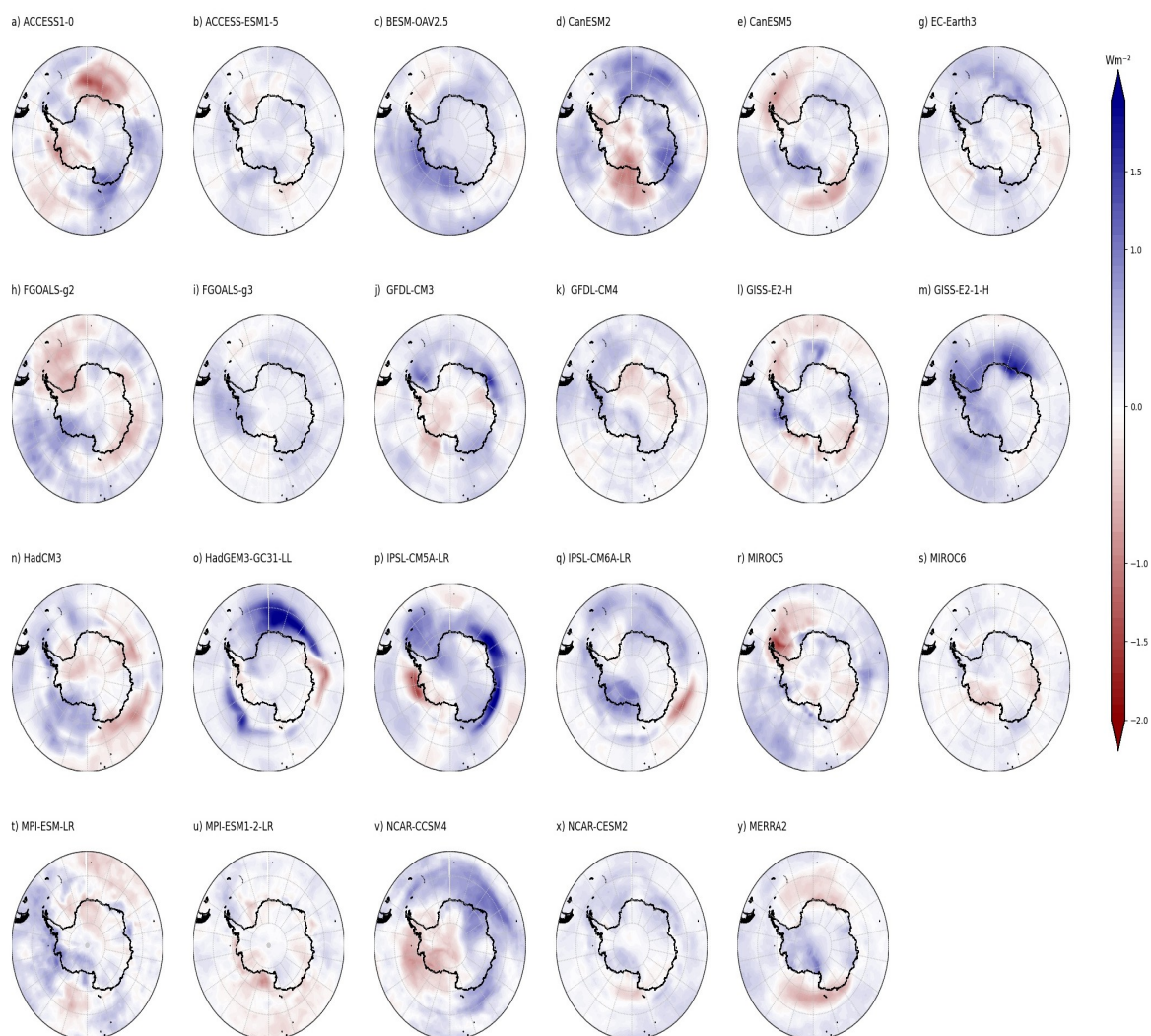
Fonte: Autor.

Figura 3.10 - Padrão espacial da Radiação de Onda Longa de *Downwelling*(RLDS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

Figura 3.11 - Padrão espacial da tendência da Radiação de Onda Longa de *Downwelling*(RLDS) no mês setembro, referentes ao período de 1980 a 2005 (CMIP5) e 1980 a 2014 (CMIP6).



Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES

Neste projeto, avaliou-se a habilidade de 11 modelos e suas versões para o CMIP5 e CMIP6 em representar o ciclo sazonal da sia e visualizou-se o padrão espacial do mês de mínima (fevereiro) e máxima (setembro) SIC, juntamente as simulações de RLDS e RLUS. Comparou-se as saídas de modelo com o observado por satélite para o gelo marinho e com reanálise para a radiação de onda longa para verificar os vieses e melhorias dos modelos para o período de 1980 a 2005/2014.

Através da comparação entre as simulações de gelo marinho e radiação de onda longa dos modelos em relação ao observado, pode-se afirmar que: (i) Os modelos representaram com habilidade o ciclo sazonal da SIA conforme o observado por satélite, aonde a transição entre o congelamento até a máxima área (setembro) e o descongelamento até a mínima área (fevereiro); (ii) A maioria dos modelos tende a subestimar a SIA e o SIC, principalmente no verão, já no inverno há altos vieses entre o modelado e o observado; (iii) No mês de mínimo gelo marinho, vieses negativos foram encontrados nas regiões do mar de Weddell, o mar de Bellingshausen, o mar de Amundsen e partes do mar de Ross; (iv) No mês de máximo gelo marinho, os vieses negativos são encontrados na borda do gelo marinho, a região mais ao norte do Oceano Antártico, próxima à região de fluxo da Corrente Circumpolar Antártica; (v) A RLUS e RLDS é reproduzida pelos modelos mesmo havendo diferenças espaciais; (vi) Os modelos pertencentes ao CMIP6 apresentaram melhorias na representação da RLUS e RLDS; (vii) Mesmo com deficiência na reprodução da radiação de onda longa, outros fatores podem influenciar na capacidade dos modelos em representar o gelo marinho, como o derretimento do gelo, temperatura da superfície do mar etc.

A habilidade dos modelos em representar o gelo marinho está diretamente ligado a habilidade em representar a radiação de onda longa, onde a parametrização de nuvens é fundamental incorporar os processos de interação o gelo marinho-oceano-atmosfera. Entretanto, mesmo com os avanços encontrados trazidos pelos modelos CMIP6, o progresso nas simulações é modesto e restrito uma vez que a reprodução espacial do gelo marinho em relação ao observado possui diferenças.

Os modelos numéricos climáticos são ferramentas fundamentais para a reprodução adequada de fatores internos do sistema, como processos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera, do oceano e da criosfera, os quais impactam diretamente no gelo marinho, proporcionando mudanças complexas que são de interesse científico para compreender as mudanças globais e a interferência do aquecimento global neste sistema. Para estudos futuros, é pertinente investigar os processos relacionados a

habilidade dos modelos em reproduzir o gelo marinho e que conduzem aos vieses particulares de cada modelo climático global.

ANEXOS

Foi submetido um artigo a revista *International Journal of Climatology* com o seguinte título: **Assessment of Antarctic sea ice area and concentration in CMIP5 e CMIP6 models.**

Resumo: O gelo marinho é um importante e complexo componente do sistema terrestre e é considerado indicador sensível de mudanças climáticas. A variação do gelo marinho Antártico modula o gradiente de temperatura entre altas e baixas latitudes através do transporte meridional de calor, promovendo mudanças no clima local, regional e global. Nesse estudo, avaliamos a habilidade e evolução de onze modelos pertencentes ao CMIP5 em representar a área (SIA) e a concentração (SIC) do gelo marinho Antártico e as melhorias nas versões mais recentes dos modelos pertencentes ao CMIP6. Adicionalmente, analisamos as projeções do gelo marinho Antártico até o ano de 2100. Os resultados indicam que o ciclo sazonal do gelo marinho foi bem representado pela maioria dos modelos, os quais capturaram corretamente as transições entre o período de congelamento (setembro) e derretimento (fevereiro) do gelo marinho. A maioria dos modelos tendem a subestimar os valores de SIA e SIC, especialmente no verão. Os modelos CMIP6 apresentaram melhorias em relação às suas versões para o CMIP5, no entanto erros sistemáticos são encontrados na representação da SIC, contribuindo para as incertezas das projeções futuras destes modelos.

CASAGRANDE, F; STACHELSKI, L; BUSS DE SOUZA, R. Assessment of Antarctic sea ice area and concentration in CMIP5 e CMIP6 models. NO PRELO, 2022, *International Journal of Climatology*.

Outras publicações realizadas. CASAGRANDE, F; STACHELSKI, L; BUSS DE SOUZA, R. An overview of CMIP5 and CMIP6 Antarctic sea ice simulations. SO-LAS Open Science Conference (2022).

STACHELSKI, L; CASAGRANDE, F; BUSS DE SOUZA, R. IMPACTOS NA REPRESENTAÇÃO DO GELO MARINHO ATRAVÉS DA ANÁLISE DA HABILIDADE DOS MODELOS PERTENCENTES AO CMIP5 E CMIP6 EM REPRESENTAR OS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR. Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - SICINPE (2022).

STACHELSKI, L; CASAGRANDE, F; BUSS DE SOUZA, R. ANÁLISE E EVOLUÇÃO NA REPRESENTAÇÃO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO A PARTIR

DE DADOS DO CMIP5 E CMIP6. XXI Encontro dos Alunos de Pós-Graduação em Meteorologia (2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRUCCIO, F. S. et al. Modulation of Arctic Sea Ice Loss by Atmospheric Teleconnections from Atlantic Multidecadal Variability. *Journal of Climate*, v. 32, n. 5, p. 1419–1441, 1 mar. 2019.

COOK, A. J. et al. Retreating Glacier Fronts on the Antarctic Peninsula over the Past Half-Century. *Science*, v. 308, n. 5721, p. 541–544, 22 abr. 2005.

DOUGLAS, D. C.; ATWOOD, T. C. Comparisons of Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) and Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) sea-ice projections in polar bear (*Ursus maritimus*) ecoregions during the 21st century. Comparisons of Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) and Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) sea-ice projections in polar bear (*Ursus maritimus*) ecoregions during the 21st century: Open-File Report. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2022. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20221062>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

EAYRS, C. et al. Understanding the Seasonal Cycle of Antarctic Sea Ice Extent in the Context of Longer-Term Variability. *Reviews of Geophysics*, v. 57, n. 3, p. 1037–1064, 2019.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 26 maio 2016.

GORENSTEIN, I. et al. Revisiting Antarctic sea-ice decadal variability since 1980. *Polar Science*, v. 31, p. 100743, 1 mar. 2022.

HANDCOCK, M. S.; RAPHAEL, M. N. Modeling the annual cycle of daily Antarctic sea ice extent. *The Cryosphere*, v. 14, n. 7, p. 2159–2172, 2 jul. 2020.

HOLMES, C. R.; HOLLAND, P. R.; BRACEGIRDLE, T. J. Compensating Biases and a Noteworthy Success in the CMIP5 Representation of Antarctic Sea Ice Processes. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 8, p. 4299–4307, 2019.

MEREDITH, M., et al., 2019, ‘Chapter 3: Polar Regions’ — European Environment Agency. Rationale Reference. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/arctic-sea-ice-4/meredith-m-et-al-2019>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

NIEMELÄ, S.; RÄISÄNEN, P.; SAVIJÄRVI, H. Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation. *Atmospheric Research*, v. 58, n. 1, p. 1–18, 1 jun. 2001.

PARKINSON, C. L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 29, p. 14414, 16 jul. 2019.

SCOTT, R. C. et al. Meteorological Drivers and Large-Scale Climate Forcing of West Antarctic Surface Melt. *Journal of Climate*, v. 32, n. 3, p. 665–684, 1 fev. 2019.

SHEN, Z. et al. Assessment and Ranking of Climate Models in Arctic Sea Ice Cover Simulation: From CMIP5 to CMIP6. *Journal of Climate*, v. 34, n. 9, p. 3609–3627, 1 maio 2021.

SHU, Q. et al. Assessment of Sea Ice Extent in CMIP6 With Comparison to Observations and CMIP5. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 9, p. e2020GL087965, 2020.

STAMMERJOHN, S. et al. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison. *Geophysical Research Letters*, v. 39, n. 6, 2012.

ROACH, L. A. et al. Antarctic Sea Ice Area in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 9, p. e2019GL086729, 2020. ROUSSEL, M.-L. et al. Brief communication: Evaluating Antarctic precipitation in ERA5 and CMIP6 against CloudSat observations. *The Cryosphere*, v. 14, n. 8, p. 2715–2727, 27 ago. 2020.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 4, p. 485–498, 1 abr. 2012.

TURNER, J. et al. An Initial Assessment of Antarctic Sea Ice Extent in the CMIP5 Models. *Journal of Climate*, v. 26, n. 5, p. 1473–1484, 1 mar. 2013.

VIHMA, T. Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review. *Surveys in Geophysics*, v. 35, n. 5, p. 1175–1214, 1 set. 2014.

WANG, W.; LIANG, S.; AUGUSTINE, J. A. Estimating High Spatial Resolution Clear-Sky Land Surface Upwelling Longwave Radiation From MODIS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 47, n. 5, p. 1559–1570, maio

2009.

