

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

**PROJEÇÕES GLOBAIS DE FLUXOS DE RADIAÇÃO
UV PARA O SÉCULO XXI: AVALIAÇÕES SOB
PRESENÇA DE AEROSSÓIS E NUVENS**

ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO

**PROJEÇÕES GLOBAIS DE FLUXOS DE RADIAÇÃO
UV PARA O SÉCULO XXI: AVALIAÇÕES SOB
PRESENÇA DE AEROSSÓIS E NUVENS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa

Coorientador:

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL
2023**

*Dedico aos meus pais,
Minha base, minha fortaleza e meu refúgio.*

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha vida e por me capacitar para a realização de mais essa etapa importante.

Aos meus pais por todo amor, confiança e incentivo. Não há palavras para expressar a minha gratidão por tudo que me proporcionaram até hoje.

Aos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram nessa trajetória e compreenderam a minha ausência às vezes.

Ao orientador Prof. Dr. Marcelo por todo ensinamento, confiança e pelos anos de convivência desde a iniciação científica. Meus sinceros agradecimentos por todo conhecimento transmitido.

Ao coorientador Prof. Dr. Roger pelo aprendizado, atenção e disponibilidade.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos por todo aprendizado adquirido.

À Universidade Federal de Itajubá pelo aprimoramento profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

*“E o fim é belo, incerto
Depende de como você vê
O novo, o credo
A fé que você deposita em você e só.”
O Teatro Mágico*

RESUMO

YAMAMOTO, Ana Letícia Campos. **Projeções globais de fluxos de radiação UV para o século XXI: avaliações sob presença de aerossóis e nuvens radiativa.** 2023. 128 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

Ozônio, aerossóis e nuvens exercem influência sobre os fluxos de radiação ultravioleta (RUV) que atingem a superfície terrestre. Por esta razão, este estudo busca avaliar os fluxos globais de RUV ao longo do século XXI considerando o conteúdo total de ozônio (CTO), a cobertura total de nuvens (CTN) e a profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550). Primeiramente, foi verificado o desempenho das simulações de CTO, CTN e AOD550 do clima atual (1980 - 2014) fornecidos por seis modelos do sistema terrestre (ESMs) comparando-os com dados de reanálise da *fifth generation of European ReAnalysis* (ERA5) e *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2). Para as projeções futuras, foram considerados os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs; SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para quatro períodos ao longo do século (2021 - 2040, 2041 - 2060, 2061 - 2080 e 2081 - 2100). O estimador *UVBoost* foi utilizado para a determinação das irradiâncias UV. Em seguida, foi computado o Índice Ultravioleta (IUV) ao meio-dia solar, as doses diárias e tempos de exposição para formação de eritema (D_{ery} e t_{ery}) e síntese de vitamina D (D_{vitD} e t_{vitD}) considerando o fototipo III. Por fim, para avaliar o impacto da cobertura de nuvens nas projeções de RUV, foi calculado o fator de atenuação (f_c) a partir de dados de CTN. Como esperado, a média do conjunto dos seis ESMs (*ensemble mean*) apresentou menores valores de vieses e de raiz do quadrado médio do erro (RQME), indicando que as simulações se aproximam dos dados das reanálises. Para o CTO, aumentos pronunciados foram projetados em latitudes médias e altas, no final do século e para os cenários de altas forçantes radiativas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Sobre a Antártida, aumentos de até 30,0% projetados para 2081 - 2100 indicam recuperação do ozônio. Por outro lado, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) impactaram o sinal de mudança na região tropical, com declínios (de até 4,0%) no SSP1-2.6 e aumentos (de até 7,0%) no SSP3-7.0. Em relação à CTN, os aumentos no Oceano Pacífico Tropical Leste em todos os SSPs, com valores máximos ~27,0% (2081 - 2100), são relacionados à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Em contrapartida, foram projetados declínio da CTN no norte da África (de até 21,0%) e na América do Sul (de até 16,0%), associados à intensificação dos anticiclones subtropicais. Para a AOD550, foram projetados aumentos de até 28,0% (SSP3-7.0) e 99,0% (SSP5-8.5) na Índia, África Central e Oriental no final do século (2081-2100). Em contraste, houve reduções na América do Norte, Europa e China ao longo do século, provavelmente em resposta às políticas de qualidade do ar e controle de emissões de poluentes, principalmente no cenário SSP1-2.6. No mês de dezembro, as mudanças projetadas no IUV, D_{ery} e D_{vitD} foram mais pronunciadas em latitudes médias e altas do Hemisfério Sul (HS), em direção ao final do século e para os cenários de maiores forçantes radiativas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Na América do Sul, Austrália e sul da África, exposições entre 10 e 20 minutos, ao meio-dia solar, serão suficientes para desencadear eritema em indivíduos de fototipo III. Já, nos Estados Unidos, Canadá, Rússia e Europa, não haverá disponibilidade de RUV suficiente para a síntese de vitamina D ao meio-dia solar, no decorrer do século. No mês de junho, apesar da discrepância entre os cenários em relação ao sinal da mudança projetada, o IUV e a D_{ery} ainda foram considerados elevados ($IUV \geq 11$; $D_{ery} \sim 6,0 \text{ kJ m}^{-2}$) em locais populosos como China, Índia, Oriente Médio e Estados Unidos. Em contrapartida, na Antártica, no sul da Argentina e Chile não haverá possibilidade de síntese de vitamina D ao longo do século para os cenários avaliados. As projeções indicaram que a cobertura de nuvens exerce alterações de maiores magnitudes sobre o IUV e D_{vitD} , mas com

pequenas variações nos padrões espaciais ao longo do século. Na América do Sul e parte da América Central, a atenuação ocasionada pela CTN pode reduzir até 3,5 unidades de IUV nos cenários SSP1-2.6 e SSP2-4.5, mas ainda indicam elevados níveis (IUV entre 8 e 10). Ademais, no norte e nordeste do Brasil e parte da Austrália, foram projetadas atenuações entre 1,5 e 1,8 kJ m^{-2} para a D_{ery} , e entre 2,5 e 3,0 kJ m^{-2} para a D_{vitD} , no mês de dezembro e cenário SSP1-2.6. Os resultados exprimem o impacto dos constituintes atmosféricos na RUV ao longo século XXI e comprovam que as mudanças climáticas podem exercer significativos efeitos sobre a saúde humana.

Palavras-chave: Radiação ultravioleta; IUV; CMIP6; Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

YAMAMOTO, Ana Letícia Campos. **Global projections of UV radiation in the 21st century: aerosols and clouds effects.** 2023. 128 p. Thesis (Doctorate in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2023.

Ozone, aerosols, and clouds influence the ultraviolet radiation (UVR) that reaches the earth's surface. This study aims to evaluate UVR throughout the 21st century considering the total ozone content (TOC), the total cloud cover (TCC), and the aerosol optical depth at 550 nm (AOD550). For that, I first evaluated current climate (1980 - 2014) simulations provided by six Earth System Models (ESMs) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) by contrasting them with the fifth generation of European Reanalysis (ERA5) and the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). For future projections, the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs; SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) and four time-slices throughout the century (2021 - 2040, 2041 - 2060, 2061 - 2080 and 2081 - 2100) were considered. I used the UVBoost estimator to calculate UV irradiance. Then, the Ultraviolet Index (UVI) at solar noon, daily doses, and exposure times for erythema (D_{ery} and t_{ery}) and vitamin D synthesis (D_{vitD} and t_{vitD}) for phototype III were computed. The cloud attenuation factor (f_c) was used to analyze the cloud cover impact on UVR projections. As expected, the multi-model mean ensemble from six ESMs showed smaller biases and root-mean-square errors (RMSE) which indicated that the simulations are close to the reanalysis data. For TOC, pronounced increases were projected at mid and high latitudes, towards the end of the century, and under higher radiative forcing scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5). Over Antarctica, increases of up to 30.0% projected for 2081 - 2100 indicate ozone recovery. On the other hand, greenhouse gas (GHG) emissions impact the signal of change in the tropical region, with decreases (up to 4.0%) under SSP1-2.6 and increases (up to 7.0%) under SSP3-7.0. Regarding TCC, increases over the Eastern Tropical Pacific Ocean in all SSPs, with maximum values $\sim 27.0\%$ (in the long-term; 2081 - 2100), are related to the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). By contrast, the TCC decline in North Africa (up to 21.0%) and South America (up to 16.0%) are consistent with the intensification of subtropical anticyclones. For AOD550, increases of up to 28.0% (SSP3-7.0) and 99.0% (SSP5-8.5) were projected in India, Central, and East Africa at the end of the century (2081 - 2100). On the other hand, decreases in North America, Europe, and China over the century may be due to the air quality policies and pollutant emissions control, mainly under SSP1-2.6. In December, UVI, D_{ery} , and D_{vitD} projected changes were pronounced at mid and high latitudes in the Southern Hemisphere (SH), towards the end of the century and under higher radiative forcing scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5). In South America, Australia, and southern Africa, 10 to 20 minutes of exposure at solar noon can induce erythema in phototype III. In contrast, there is no UVR sufficient for vitamin D synthesis at solar noon throughout the century in the United States, Canada, Russia, and Europe. In June, despite the discrepancy in the sign of the projected change between the SSPs, the UVI and D_{ery} were high ($UVI \geq 11$; $D_{ery} \sim 6.0 \text{ kJ m}^{-2}$) in areas with high population density such as China, India, the Middle East, and the United States. On the other hand, there is no vitamin D synthesis over the century for the scenarios in southern Argentina, southern Chile, and Antarctica. Cloud cover impacts UVI and D_{vitD} more strongly. However, spatial patterns throughout the century have not changed. TCC attenuation can reduce up to 3.5 UVI under scenarios SSP1-2.6 and SSP2-4.5 in South America and part of Central America but still indicate high levels (UVI between 8 and 10). Furthermore, in December and under SSP1-2.6, there were projected attenuations between 1.5 and 1.8 kJ m^{-2} for D_{ery} and between 2.5 and 3.0

kJ m^{-2} for D_{vitD} . The results showed that climate change can significantly impact UVR throughout the 21st century and affect human health.

Keywords: Ultraviolet radiation; UVI; CMIP6; Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Função resposta fotobiológica para desenvolvimento de eritema (vermelho) e síntese de vitamina D (azul). **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 2.** Distribuição espacial do viés e RQME do conteúdo total de ozônio (CTO) médio anual simulado por seis modelos do CMIP6 e o *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014. 34
- Figura 3.** Distribuição espacial do viés e RQME da cobertura total de nuvens (CTN) média anual simulada por seis modelos do CMIP6 e o *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014. 37
- Figura 4.** Distribuição espacial do viés e RQME da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) média anual simulada por seis modelos do CMIP6 e o *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014. 40
- Figura 5.** Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 43
- Figura 6.** Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 46
- Figura 7.** Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 47
- Figura 8.** Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 49
- Figura 9.** Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 52
- Figura 10.** Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5,

SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 53

Figura 11. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) média anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 55

Figura 12. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) média para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 57

Figura 13. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) média para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre. 58

Figura 14. Mudanças projetadas no IUV, ao meio-dia solar, para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do IUV no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 15. Mudanças projetadas no IUV para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do IUV no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 16. Mudanças projetadas na dose para formação de eritema (D_{ery}) para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção da D_{ery} para o dia 21 de dezembro no período de referência (1995 - 2014). ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 17. Mudanças projetadas na dose para formação de eritema (D_{ery}) para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção da D_{ery} para o dia 21 de dezembro no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 18. Mudanças projetadas na dose para síntese de vitamina D (D_{vitD}) para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção da D_{vitD} para o dia 21 de dezembro no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 19. Mudanças projetadas na dose para síntese de vitamina D (D_{vitD}) para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção da D_{vitD} para o dia 21 de dezembro no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 20. Mudanças projetadas no tempo de exposição para desenvolvimento de eritema (t_{ery}) em fototipo III para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do t_{ery} no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 21. Mudanças projetadas no tempo de exposição para desenvolvimento de eritema (t_{ery}) em fototipo III para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do t_{ery} no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 22. Mudanças projetadas no tempo de exposição para síntese de vitamina D (t_{vitD}) em fototipo III para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do t_{vitD} no período de referência (1995 - 2014). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 23. Mudanças projetadas no tempo de exposição para síntese de vitamina D (t_{vitD}) em fototipo III para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A figura à esquerda indica a projeção do t_{vitD} no período de referência (1995 - 2014)... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 24. Projeções de atenuação do IUV ao meio-dia solar para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 25. Projeções de atenuação do IUV ao meio-dia solar para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 26. Projeções de atenuação da dose para formação de eritema (D_{ery}) para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 27. Projeções de atenuação da dose para formação de eritema (D_{ery}) para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021-2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e

final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 28. Projeções de atenuação da dose para síntese de vitamina D (D_{vitD}) para o dia 21 de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 29. Projeções de atenuação da dose para síntese de vitamina D (D_{vitD}) para o dia 21 de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos modelos do CMIP6 utilizados no estudo.....	24
Tabela 2. Classificação dos fototipos, reação à RUV e doses mínimas para formação de eritema. Adaptada de Fitzpatrick (1988) e Webb e Engelsen (2006). Erro! Indicador não definido.	
Tabela 3. Mínimos e máximos vieses e RQME do conteúdo total de ozônio (CTO; DU) em cinturões de latitudes, para cada ESM analisado e <i>ensemble mean</i>	35
Tabela 4. Mínimos e máximos vieses e RQME da cobertura total de nuvens (CTN; %) em cinturões de latitudes, para cada ESM analisado e <i>ensemble mean</i>	38
Tabela 5. Mínimos e máximos vieses e RQME da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550; adimensional) em algumas regiões, para cada ESM analisado e <i>ensemble mean</i>	41
Tabela 6. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) do conteúdo total de ozônio (CTO) em cinturões de latitudes para os períodos e SSPs.	44
Tabela 7. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) da cobertura total de nuvens (CTN) em cinturões de latitudes e regiões para os períodos e SSPs.....	50
Tabela 8. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) em algumas regiões para os períodos e SSPs.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AOD550	<i>Aerosol Optical Depth at 550 nm</i> (Profundidade Óptica do Aerosol a 550 nm)
AR6	<i>Sixth Assessment Report</i> (Sexto Relatório de Avaliação)
AZS	Ângulo Zenital Solar
BDC	<i>Brewer-Dobson Circulation</i> (Circulação Brewer-Dobson)
CFCs	Clorofluorcarbonetos
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CO	Monóxido de Carbono
CTN	Cobertura Total de Nuvens
CTO	Conteúdo Total de Ozônio
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
D _{ery}	Dose para formação de eritema
D _{vitD}	Dose para síntese de vitamina D
DEM	Dose Eritematosa Mínima
DU	<i>Dobson Units</i> (Unidades Dobson)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ESGF	<i>Earth System Grid Federation</i>
ESMs	<i>Earth System Models</i>
ERA5	<i>European ReAnalysis fifth generation</i>
ERF	<i>Effective Radiative Forcing</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMAO	<i>Global Modeling and Assimilation Office</i>
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
IUV	Índice Ultravioleta
MERRA-2	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2</i>
MST	<i>Meteosat Second Generation</i>

MTR	Modelo de Transferência Radiativa
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIWA-BS	<i>National Institute of Water and Atmospheric Research - Bodeker Scientific</i>
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Fração molar do ozônio
ODSs	<i>Ozone-depleting substances</i> (Substâncias destruidoras de ozônio)
OMS	Organização Mundial da Saúde
PM _{2.5}	<i>Particulate Matter</i> (Material Particulado)
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RQME	Raiz do Quadrado Médio do Erro
SED	<i>Standard Erythema Dose</i>
SML	<i>Supervised Machine Learning</i>
SSPs	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
TEMIS	<i>Tropospheric Emission Monitoring Internet Service</i>
t _{ery}	Tempo de exposição para desenvolvimento de eritema (minutos)
t _{vitD}	Tempo de exposição para síntese de vitamina D (minutos)
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> (horas)
UVA	Radiação Ultravioleta banda “A”
UVB	Radiação Ultravioleta banda “B”
UVC	Radiação Ultravioleta banda “C”
UV _{ery}	Irradiância eritêmica
UV _{vitD}	Irradiância biologicamente ativa para síntese de vitamina D
WGCM	<i>Working Group on Coupled Modelling</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
p	Pressão atmosférica (Pa)
p _s	Pressão atmosférica em superfície (Pa)
I _λ	Irradiância espectral UV (Wm ⁻² nm ⁻¹)
ε _λ	Função resposta fotobiológica
ε _t	Equação do tempo (minutos)
δ ₀	Declinação solar (graus)
H ₀	Ângulo horário (graus)
ζ ₀	Ângulo zenital solar (graus)

ϕ	Latitude (graus)
λ	Longitude (graus)
S	Irradiância biologicamente ativa (Wm^{-2})
A	Área do corpo exposta
f_c	Fator de atenuação das nuvens
MEDF	Fator para os diferentes fototipos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.
2. DADOS E METODOLOGIA	Erro! Indicador não definido.
2.1. CTO, CTN e AOD550.....	Erro! Indicador não definido.
2.1.1. Verificação das simulações do clima presente	Erro! Indicador não definido.
2.1.2. Avaliação das mudanças projetadas	Erro! Indicador não definido.
2.2. Simulações de RUV.....	Erro! Indicador não definido.
2.2.1. Tempos de exposição para desenvolvimento de eritema (t_{ery}) e síntese de vitamina D (t_{vitD}).....	Erro! Indicador não definido.
2.2.2. Atenuação da RUV pela cobertura de nuvens.....	Erro! Indicador não definido.
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	Erro! Indicador não definido.
3.1. CTO, CTN e AOD550: simulações e projeções....	Erro! Indicador não definido.
3.1.1. Desempenho dos ESMs	Erro! Indicador não definido.
3.1.2. Mudanças projetadas	Erro! Indicador não definido.
3.2. Impacto das mudanças climáticas na RUV	Erro! Indicador não definido.
3.2.1. IUV	Erro! Indicador não definido.
3.2.2. Dose para formação de eritema (D_{ery})	Erro! Indicador não definido.
3.2.3. Dose para síntese de vitamina D (D_{vitD})	Erro! Indicador não definido.
3.2.4. Tempo de exposição para desenvolvimento de eritema (t_{ery}) e para a síntese de vitamina D (t_{vitD}).....	Erro! Indicador não definido.
3.2.5. Atenuação do IUV, D_{ery} e D_{vitD} pela cobertura de nuvens....	Erro! Indicador não definido.
4. CONCLUSÕES.....	Erro! Indicador não definido.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Erro! Indicador não definido.
ANEXOS.....	Erro! Indicador não definido.

1. INTRODUÇÃO

Ozônio, nuvens e aerossóis interagem com a radiação solar na atmosfera, impactando a quantidade de energia que atinge a superfície terrestre. Mudanças nesses constituintes atmosféricos ao longo do tempo podem afetar a vida na Terra, o balanço energético e o ciclo hidrológico (RAMANATHAN *et al.*, 2005, BARJA; ANTUÑA, 2011, YANG *et al.*, 2016).

O ozônio é um gás encontrado majoritariamente na estratosfera (~90%), entre 15 e 35 km de altitude, região comumente conhecida como “Camada de Ozônio” (STAEHELIN *et al.*, 2001). Esta camada desempenha um importante papel na proteção da Terra, atuando como filtro absorvedor de radiação ultravioleta - RUV (KRUPA; MANNING, 1988). O conteúdo restante de ozônio está localizado na troposfera (CRUTZEN, 1988). Próximo à superfície da Terra (camada limite planetária), a maior parte do ozônio é formada a partir de reações fotoquímicas de precursores em presença de radiação solar (DOHERTY, 2015). O ozônio concentrado próximo ao solo é considerado um poluente secundário e prejudicial à saúde (LIPPMANN, 1991).

A quantidade de moléculas de ozônio concentradas na coluna atmosférica, da superfície da Terra ao topo da estratosfera, é definida como conteúdo total de ozônio (CTO). O CTO é expresso em unidades Dobson (do inglês, *Dobson Unit* - DU), na qual cada 100 DU equivale a uma camada vertical de 1 mm de espessura de ozônio, em uma área de 1 m² sob condições normais de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa) (PETER, 1994). O CTO varia sazonalmente e se distribui de forma heterogênea nas latitudes do globo. A máxima produção do ozônio ocorre na região tropical (30° N - 30° S), devido à elevada disponibilidade de radiação solar. No entanto, sua concentração é maior nos polos, em virtude dos movimentos de grande escala que redistribuem esse gás na atmosfera (GREWE, 2006).

A redução da camada de ozônio, ocasionada pelas substâncias destruidoras de ozônio (do inglês, *ozone-depleting substances* - ODSs), como os clorofluorcarbonetos (CFCs), foi detectada na década de 1980 sobre a Antártica (FARMAN; GARDINER; SHANKLIN, 1985; PRATHER; WATSON, 1990; SOLOMON, 2004). A significativa diminuição do CTO sobre as regiões polares e de altas latitudes é conhecida como “Buraco na Camada de Ozônio” e surgiu em decorrência da observação de valores anormalmente baixos (< 220 DU). Devido ao sucesso do Protocolo de Montreal (WMO, 1991; UNEP, 2000), as emissões e concentrações de ODSs na atmosfera vêm decrescendo desde a metade da década de 1990 (SALAWITCH *et al.*, 2019). No entanto, as ODSs possuem tempo de vida longo na atmosfera, o que indica que o

cessamento da emissão de tais substâncias não implica em um efeito imediato no aumento do CTO na atmosfera (MÄDER *et al.*, 2010; WMO, 2018).

As nuvens, segundo componente atmosférico avaliado neste estudo, são um conjunto de gotículas de água líquida, vapor d'água e/ou cristais de gelo em suspensão na atmosfera (WMO, 1975). Em geral, as nuvens atenuam, por espalhamento, os feixes de radiação solar, e absorvem e emitem radiação de onda longa, dependendo de suas características como altura da base, tamanho, forma e conteúdo de água e gelo presentes (KYLLING; DAHLBACK; MAYER, 2000; FEISTER; CABROL; HÄDER, 2015; ZHOU; ZELINKA; KLEIN, 2016). Em outras palavras, as nuvens alteram o balanço de energia em escala local e global (STEPHENS; L'ECUYER, 2015) e afetam o sistema climático devido à grande variabilidade espaço-temporal. Por exemplo, a interação das nuvens com a radiação acarreta efeitos significativos na largura dos cinturões de chuvas tropicais e na posição das trilhas de tempestades extratropicais (VOIGT *et al.*, 2021). Fu, Smith e Yang (2018) indicaram que o efeito radiativo das nuvens aumenta em até 2 K a temperatura da tropopausa tropical. Além disso, os *feedbacks* das nuvens podem afetar a resposta dinâmica ao aquecimento global (CEPPI; HARTMANN, 2015).

Uma das formas de entendimento dos impactos das nuvens no clima é a simulação numérica via modelos climáticos. Por essa razão, os modelos climáticos têm sido amplamente utilizados para entender o clima presente e futuro. No entanto, a parametrização das nuvens e a compreensão dos mecanismos de *feedback* ainda são grandes desafios e estão em constante aprimoramento (GETTELMAN; SHERWOOD, 2016; CEPPI *et al.*, 2017; KAWAI *et al.*, 2019; MADELEINE *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021). Devido à complexidade envolvida na estimativa de propriedades microfísicas e ópticas de nuvens, a maioria dos produtos relacionados a nuvens, baseados em modelos climáticos, é incerta (CEPPI *et al.*, 2017). A principal base de dados científicas atual, o *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6), e usada neste estudo, fornece uma estimativa da fração do céu coberto por nuvens, por meio do parâmetro definido como cobertura total de nuvens (CTN). A CTN vem sendo empregada em estudos climáticos, a fim de examinar o comportamento e compreender seus possíveis impactos no clima em diferentes regiões do globo (ENRIQUEZ-ALONSO *et al.*, 2016; CHERNOKULSKY; ESAU, 2019; ANSARI; BAE; LEE, 2020). Contudo, análises globais envolvendo projeções futuras de CTN ainda são escassas na literatura, o que torna estudos dessa natureza ainda mais relevantes.

O terceiro componente atmosférico analisado são os aerossóis, denominação dada aos compostos de partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera. Essas partículas atenuam a radiação solar, por absorção e, principalmente, por espalhamento (WALLACE;

HOBBS, 2006). De forma indireta, os aerossóis também podem atuar como núcleos de condensação, contribuindo para a formação de gotículas de nuvens (NOVAKOV; PENNER, 1993). A radiação solar e terrestre também interage com as gotículas, resultando de um efeito indireto dos aerossóis no balanço de radiação. A Forçante Radiativa Efetiva (do acrônimo em inglês, ERF) é utilizada para quantificar o impacto desses e de outros elementos no balanço de energia da Terra. Segundo o Sexto Relatório de Avaliação (*Sixth Assessment Report; AR6*) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2021*), a concentração dos aerossóis antropogênicos, principalmente provenientes da queima de biomassa e de combustíveis fósseis, vem aumentando desde 1750, considerado como início do período industrial. A ERF média dos aerossóis estimada para 2014 em relação a 1750 é de $-1,3 \pm 0,7 \text{ W m}^{-2}$.

As partículas de aerossol provêm, principalmente, de diferentes fontes naturais, como o levantamento de poeira do solo ou pela evaporação de água do mar (sal marinho) e apresentam grande variabilidade de tamanhos, composição química e distribuição espacial e temporal. Desta forma, há grande incerteza quanto ao impacto dos aerossóis sobre o balanço de energia na atmosfera (BOUCHER, 2015; BELLOUIN *et al.*, 2020) e diversos estudos, de âmbito regional e global, têm sido realizados sobre o tema (PAULOT *et al.*, 2018; MICHOU *et al.*, 2019; SUBBA *et al.*, 2020; CHEN; ZHAO; FAN 2022).

Tal como acontece com a parametrização de nuvens, os bancos de dados climáticos também têm limitações quanto à disponibilidade dos dados de propriedades ópticas do aerossol. Em geral, a profundidade óptica do aerossol (do inglês, *aerosol optical depth - AOD*) é o principal parâmetro utilizado nos estudos climáticos dessas partículas atmosféricas. AOD é uma medida da quantidade total de aerossóis opticamente ativos na coluna atmosférica e, portanto, é um parâmetro para mensurar a atenuação espectral do feixe solar direto (WALLACE; HOBBS, 2006). Em geral, os dados de AOD são estimados a partir de medidas fornecidas por pireliômetros espectrais a bordo de satélites ou em superfície. Simulações e projeções de AOD também são fornecidas por modelos climáticos e abordadas em pesquisas recentes (CHERIAN; QUAAS, 2020; LI *et al.*, 2020; DOU *et al.*, 2021; ALI *et al.*, 2022).

A compreensão do impacto dos componentes do sistema climático no balanço energético é uma lacuna ainda remanescente. Os modelos climáticos são uma importante ferramenta para estudos dessa natureza (FLATO *et al.*, 2014). O CMIP6 (EYRING *et al.*, 2016), desenvolvido pelo *Working Group on Coupled Modelling (WGCM)*, tem por objetivos entender como o sistema terrestre responde ao forçamento radiativo e buscar formas de avaliar as mudanças climáticas futuras, dada a variabilidade climática interna e incertezas dos cenários.

Além disso, o projeto, em desenvolvimento contínuo, também visa aprimorar os modelos climáticos existentes, adicionar novos modelos e implementar cenários futuros que combinam diferentes cenários socioeconômicos e forçantes radiativas, denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs; RIAHI *et al.*, 2017).

A avaliação e a simulação numérica das quantidades de ozônio, nuvens e aerossóis presentes no passado e no futuro é essencial para entender a evolução do clima da Terra. Essas simulações podem melhorar a compreensão do impacto do ozônio, das nuvens e dos aerossóis na RUV e seus efeitos fotobiológicos e fotoquímicos nos seres vivos (SARKAR; GADDAMEEDHI, 2018; BERNARD; GALLO; KRUTMANN, 2019; WILLIAMSON *et al.*, 2019).

A RUV (100 - 400 nm) é subdividida em três bandas espectrais: UVC (100 - 280 nm), UVB (280 - 315 nm) e UVA (315 - 400 nm) (ICNIRP, 2004). Devido à forte absorção pelo ozônio e oxigênio molecular presentes na alta atmosfera, a RUV-C não atinge a superfície terrestre (LIOU, 2002). Assim, a exposição excessiva do ser humano às RUV-A e RUV-B é o principal fator desencadeador de efeitos nocivos como queimaduras solares (eritemas; HARRISON; YOUNG, 2002), envelhecimento precoce da pele (WLASCHEK *et al.*, 2001) e cânceres de pele não melanoma (RASS; REICHRATH, 2008; PFEIFER; BESARATINA, 2012). Por outro lado, a exposição à RUV-B promove a síntese de vitamina D, hormônio responsável pela manutenção e concentração de fósforo e cálcio no sangue (HOLICK, 2008). Adicionalmente, estudos têm associado efeitos benéficos da exposição à RUV ao bem estar psicológico (FÖCKER *et al.*, 2017; GŁĄBSKA *et al.*, 2021) e à prevenção de doenças autoimunes, diabetes tipo 1 e osteoporose (HOLICK, 2004).

Devido à redução global do CTO, os níveis de RUV aumentaram nas décadas passadas, acarretando efeitos significativos em toda a biosfera (NORVAL *et al.*, 2011; BAIS *et al.*, 2019). A moda do bronzeado promovida pela mídia e a maior liberdade de exposição do corpo influenciaram as mudanças comportamentais em relação à exposição ao Sol (CHAPMAN; MARKS; KING, 1992; MARTIN *et al.*, 2009). Os padrões culturais em favor do bronzeamento e os elevados níveis de RUV contribuíram para o aumento drástico do número de casos de câncer de pele não melanoma em diversos países (TRAKATELLI *et al.*, 2007; FRANSEN *et al.*, 2012; LOMAS; LEONARDI-BEE; BATH-HEXTALL, 2012; RUDOLPH *et al.*, 2015; LUCAS *et al.*, 2019), tornando um problema não somente de saúde pública, mas também econômico devido ao alto custo do tratamento (STANG *et al.*, 2008; BENTZEN *et al.*, 2013; DORAN *et al.*, 2015; FAUR *et al.*, 2023). Estudos também apontaram aumento da frequência de episódios de queimaduras solares (CDC, 2012; BRAUN *et al.*, 2021; BOWERS *et al.*, 2021),

um dano agudo da exposição à RUV que contribui para o surgimento de efeitos deletérios acumulativos ao longo da vida (i.e., envelhecimento da pele, desenvolvimento de câncer de pele não melanoma).

O Índice Ultravioleta (IUV)¹ foi adotado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como o padrão internacional de divulgação dos níveis danosos de RUV ao público leigo, bem como a necessidade de adoção de medidas de proteção (WHO, 2002). O IUV é uma escala numérica adimensional dividida em categorias referentes a possíveis danos à saúde – Baixo (1 a 2); Moderado (3 a 5); Alto (6 a 7); Muito Alto (8 a 10) e Extremo (11+) – e relaciona os fluxos de RUV biologicamente ativos que induzem a formação de eritema na pele humana, denominada de irradiância eritêmica² (UV_{ery}). Por ser uma ferramenta didática de informação, o IUV vêm sendo empregado em estudos que avaliam os impactos das mudanças climáticas e podem servir como subsídios para políticas de saúde pública (BAIS *et al.*, 2011; FOUNTOULAKIS; BAIS, 2015; CORRÊA *et al.*, 2013; MCKENZIE *et al.*, 2019).

Os efeitos, benéficos ou danosos, da exposição à RUV na saúde humana são decorrentes da exposição prolongada a fontes de radiação como o Sol, por exemplo. Por essa razão, a quantidade de energia recebida pelo corpo humano deve ser integrada no tempo de modo a avaliar quantidades de RUV necessárias para a formação de eritema (D_{ery}) e para a síntese de vitamina D (D_{vitD}). Tais conceitos retratam os efeitos cumulativos da exposição à RUV, permitindo inferir o impacto dos parâmetros atmosféricos, e suas alterações, sobre a saúde humana. Estudos apontam projeções de diminuição da D_{ery} e D_{vitD} no século XXI, principalmente em médias e altas latitudes devido ao aumento do CTO (TOURPALI *et al.*, 2009; CORRÊA *et al.*, 2013; BAIS *et al.*, 2015; BAIS *et al.*, 2019; CORRÊA *et al.*, 2019). Contudo, as magnitudes das alterações dependem fortemente das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e do nível de forçamento radiativo (i.e., dos cenários de mudanças climáticas). Adicionalmente, Fountoulakis e Bais (2015) mostraram que a diminuição da D_{vitD} pode ocasionar insuficiência de vitamina D em populações de altas latitudes, como Rússia e Alasca (onde vivem ~ 2,5 milhões de não nativos), tornando necessária a suplementação oral.

Tendo em vista os efeitos da exposição à RUV, as projeções futuras de IUV e doses UV podem trazer informações relevantes e contribuir para o embasamento de políticas de saúde pública e campanhas educacionais de fotoproteção. Contudo, uma das limitações das projeções globais de RUV é o elevado tempo computacional, uma vez que necessitam de simulações

¹ $IUV = 40 \int_{280nm}^{400nm} I_{\lambda} \epsilon_{\lambda} d\lambda$, onde I_{λ} é a irradiância espectral UV, ϵ_{λ} é a função resposta fotobiológica para formação de eritema e o valor 40 ($m^2 W^{-1}$) é o fator de conversão para a escala adimensional.

² Maiores detalhes sobre a UV_{ery} serão apresentados na próxima seção.

horárias para cada ponto de grade. Além disso, projeções globais que envolvam a cobertura de nuvens ainda são escassas na literatura devido à dificuldade de parametrização, erros associados à modelagem e também às incertezas dos cenários de mudanças climáticas. Por estas razões, estudos dessa natureza são de grande valia para a compreensão do impacto da RUV sobre a saúde humana, fornecendo um panorama geral dos possíveis problemas a serem enfrentados ao longo do século XXI.

Perante as limitações e atuais desafios no que diz respeito às simulações de RUV, esta tese teve como objetivo geral projetar e avaliar os fluxos globais de RUV ao longo do século XXI para os cenários de mudanças climáticas. Para tanto buscou-se: (i) analisar a performance das simulações de CTO, CTN e AOD a 550 nm (AOD550), provenientes do CMIP6, em comparação com dados obtidos da *fifth generation of European ReAnalysis* (ERA5) e *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2); (ii) examinar as mudanças projetadas desses constituintes em diferentes cenários SSPs e (iii) avaliar o impacto de tais constituintes atmosféricos nas projeções de RUV, especificamente sobre o IUUV, D_{ery} e D_{vitD} , ao longo do século XXI.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1. CTO, CTN e AOD550

As simulações e projeções climáticas realizadas neste estudo utilizam dados de seis modelos do sistema terrestre (*Earth System Models* - ESMs; Tabela 1) provenientes do CMIP6 e disponibilizados pelo *Earth System Grid Federation* (ESGF, <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>). Dentre as variáveis do CMIP6, foram considerados dados mensais de fração molar de ozônio (O₃; mol mol⁻¹), pressão atmosférica em superfície (ps; Pa), CTN (% - fração do céu encoberto) e AOD550 (adimensional). A escolha dos ESMs foi em função da disponibilidade das variáveis no banco de dados do CMIP6.

Tabela 1. Descrição dos modelos do CMIP6 utilizados no estudo.

Modelo	Resolução horizontal (lat x lon) e níveis verticais	Instituição	Referências
CESM2-WACCM	0.9° x 1.2°; 19	<i>National Center for Atmospheric Research</i>	Danabasoglu (2019a) Danabasoglu (2019b)

GFDL-ESM4	1.0° x 1.2°; 49	National Oceanic and Atmospheric Administration	Krasting <i>et al.</i> (2018) John <i>et al.</i> (2018)
IPSL-CM6A-LR	1.3° x 2.5°; 19	Institute Pierre Simon Laplace	Boucher <i>et al.</i> (2018) Boucher <i>et al.</i> (2019)
MPI-ESM1-2-HR	0.9° x 0.9°; 95	Max Planck Institute for Meteorology	Jungclaus <i>et al.</i> (2019) Schupfner <i>et al.</i> (2019)
MPI-ESM1-2-LR	1.9° x 1.9°; 47	Max Planck Institute for Meteorology	Wieners <i>et al.</i> (2019a) Wieners <i>et al.</i> (2019b)
MRI-ESM2-0	2.8° x 2.8°; 80	Meteorological Research Institute	Yukimoto <i>et al.</i> (2019a) Yukimoto <i>et al.</i> (2019b)

Os dados de CTO (DU), para cada um dos seis modelos do CMIP6 (Tabela 1), foram inferidos a partir da integração da fração molar de ozônio. O cálculo foi realizado, em todos os níveis verticais, para cada tempo e ponto de grade. Para tanto, foi utilizado o dado de pressão atmosférica em superfície (ps) para converter a coordenada vertical para os níveis de pressão, conforme a Equação 1.

$$p(n, k, j, i) = a(k) + b(k) * ps(n, j, i) \quad (1)$$

Em que $p(n, k, j, i)$ é a pressão (Pa) no ponto de grade (n = tempo; k = nível; j, i = grade horizontal); $a(k)$ e $b(k)$ são componentes da coordenada híbrida no nível k ; e $ps(n, j, i)$ é a pressão (Pa) em superfície no ponto de grade horizontal e no tempo.

De modo geral, os dados do CMIP6 são disponibilizados em duas categorias: simulações históricas e projeções futuras. As simulações históricas englobam dados de 1850 a 2014. Essas simulações são inicializadas a partir de uma condição de controle baseada em concentrações da era pré-industrial (antes de 1850) que incluem, por exemplo, emissões de espécies de vida curta (óxidos de nitrogênio - NO_x, monóxido de carbono - CO, compostos orgânicos voláteis - COVs), emissões e concentrações de GEE, uso do solo, forçante solar e aerossóis. Por outro lado, nas projeções futuras os modelos são processados para o período de 2015 a 2100 conforme os novos cenários de forçantes radiativas - SSPs, que incluem concentrações e emissões futuras de gases poluentes e alterações no uso do solo (EYRING *et al.*, 2016). O principal objetivo dos SSPs é o de facilitar e promover uma análise integrada de impactos, vulnerabilidades, adaptação e mitigação às mudanças do clima (O'NEILL *et al.*, 2017). Os cenários são categorizados em cinco grupos (narrativas): SSP1 (*Sustainability*), que representa baixos desafios de mitigação e adaptação às alterações no clima; SSP2 (*Middle of the Road*), com desafios médios de mitigação e adaptação; SSP3 (*Regional Rivalry*), com grandes desafios para mitigação e adaptação; SSP4

(*Inequality*), com baixos desafios para a mitigação e grandes desafios para a adaptação; e SSP5 (*Fossil-fueled Development*), com altos desafios para mitigação e baixos desafios para adaptação (RIAHI *et al.*, 2017). Cada cenário socioeconômico relaciona-se a um valor de forçante radiativa, que pode ser de 1.9, 2.6, 3.4, 4.5, 6.0, 7.0 ou 8.5 Wm^{-2} , projetado a ser alcançado até o final do século.

Para o presente estudo foram considerados os cenários SSP1-2.6 (forçante radiativa baixa), SSP2-4.5 (forçante radiativa intermediária), SSP3-7.0 (forçante radiativa alta) e SSP5-8.5 (forçante radiativa muito alta).

2.1.1. Verificação das simulações do clima presente

A etapa preliminar deste estudo consistiu da comparação das simulações do clima presente provenientes do CMIP6 com bases de dados amplamente utilizadas em estudos climáticos: ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu>) e MERRA-2 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>). Os dados mensais de CTO e CTN da ERA5, e de AOD550 da MERRA-2, foram utilizados exclusivamente para avaliar o desempenho das simulações.

Os dados da ERA5 são fornecidos pelo *Copernicus Climate Change Service (C3S)* do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* e combina observações históricas em estimativas globais utilizando modelos físicos avançados e assimilação de dados. Ademais, englobam um grande conjunto de variáveis atmosféricas, terrestres e oceânicas, em pontos de grade com resolução horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ latitude/longitude (~ 30 km) que abrangem todo o globo (ECMWF, 2022). A MERRA-2 é produzida pelo *Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)* da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e assimila dados observacionais de aerossóis e representa suas interações com processos físicos do sistema climático. Possui resolução de 0.5° de latitude e 0.625° de longitude e compreende dados desde 1980 até o presente (BOSILOVICH; LUCCHESI; SUAREZ, 2016).

Uma climatologia de 35 anos (1980 - 2014) foi considerada para averiguação das simulações. Os dados dos ESMs do CMIP6, da ERA5 e MERRA-2 foram interpolados bilinearmente para uma grade regular de $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ latitude/longitude. Em seguida, foi calculada a média do conjunto multimodelo (*ensemble mean*) a partir da média aritmética simples dos seis ESMs. Como métricas estatísticas de avaliação foram consideradas as médias anuais do viés (Equação 2) e raiz do quadrado médio do erro (RQME; Equação 3) (VIGNESH *et al.* 2020; IPCC, 2021).

$$Viés = \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (2)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (3)$$

Em que, E_i são os dados do CMIP6, O_i os dados das reanálises (ERA5 e MERRA-2) e n o número amostral de dados.

Para classificar individualmente cada ESM e o *ensemble mean*, conforme o desempenho nas simulações, foram considerados os valores de amplitude (diferenças entre os valores máximo e mínimo) da RQME. Dessa forma, uma posição foi atribuída a cada conjunto de dados em ordem crescente dos valores de amplitude da RQME.

2.1.2. Avaliação das mudanças projetadas

As projeções futuras de CTO, CTN e AOD550 foram avaliadas para os períodos próximo (2021-2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI. O período de referência ou *baseline* foi definido como 1995 - 2014. Os intervalos de tempo foram semelhantes aos encontrados no IPCC AR6 (IPCC, 2021) e tem como objetivo avaliar as alterações do clima em curto, médio e longo prazo.

Para quantificação das mudanças projetadas foi considerada a diferença relativa (DR; Equação 4), que também indica o sinal da mudança. Desta forma, valores positivos correspondem à projeção de aumento das variáveis analisadas e valores negativos, a redução.

$$DR = \left(\frac{X - X_r}{X_r} \right) * 100 \quad (4)$$

Em que X = valores das projeções futuras e X_r = valores do período de referência (1995-2014), ambos provenientes do *ensemble mean* do CMIP6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são divididos em dois subtópicos gerais. No subtópico 3.1 são apresentadas as análises de desempenho dos ESMs e do *ensemble mean*, provenientes do CMIP6, nas simulações de CTO, CTN e AOD550 em comparação com dados de reanálises da ERA5 e MERRA-2 (subtópico 3.1.1); e as projeções ao longo do século XXI sob diferentes cenários SSPs (subtópico 3.1.2). No subtópico 3.2 são exibidas as avaliações sobre as projeções do impacto das mudanças climáticas na RUV, especificamente sobre o IUV (subtópico 3.2.1), dose para formação de eritema (subtópico 3.2.2) e síntese de vitamina D (subtópico 3.2.3). Adicionalmente, são apresentadas as análises das projeções dos tempos de exposição para formação de eritema e síntese de vitamina D (subtópico 3.2.4) e da atenuação ocasionada pela cobertura de nuvens (subtópico 3.2.5).

3.1. CTO, CTN e AOD550: simulações e projeções

3.1.1. Desempenho dos ESMs

As distribuições espaciais dos vieses e RQME do CTO são apresentadas na Figura 1. Há subestimativas e superestimativas entre os modelos e para as diversas regiões do globo. Com exceção dos modelos GFDL-ESM4 e CESM2-WACCM, os demais ESMs superestimam o CTO nas regiões polares.

O modelo MRI-ESM2-0 superestima o CTO globalmente com elevadas magnitudes, semelhante aos resultados obtidos por Keeble *et al.* (2021) e Shang, Luo e Wang (2021). Vieses superiores a 50 DU são encontrados em latitudes médias (30° - 60°) e altas (60° - 90) em ambos os hemisférios (Tabela 2). No entanto, os valores máximos de viés e RQME (> 66 DU) são encontrados em latitudes médias no Hemisfério Sul (HS). O MRI-ESM2-0 usa química interativa para calcular as abundâncias de ozônio na troposfera e na atmosfera média (YUKIMOTO *et al.*, 2019c), o que poderia ser um indicativo dos altos valores dos vieses. No entanto, de acordo com Keeble *et al.* (2021), este componente do modelo não explicou os altos valores de CTO encontrados, uma vez que os demais modelos com química interativa (e.g., CESM2-WACCM e GFDL-ESM4) não apresentaram resultados similares aos do MRI-ESM2-0.

Há similaridade na distribuição espacial dos parâmetros estatísticos avaliados para os modelos IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR e MPI-ESM1-2-LR, com aumento em direção aos

polos. Na região tropical, são encontrados vieses entre -9 e +11 DU (RQME < 12 DU) e em altas latitudes, os vieses são positivos e variam até 25 DU (RQME < 27 DU).

Os ESMs CESM2-WACCM e GFDL-ESM4 indicam predominância de subestimativa do CTO, mas há heterogeneidade nas distribuições espaciais dos vieses. O GFDL-ESM4 exibe apenas vieses negativos (entre -19 e -3 DU) com RQME < 25 DU em latitudes médias e altas de HS. Por outro lado, o modelo CESM2-WACCM apresenta vieses entre -13 e +18 DU (RQME < 23 DU), abrangendo tanto subestimativa quanto a superestimativa do CTO. Nas latitudes médias do Hemisfério Norte (HN), os modelos têm vieses mínimos extremos de até -15 DU para o CESM2-WACCM e até -25 DU para o GFDL-ESM4.

Apesar da superestimativa global do CTO pelo MRI-ESM2-0, há compensação de vieses entre os modelos, o que afeta o *ensemble mean*. Para o *ensemble mean*, os resultados mostram vieses entre -3 e +11 DU (RQME \leq 12 DU) nos trópicos e entre -2 e +22 DU (RQME < 23 DU) nas latitudes médias e altas. Mesmo considerando um número menor de ESMs e em um período diferente (1960 - 2014), os resultados são comparáveis aos encontrados por Keeble *et al.* (2021) para o *ensemble mean* proveniente do CMIP6 (22 ESMs) e o conjunto de dados do *National Institute of Water and Atmospheric Research – Bodeker Scientific* (NIWA-BS). No estudo mencionado, no período de 1960-2014, o *ensemble mean* superestimou o CTO entre 10 a 20 DU em regiões tropicais e de latitudes médias.

Com base no ranqueamento dos valores de amplitude da RQME, os ESMs apresentam diferentes desempenhos nas simulações de CTO para as regiões avaliadas, exceto para o MRI-ESM2-0 (Tabela 2). Por exemplo, em latitudes médias e altas do HN, o CESM2-WACCM e o *ensemble mean*, seguidos pelo IPSL-CM6A-LR indicam menores amplitudes da RQME. Por outro lado, em altas latitudes do HS, as menores magnitudes são para os modelos IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR e MPI-ESM1-2-LR. De modo geral, o *ensemble mean*, seguido de IPSL-CM6A-LR e MPI-ESM1-2-HR, apresentam os melhores desempenhos nas simulações de CTO para as regiões avaliadas. Esses resultados demonstram que o *ensemble mean* diminui as discrepâncias individuais dos modelos, assim como amplamente demonstrado na literatura.

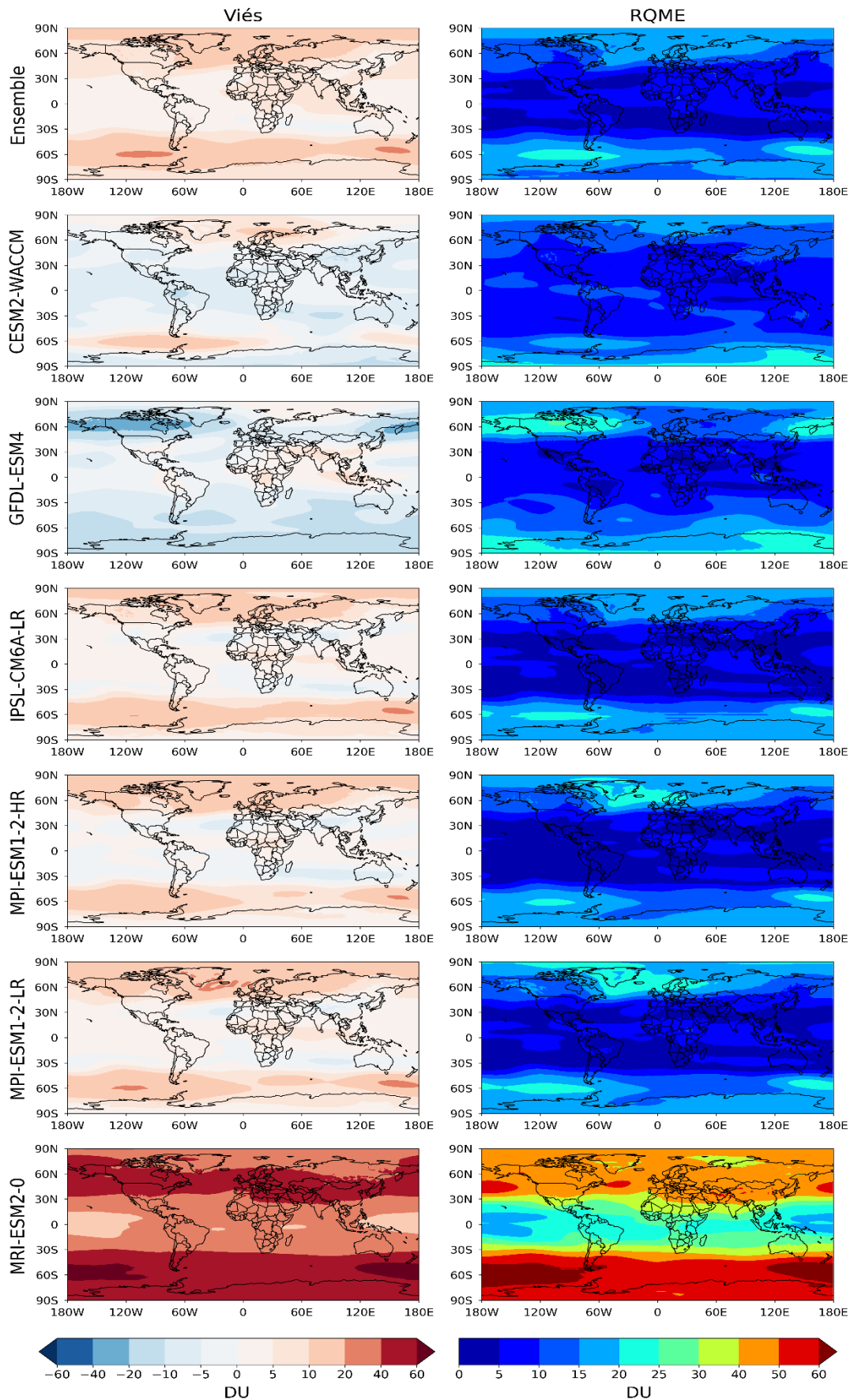


Figura 1. Distribuição espacial do viés e RQME do conteúdo total de ozônio (CTO) médio anual simulado por seis modelos do CMIP6 e o *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014.

Tabela 2. Mínimos e máximos vieses e RQME do conteúdo total de ozônio (CTO; DU) em cinturões de latitudes, para cada ESM analisado e *ensemble mean*.

	Latitudes Altas HN (60° - 90° N)		Latitudes Médias HN (30° - 60° N)		Tropical (30° N - 30° S)		Latitudes Médias HS (30° - 60° S)		Latitudes Altas HS (60° - 90° S)	
	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME
<i>Ensemble mean</i>	3,0/ 19,1	8,8/ 21,1	0,0/ 17,6	3,4/ 19,8	-2,1/ 11,0	2,8/ 12,0	-1,6/ 21,2	3,0/ 22,0	4,8/ 21,3	13,2/ 22,5
CESM2-WACCM	-6,5/ 12,8	9,0/ 17,1	-14,8/ 9,4	5,0/ 16,0	-11,3/ 2,3	3,1/ 12,6	-11,0/ 16,8	4,8/ 18,3	-12,5/ 17,5	12,5/ 22,5
GFDL-ESM4	-24,1/ 5,0	9,7/ 26,4	-24,2/ 11,2	4,2/ 26,2	-10,8/ 11,1	3,3/ 12,7	-16,0/ -3,1	5,4/ 19,7	-18,8/ -8,1	11,9/ 24,4
IPSL-CM6A-LR	0,5/ 19,0	8,2/ 21,0	-12,7/ 17,3	2,6/ 19,5	-7,4/ 9,0	2,4/ 10,1	-6,4/ 21,0	2,4/ 22,0	2,1/ 20,3	14,2/ 22,2
MPI-ESM1-2-HR	1,9/ 22,5	8,6/ 24,2	-9,1/ 19,5	2,9/ 21,6	-8,6/ 8,2	2,2/ 9,2	-7,5/ 20,5	2,4/ 21,5	0,6/ 19,4	12,6/ 20,8
MPI-ESM1-2-LR	2,6/ 24,9	8,9/ 26,6	-9,3/ 21,8	2,6/ 23,7	-6,9/ 10,6	2,3/ 11,4	-5,9/ 21,7	2,3/ 22,7	1,1/ 20,6	13,2/ 21,9
MRI-ESM2-0	31,3/ 56,4	36,3/ 58,2	30,9/ 53,8	31,5/ 55,0	15,3/ 48,4	16,8/ 49,0	31,0/ 66,5	31,5/ 67,3	48,0/ 63,0	49,8/ 64,9

A classificação foi realizada para cada região e em ordem crescente dos valores de amplitude da RQME.



Em relação à CTN, o modelo CESM2-WACCM apresentou predominância de valores superiores de vieses e RQME comparados aos demais ESMs e o *ensemble mean* (Figura 2). Por exemplo, na Antártica, as magnitudes são superiores a 15%, atingindo magnitudes de vieses de até 40% em áreas específicas do continente. Esse resultado pode ser devido à dificuldade do modelo em simular os processos convectivos e as interações entre a atmosfera e o manto de gelo que recobre a Antártica (YIP *et al.*, 2021). Além disso, observações de nuvens sobre a região são limitadas (LACHLAN-COPE, 2010), tornando as parametrizações nos modelos ainda mais complexas e produzindo erros significativos nas simulações.

Em regiões de alta atividade convectiva que condizem com a configuração de ciclones extratropicais (55° - 65° N e 55° - 65° S; NAUD *et al.*, 2019), os ESMs indicam diferenças nos padrões espaciais dos vieses. Em 55°-65° N, há predominância de superestimativa da CTN, exceto para o MRI-ESM2-0 (Tabela 3). Os vieses estão concentrados entre -15 e +16% (RQME < 16%) para MPI-ESM1-2-HR, entre -5 e +26% (RQME < 26%) para GFDL-ESM4, e entre -25 e +18% para o MRI-ESM2-0 (RQME < 25%). Por outro lado, em 55° - 65° S, os vieses

possuem menores magnitudes e variam entre -13 e +10% no MPI-ESM1-2-HR e entre -2 e +21% no CESM2-WACCM.

Outra região de alta nebulosidade avaliada neste estudo é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT; WALLACE E HOBBS, 2006), entre 10° N e 10° S. Nessas latitudes, os ESMs têm vieses e RQME mais altos em comparação com as outras regiões mencionadas acima, principalmente para o IPSL-CM6A-LR (vieses entre -46 e +37% e RQME < 46%) e o CESM2-WACCM (vieses entre -16 e +35% e RQME < 35%). Mesmo com diferenças na distribuição espacial dos vieses, as magnitudes estão entre -26 e +29% para o MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR e MRI-ESM2-0.

Apesar da discrepância entre os ESMs analisados, os vieses do *ensemble mean* concentram-se majoritariamente entre $\pm 10\%$ (predominância de RQME abaixo de 10%). Esse resultado se deve à compensação dos vieses nas simulações, uma vez que os mesmos não são distribuídos de forma homogênea nos modelos. Em latitudes próximas ao equador (10° N - 10° S), os vieses variam entre -23 e +20%, com RQME abaixo de 23%. Para essa região, o *ensemble mean* apresenta a menor variação espacial da RQME (1 a 23%) comparado a cada modelo individualmente (Tabela 3).

Simulações e representações de nuvens são um grande desafio para a modelagem. Embora a distribuição global da cobertura total de nuvens seja ainda mais desafiadora e contenha erros associados, os ESMs estão se aprimorando (LAUER *et al.*, 2023). Assim, os resultados da RQME indicam que o modelo MPI-ESM1-2-HR e o *ensemble mean* simulam a CTN com menores erros para as regiões avaliadas (Tabela 3).

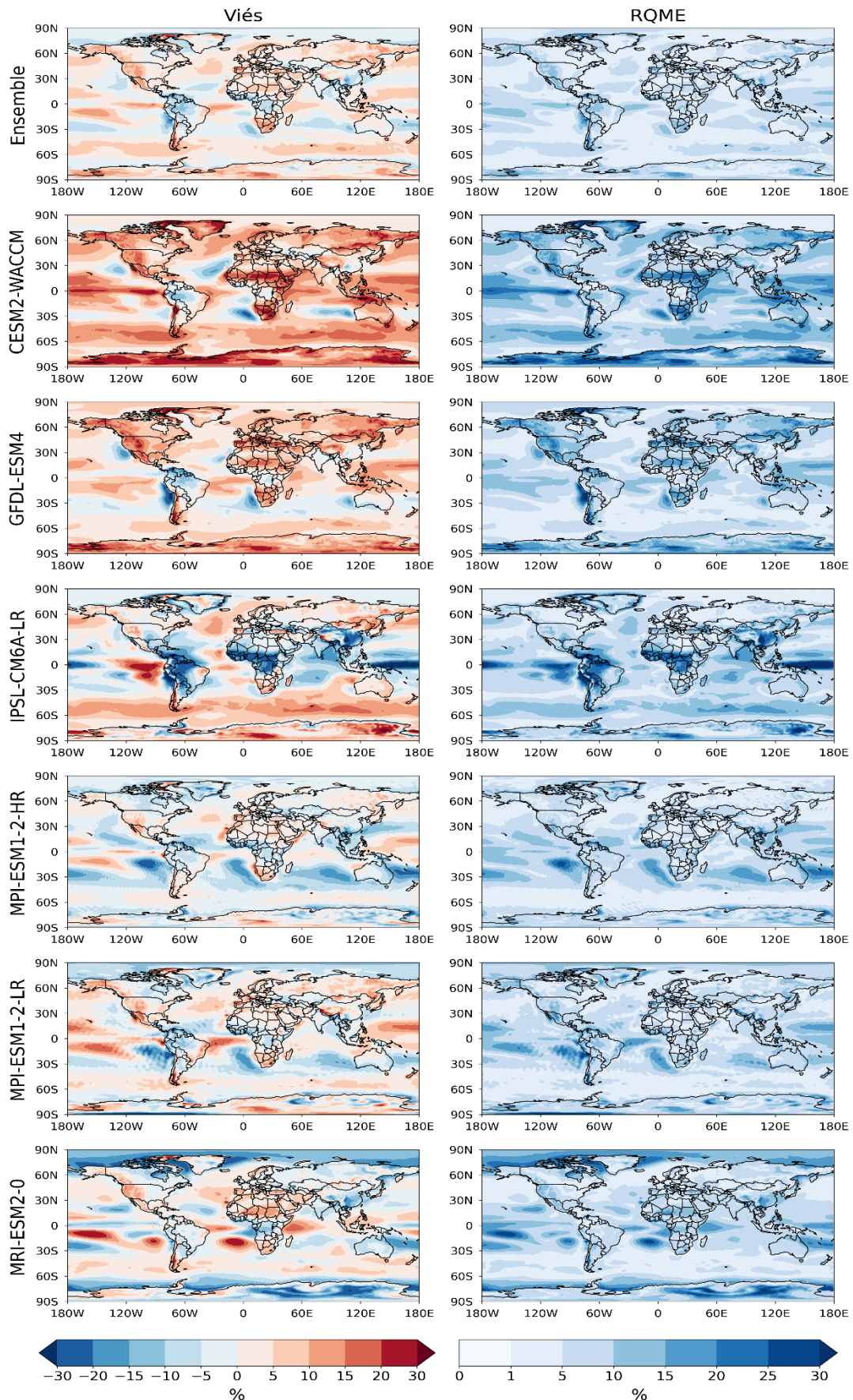


Figura 2. Distribuição espacial do viés e RQME da cobertura total de nuvens (CTN) média anual simulada por seis modelos do CMIP6 e *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014.

Tabela 3. Mínimos e máximos vieses e RQME da cobertura total de nuvens (CTN; %) em cinturões de latitudes, para cada ESM analisado e *ensemble mean*.

	55° - 65° N		55° - 65° S		10° N - 10° S	
	Min/ Max viés	Min/ Max RQME	Min/ Max viés	Min/ Max RQME	Min/ Max viés	Min/ Max RQME
<i>Ensemble mean</i>	-10,8/ 20,5	1,5/ 20,6	-5,8/ 13,1	0,9/ 13,4	-22,8/ 20,1	1,8/ 22,9
CESM2-WACCM	-0,5/ 25,3	2,9/ 25,4	-1,9/ 20,8	2,2/ 21,0	-15,2/ 34,3	2,0/ 34,8
GFDL-ESM4	-4,2/ 25,6	1,7/ 25,7	0,1/ 18,5	1,7/ 18,8	-28,6/ 17,8	1,7/ 29,3
IPSL-CM6A-LR	-21,8/ 24,7	2,2/ 24,8	-1,4/ 16,5	2,3/ 16,5	-45,7/ 36,6	2,3/ 46,0
MPI-ESM1-2-HR	-14,9/ 15,5	2,0/ 15,8	-12,7/ 9,1	1,3/ 12,9	-25,2/ 25,7	2,1/ 26,4
MPI-ESM1-2-LR	-16,9/ 19,9	1,9/ 20,1	-18,4/ 10,2	1,2/ 18,6	-25,5/ 26,8	2,5/ 27,5
MRI-ESM2-0	-24,5/ 17,7	1,7/ 24,7	-14,4/ 10,4	1,5/ 14,7	-24,7/ 28,1	1,8/ 28,9

A classificação foi realizada para cada região e em ordem crescente dos valores de amplitude da RQME.



Considerando a AOD550, os maiores valores de viés correspondem aos locais com alta concentração de aerossóis, como Norte da África, África Ocidental, Índia e China (TORRES *et al.*, 2002; LUO *et al.*, 2014; MISRA; KANAWADE; TRIPATHI, 2016) (Figura 3). Além disso, há discrepância no padrão espacial de subestimativa e superestimativa no norte da África. Por exemplo, os vieses variam entre -0,23 e +1,21 para o CESM2-WACCM e entre -0,13 e +0,10 para MRI-ESM2-0 (Tabela 4).

Há superestimativa da AOD550 no leste e centro-sul da China para os ESMs GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR e MRI-ESM2-0. Os vieses variam entre 0,11 e 0,44 para o GFDL-ESM4 e entre 0,07 a 0,29 para o MPI-ESM1-2-HR. Para essa região, o modelo MRI-ESM2-0 exibe as maiores magnitudes de viés e RQME, com valores de até 0,53 e 0,57, respectivamente. No sudoeste e noroeste da China, há superestimativa para os modelos CESM2-WACCM, GFDL-ESM4 e IPSL-CM6A-LR, atingindo valores extremos de 0,91, 0,53 e 1,05, respectivamente. Especificamente para o MRI-ESM2-0, as superestimativas se concentram em uma pequena porção da região noroeste e atingem valor máximo de 0,90.

No norte do Brasil, especificamente sobre a Amazônia, os modelos CESM2-WACCM e GFDL-ESM4 apresentam os maiores valores de vieses (0,26 e 0,23) e RQME (0,26 e 0,23).

Para os demais ESMs, os resultados indicam discrepância na distribuição espacial dos vieses. No entanto, há predominância de magnitudes entre $\pm 0,10$. Os aerossóis sobre a Amazônia provêm de fontes naturais (pólen, fungos, poeira do deserto africano, partículas marinhas do Oceano Atlântico) e antropogênicas, emitidas principalmente pela queima de biomassa (ARTAXO *et al.*, 1990; MARTIN *et al.*, 2010). Desta forma, a gama de fontes de emissão e concentrações de aerossóis podem impactar a distribuição espacial da AOD550 entre ESMs.

As discrepâncias nas distribuições espaciais dos vieses, principalmente sobre a China, norte do Brasil e Índia, são minimizadas no *ensemble mean*. Os vieses variam de 0,03 a 0,21 (RQME $\leq 0,22$) no leste e centro-sul da China, de -0,05 a 0,09 (RQME $\leq 0,09$) no norte do Brasil, e de 0,01 a 0,14 (RQME $\leq 0,15$) na Índia. Na região central da China, resultado semelhante foi obtido por Ali *et al.* (2022) no período 2000 - 2014, que indicou RQME de 0,19, para o *ensemble mean* proveniente de 15 ESMs do CMIP6 em comparação com os dados do Terra-MODIS C6.1 DTB AOD.

Com base no ranqueamento conforme os valores de amplitude da RQME, os ESMs MPI-ESM1-2-HR e MPI-ESM1-2-LR, seguidos pelo *ensemble mean*, apresentam melhor desempenho (baixos valores de RQME; Tabela 4). Tais conjuntos de dados concentram os menores erros nas simulações da AOD550 em comparação com os dados MERRA-2.

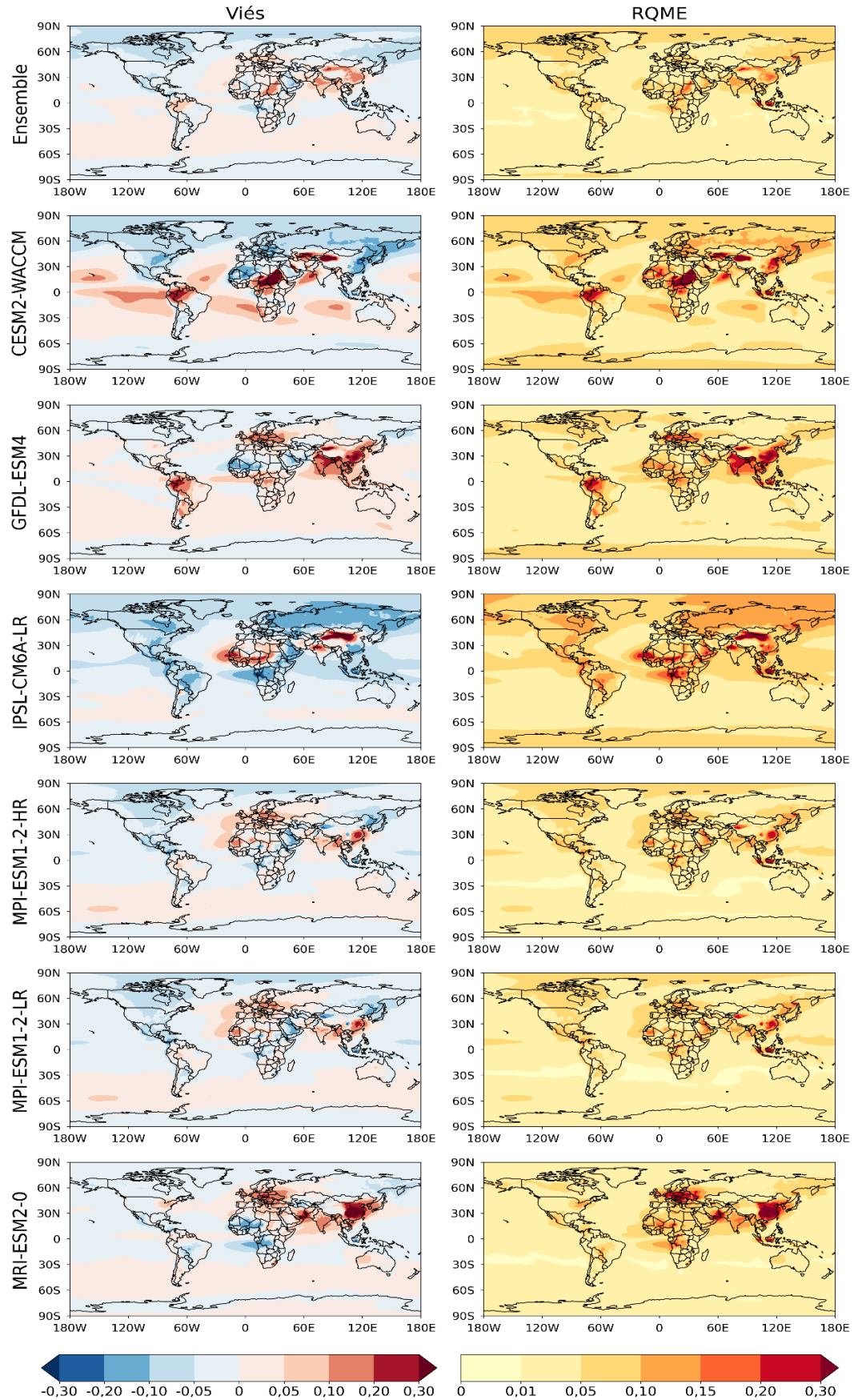


Figura 3. Distribuição espacial do viés e RQME da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD₅₅₀) média anual simulada por seis modelos do CMIP6 e o *ensemble mean*, para o período 1980 - 2014.

Tabela 4. Mínimos e máximos vieses e RQME da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550; adimensional) em algumas regiões, para cada ESM analisado e *ensemble mean*.

	Norte da África		Leste e Centro-sul da China		Sudoeste e Noroeste China		Índia		Norte do Brasil	
	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME	Min/Max viés	Min/Max RQME
<i>Ensemble mean</i>	-0,08/ 0,22	0,02/ 0,22	0,03/ 0,21	0,05/ 0,22	-0,05/ 0,25	0,02/ 0,26	0,01/ 0,14	0,04/ 0,15	-0,05/ 0,09	0,02/ 0,09
CESM2-WACCM	-0,23/ 1,21	0,02/ 1,21	-0,22/ 0,00	0,03/ 0,25	-0,14/ 0,91	0,01/ 0,91	-0,06/ 0,17	0,03/ 0,18	-0,05/ 0,26	0,02/ 0,26
GFDL-ESM4	-0,15/ 0,04	0,03/ 0,16	0,11/ 0,44	0,12/ 0,46	-0,02/ 0,53	0,03/ 0,53	0,03/ 0,27	0,06/ 0,29	-0,01/ 0,23	0,03/ 0,23
IPSL-CM6A-LR	-0,07/ 0,19	0,03/ 0,21	-0,20/ -0,02	0,06/ 0,22	-0,28/ 1,05	0,04/ 1,06	-0,08/ 0,32	0,05/ 0,33	-0,15/ -0,04	0,05/ 0,16
MPI-ESM1-2-HR	-0,07/ 0,15	0,02/ 0,15	0,07/ 0,29	0,08/ 0,29	-0,25/ 0,08	0,01/ 0,25	-0,07/ 0,12	0,03/ 0,13	-0,06/ 0,06	0,02/ 0,07
MPI-ESM1-2-LR	-0,08/ 0,15	0,02/ 0,15	0,02/ 0,33	0,06/ 0,33	-0,28/ 0,10	0,01/ 0,30	-0,07/ 0,12	0,04/ 0,12	-0,06/ 0,06	0,02/ 0,07
MRI-ESM2-0	-0,13/ 0,10	0,03/ 0,14	0,09/ 0,53	0,12/ 0,57	-0,15/ 0,90	0,02/ 0,96	0,01/ 0,18	0,07/ 0,19	-0,10/ 0,06	0,02/ 0,11

A classificação foi realizada para cada região e em ordem crescente dos valores de amplitude da RQME.



3.1.2. Mudanças projetadas

Com base nos resultados apresentados e discutidos na subseção anterior, o *ensemble mean* se destaca com melhores desempenhos nas simulações (menores magnitudes de vies e RQME) para as três variáveis analisadas, uma vez que minimiza as discrepâncias entre os modelos. Por esta razão, as projeções futuras são avaliadas exclusivamente para a média do conjunto. A Figura 4 mostra as mudanças projetadas no CTO, ao longo do século XXI para os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Na região tropical, há discrepância no sinal das mudanças projetadas para os cenários de forçantes radiativas, que se deve às emissões de GEE (MEUL *et al.*, 2016). No entanto, as mudanças mais pronunciadas ocorrem no final do século. Por exemplo, em 2081 - 2100, são projetadas diminuições no CTO de até 4,0% e 1,5% nos cenários SSP1-2.6 e SP2-4.5, respectivamente (Tabela 5). Por outro lado, os resultados indicam aumento nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5, com máximos de 7,0% e 6,5%, respectivamente. Como mostrado por Keeble *et al.* (2021), ao longo do século XXI, o CTO nos trópicos é projetado para retornar aos valores

da década de 1960 somente para os cenários de forçamento radiativo alto e muito alto (SSP3-7.0 e SSP5-8.5, respectivamente).

A predominância do declínio do CTO na região tropical, nos cenários SSP1-2.6 e SSP2-4.5, está associada ao decréscimo do ozônio troposférico (SHANG; LUO; WANG, 2021) devido às menores emissões de precursores nesses SSPs (IPCC, 2021). Em contrapartida, em cenários com maiores emissões de GEE, as mudanças no CTO são afetadas pelo aumento do ozônio na alta estratosfera, devido ao declínio de ODS e aumento de GEE, pela diminuição do ozônio na baixa estratosfera devido à aceleração da Circulação *Brewer-Dobson* (do inglês, BDC), e aumento do ozônio troposférico (LANGEMATZ, 2019).

Em altas latitudes do HS, o CTO apresenta alterações mais consideráveis em comparação com o HN, principalmente para os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 e no final do século. Por exemplo, sobre a Antártica, aumentos de até 30,0% são encontrados nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 no período intermediário (2061 - 2080) e final do século (2081 - 2100). Essas magnitudes de alterações correspondem às variações no CTO entre 50 e 80 DU comparadas ao período de referência (1995 - 2014). Nessa região, os aumentos projetados estão associados, principalmente, ao declínio da emissão de ODSs desde a implementação do Protocolo de Montreal em 1989 (SALAWTICH *et al.*, 2019). Como os compostos químicos têm longo tempo de vida na atmosfera, os impactos são mais significativos a longo prazo (VELDERS *et al.*, 2007). Por outro lado, em altas latitudes do HN, os valores projetados são menores, com valores entre 10,0% e 20,0% (30 - 50 DU) para o final do século (Tabela 5).

Existe similaridade na distribuição espacial das mudanças projetadas em latitudes médias, com aumentos para todos os SSPs, exceto para o cenário SSP1-2.6 (Figura 4). Nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 são projetados aumentos de até 12,0% (em 2041 - 2060) e 20,0% (em 2081 - 2100), respectivamente (Tabela 5). As projeções de CTO são influenciadas pelas concentrações futuras de GEE e suas reações químicas. Indiretamente, também são afetadas pelo resfriamento da estratosfera e pelas mudanças que causam na BDC (LANGEMATZ, 2018). Assim, cenários de maiores forçantes radiativas indicam as maiores magnitudes de alterações, principalmente no final do século e em latitudes médias e altas.

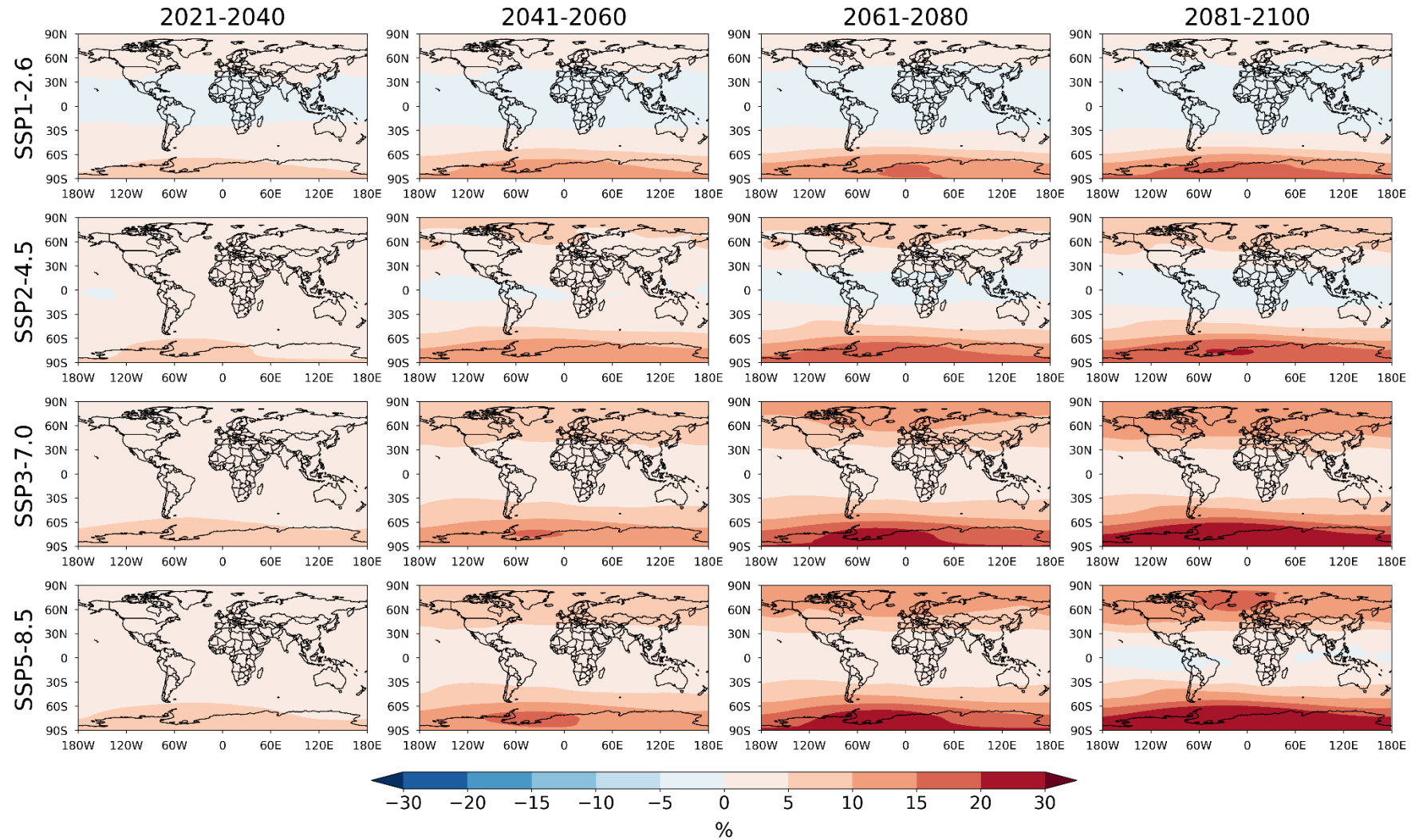


Figura 4. Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Tabela 5. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) do conteúdo total de ozônio (CTO) em cinturões de latitudes para os períodos e SSPs.

Período	Cenário	Latitudes Altas HN (60° - 90° N)	Latitudes Médias HN (30° - 60° N)	Tropical (30°N - 30°S)	Latitudes Médias HS (30° - 60° S)	Latitudes Altas HS (60° - 90° S)
2021-2040	SSP1-2.6	0,6/1,7	-1,2/1,7	-1,2/1,2	0,2/4,2	2,7/5,9
	SSP2-4.5	2,8/3,7	0,6/3,8	-0,1/2,2	1,2/4,9	2,8/6,0
	SSP3-7.0	3,6/4,5	1,6/4,5	0,5/3,4	2,1/5,9	3,9/7,4
	SSP5-8.5	2,8/4,1	1,1/4,2	0,2/2,8	1,5/5,7	3,7/6,8
2041-2060	SSP1-2.6	0,7/2,4	-2,0/1,9	-2,2/1,4	0,0/7,8	4,7/11,5
	SSP2-4.5	4,4/5,6	0,8/5,3	-0,4/3,0	1,3/9,6	6,5/13,4
	SSP3-7.0	7,0/8,6	3,2/8,2	1,1/5,1	3,3/11,6	8,4/15,2
	SSP5-8.5	6,8/8,7	2,9/8,4	0,4/4,5	2,8/12,0	8,5/15,8
2061-2080	SSP1-2.6	0,0/2,5	-2,9/1,3	-3,1/1,2	-0,3/9,9	5,7/15,4
	SSP2-4.5	4,4/6,6	0,2/6,2	-0,9/3,1	1,1/11,8	7,7/17,2
	SSP3-7.0	9,1/12,2	3,8/11,4	0,8/5,9	3,7/15,6	11,1/21,3
	SSP5-8.5	9,6/12,9	3,6/12,2	0,1/5,9	3,2/16,7	11,3/22,1
2081-2100	SSP1-2.6	-0,2/1,4	-3,4/0,9	-4,0/0,7	-0,7/10,2	5,6/16,5
	SSP2-4.5	5,1/7,3	0,1/7,0	-1,5/2,9	0,8/13,9	8,9/20,2
	SSP3-7.0	11,2/14,8	4,5/14,0	0,6/7,0	4,3/19,0	13,3/25,9
	SSP5-8.5	11,5/16,3	3,0/15,3	-0,8/6,5	2,7/20,0	14,0/27,1

As mudanças projetadas no CTO médio para o mês de dezembro são exibidas na Figura 5. Há similaridade com as projeções médias anuais, tanto na distribuição espacial quanto nas magnitudes (vide Figura 4). As alterações são mais pronunciadas no final do século, para os cenários de maiores forçantes radiativas e regiões de médias e altas latitudes. Apesar dos resultados indicarem aumentos de até 30,0% na Antártica em direção ao final do século (SSP5-8.5), o CTO é projetado para retornar aos valores de dezembro de 1965 somente em 2079 (SIDDAWAY *et al.*; 2013). Ademais, os mesmos autores ainda afirmam que as tendências de recuperação do ozônio em regiões de altas latitudes são mais lentas para o mês de dezembro se comparado ao mês de setembro (mês com baixas concentrações de ozônio nas regiões polares do HS; SOLOMON; PORTMANN; THOMPSON, 2007).

Para junho, as projeções médias de CTO apresentam alterações de menores magnitudes (Figura 6). Há predominância de valores entre $\pm 5,0\%$ ao longo do século para o cenário SSP1-2.6, e também no período 2021 - 2040 para todos os SSPs. Em médias e altas latitudes do HN, os aumentos projetados são de até 15,0% para o SSP5-8.5 (2061 - 2080 e 2081 - 2100). Para as altas latitudes do HS, as projeções podem atingir valores de até 20,0% no final do século (2081 - 2100). Ainda com a diminuição usual das concentrações de ozônio sobre o continente Antártico, que se inicia em meados de junho com intensificação na primavera, (NEWMAN, 2010; KUTTIPPURATH *et al.*, 2013), os resultados indicam aumentos do CTO sobre a região

no mês de junho, com maior intensidade em direção ao final do século, o que evidencia a recuperação do ozônio a médio e longo prazo.

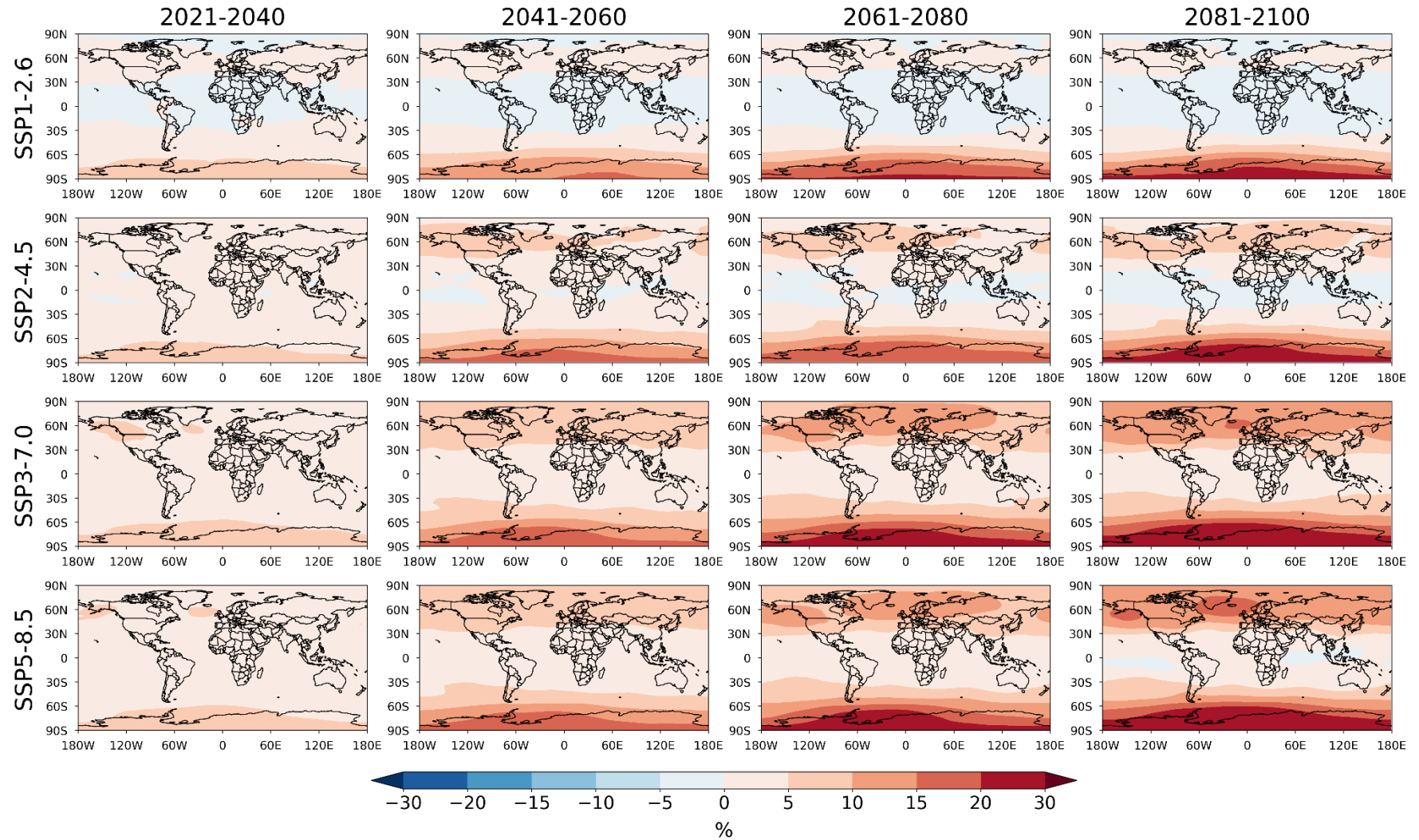


Figura 5. Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

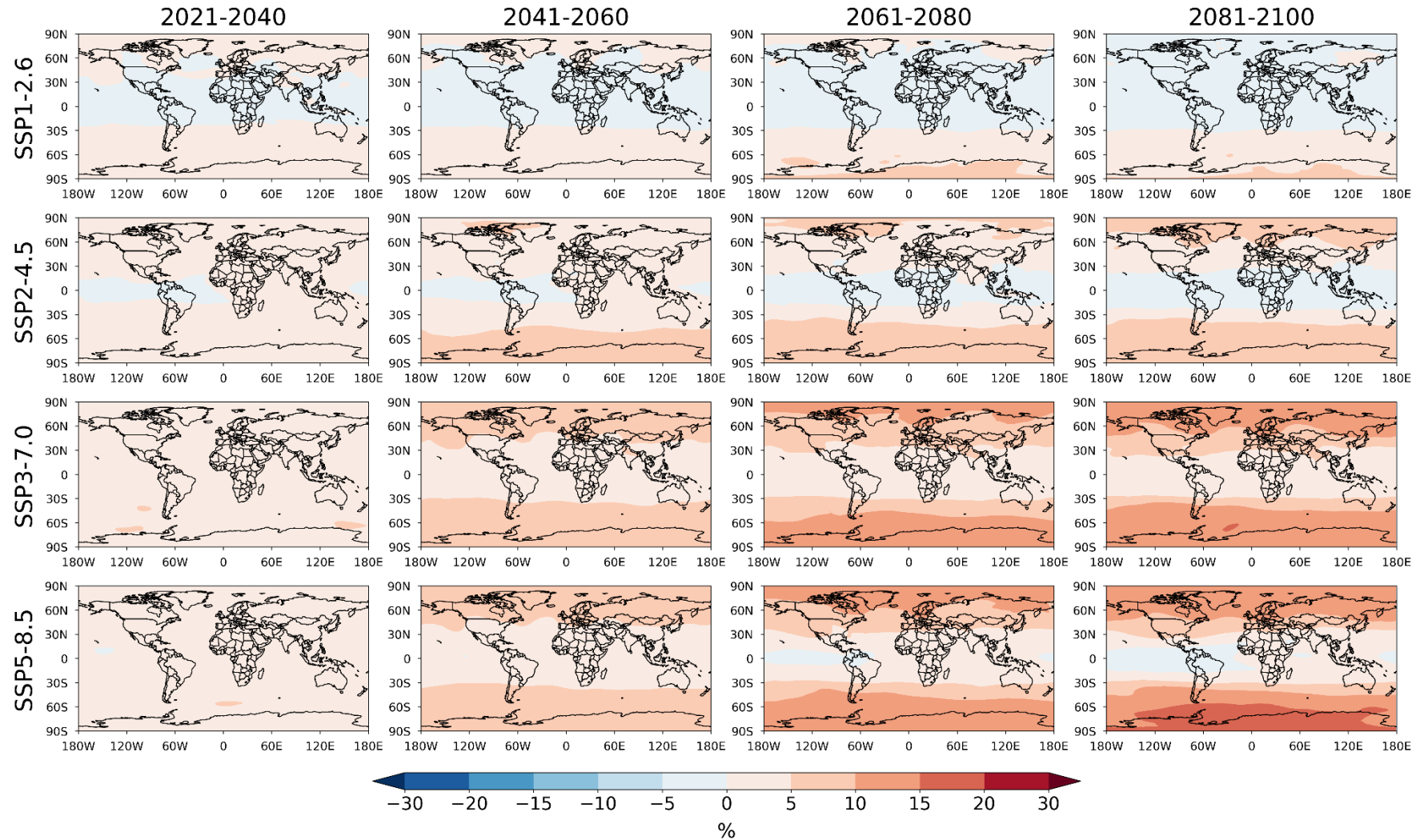


Figura 6. Mudanças projetadas no conteúdo total de ozônio (CTO) médio para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Em relação à CTN, os resultados indicam intensificação das magnitudes das alterações no final do século com o aumento da forçante radiativa (Figura 7). Na América do Sul, há predomínio de diminuição da CTN ao longo do século XXI. No período 2041 - 2060, são projetadas reduções de até 7,8% e 9,3% nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, respectivamente (Tabela 6). Por outro lado, no final do século (2081 - 2100), alterações próximas a -15,0% são encontradas nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Os resultados são consistentes com os estudos de Almazroui *et al.* (2021) e Ortega *et al.* (2021), que indicam diminuição da precipitação média anual ao longo do cinturão tropical, abrangendo partes no Brasil, Chile, Guiana, Guiana Francesa e Suriname, com maiores mudanças no final do século e para os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Sobre o Oceano Pacífico Tropical Leste, o aumento da CTN é projetado ao longo do século XXI em todos os cenários SSPs, cuja magnitude depende do nível de forçante radiativa. No período intermediário (2041 - 2060), são projetadas alterações da ordem de 12,0% para os cenários SSP2-4.5 e SSP3-7.0. Por outro lado, no final do século (2081-2100), são projetados valores de até 26,8% e 31,7% nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5, respectivamente. Para essa região, o aumento da cobertura de nuvens pode estar associado à ZCIT. Devido ao aquecimento da temperatura da superfície do mar projetado em cenários de maiores forçantes radiativas, a ZCIT tende a se deslocar para o sul (MAMALAKIS *et al.*, 2021; DHAGE; WIDLANSKY, 2022).

Os resultados indicam aumentos de até 10,7% e 9,3% na Groenlândia e na Antártica, respectivamente. Em altas latitudes, nos períodos próximo (2021 - 2040) e intermediário (2061 - 2080), são projetadas mudanças entre $\pm 5,0\%$ para os SSPs. Resultados similares foram encontrados em Trenberth e Fasullo (2009), com aumentos de até 5,0% em altas latitudes considerando o conjunto de dados do CMIP3. No final do século (2081 - 2100), o padrão espacial de mudança é semelhante, mas há aumento nas magnitudes, principalmente no cenário SSP5-8.5.

No norte e sul da África, há predominância de decréscimos na CTN ao longo do século XXI. No cenário SSP5-8.5, as magnitudes atingem -5,6% em 2021 - 2040 e -10,4% em 2041 - 2060. Por outro lado, no período 2081-2100, a diminuição projetada para a CTN é de até 20,2%. Esses locais são influenciados por anticiclones subtropicais (GUO; LI; FENG, 2016) e os resultados são consistentes com a redução da nebulosidade devido à intensificação deste sistema (FAHAD; BURLS; STRASBERG; 2020).

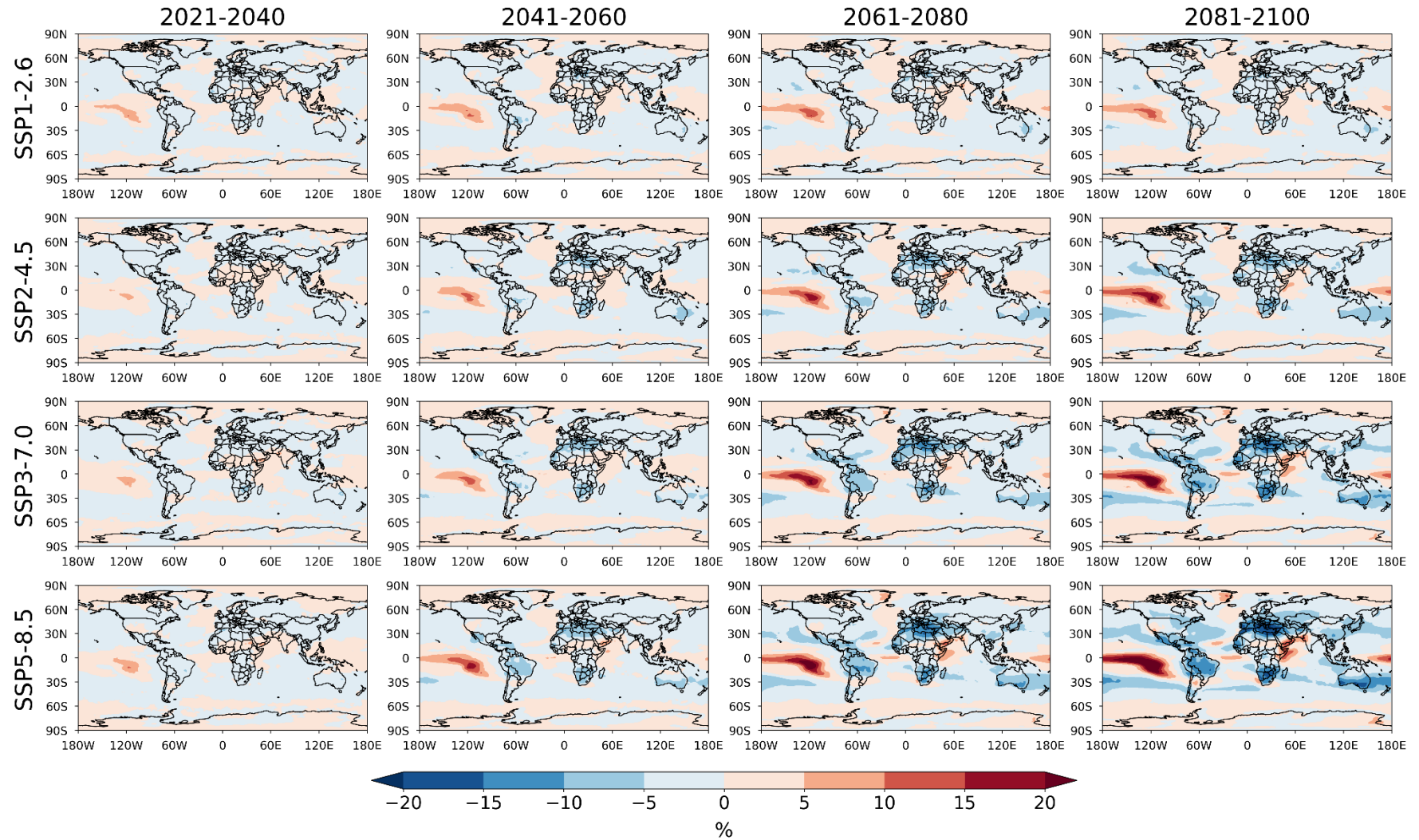


Figura 7. Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Tabela 6. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) da cobertura total de nuvens (CTN) em cinturões de latitudes e regiões para os períodos e SSPs.

Período	Cenário	América do Sul	Oceano Pacífico Tropical Leste*	Latitudes Altas HN (60° - 90° N)	Latitudes Altas HS (60° - 90° S)	Norte da África	Sul da África
2021-2040	SSP1-2.6	-4,2/1,3	-1,5/8,5	-2,0/1,7	-1,7/2,5	-3,7/1,4	-5,1/1,6
	SSP2-4.5	-8,4/1,2	-1,7/7,2	-2,0/2,2	-2,1/2,8	-3,6/4,8	-4,2/0,4
	SSP3-7.0	-5,6/2,3	-2,3/9,4	-1,9/2,6	-2,0/3,2	-4,2/1,9	-6,2/0,4
	SSP5-8.5	-5,6/1,9	-2,0/9,5	-2,0/3,2	-2,1/1,9	-5,6/2,4	-4,4/0,3
2041-2060	SSP1-2.6	-7,8/2,3	-2,6/10,1	-3,0/4,8	-1,7/2,8	-5,1/3,1	5,0/0,0
	SSP2-4.5	-7,7/2,6	-2,2/12,0	-2,8/3,1	-1,9/2,8	-7,7/1,5	-8,5/0,6
	SSP3-7.0	-8,1/2,3	-3,0/12,8	-3,2/4,4	-2,0/3,8	-8,6/2,8	-7,9/0,3
	SSP5-8.5	-9,3/2,1	-3,3/17,2	-3,1/5,2	-2,6/4,3	-10,4/0,5	-9,7/0,7
2061-2080	SSP1-2.6	-8,2/2,9	-2,8/14,3	-3,0/4,2	-2,4/3,0	-6,7/3,0	-4,5/1,8
	SSP2-4.5	-8,3/2,4	-2,9/18,2	-3,9/4,6	-2,0/2,8	-9,4/0,7	-9,2/1,5
	SSP3-7.0	-12,2/5,8	-3,8/21,2	-3,8/6,2	-3,0/5,6	-12,9/1,7	-11,3/1,3
	SSP5-8.5	-11,7/6,0	-5,8/25,9	-4,0/8,6	-2,8/6,1	-15,0/4,3	-12,5/1,4
2081-2100	SSP1-2.6	-7,0/4,1	-3,0/12,5	-2,8/3,2	-2,4/2,0	-6,5/0,2	-5,5/0,8
	SSP2-4.5	-11,3/5,2	-3,1/20,4	-3,8/6,3	-2,6/3,0	-10,3/1,8	-10,9/2,0
	SSP3-7.0	-14,6/6,6	-6,5/26,8	-4,6/7,1	-4,1/6,3	-16,2/1,4	-16,0/2,1
	SSP5-8.5	-15,5/11,2	-6,5/37,1	-5,6/10,7	-3,3/9,3	-20,2/-0,1	-17,8/2,6

* Limites longitudinais e latitudinais: 180° W, 84° W, 10° S, 10° N.

As projeções de CTN médias para os meses de dezembro e junho são apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente. As alterações apresentam maiores magnitudes se comparadas às projeções anuais, uma vez que a média anual suaviza as variações mensais.

O destaque de aumento da CTN ocorre para a região do Oceano Pacífico Tropical Leste, influenciada pela ZCIT (DHAGE; WIDLANSK, 2022). Para o mês de dezembro (verão no HS; Figura 8) a CTN tende a mover-se em direção à costa da América do Sul em latitudes ~20° S e pode atingir aumentos superiores a 20,0% nos períodos 2061 - 2080 e 2081 - 2100 para os cenários de maiores forçantes radiativas. Em junho (Figura 9), as alterações de maiores magnitudes ($\geq 20,0\%$) cobrem maior área, abrangendo também o Oceano Pacífico Tropical Oeste. Sobre o Oriente Médio também há projeção de aumento da CTN em junho. Magnitudes superiores a 20,0% são encontradas no período 2041 - 2060 para os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5, e também nos períodos 2061 - 2080 e 2081 - 2100 em todos os SSPs.

A redução da CTN no sul da África, Austrália, sudeste, centro-oeste e sul do Brasil em junho condiz com a configuração dos anticiclones, que tendem a se deslocarem nos meses de inverno inibindo a formação de nuvens e reduzindo a precipitação (REBOITA *et al.*, 2010). Nesses locais, as alterações projetadas atingem valores de até -20,0% no cenário SSP2-4.5 e inferiores a -20,0% nos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 no final do século. Em resposta às

mudanças climáticas, os anticiclones tendem a se intensificarem no inverno impactando nos padrões de cobertura de nuvens e precipitação (FAHAD; BURLS; STRASBERG; 2020)

Ao longo do século XXI, há projeção de diminuição da CTN sobre a área continental do HN para o mês de junho (verão boreal). No entanto, as maiores magnitudes de alterações (~ -20,0%) ocorrem no período intermediário (2061 - 2080) e no final do século (2081 - 2100) para os cenários de maiores forçantes radiativas. Chang *et al.* (2016) apontaram que a atuação do ciclone extratropical é fortemente correlacionada com a cobertura de nuvens. Adicionalmente, os autores sugerem que a projeção de decréscimo da sua atividade em grande parte do HN no verão (junho-julho-agosto) impacta na diminuição CTN.

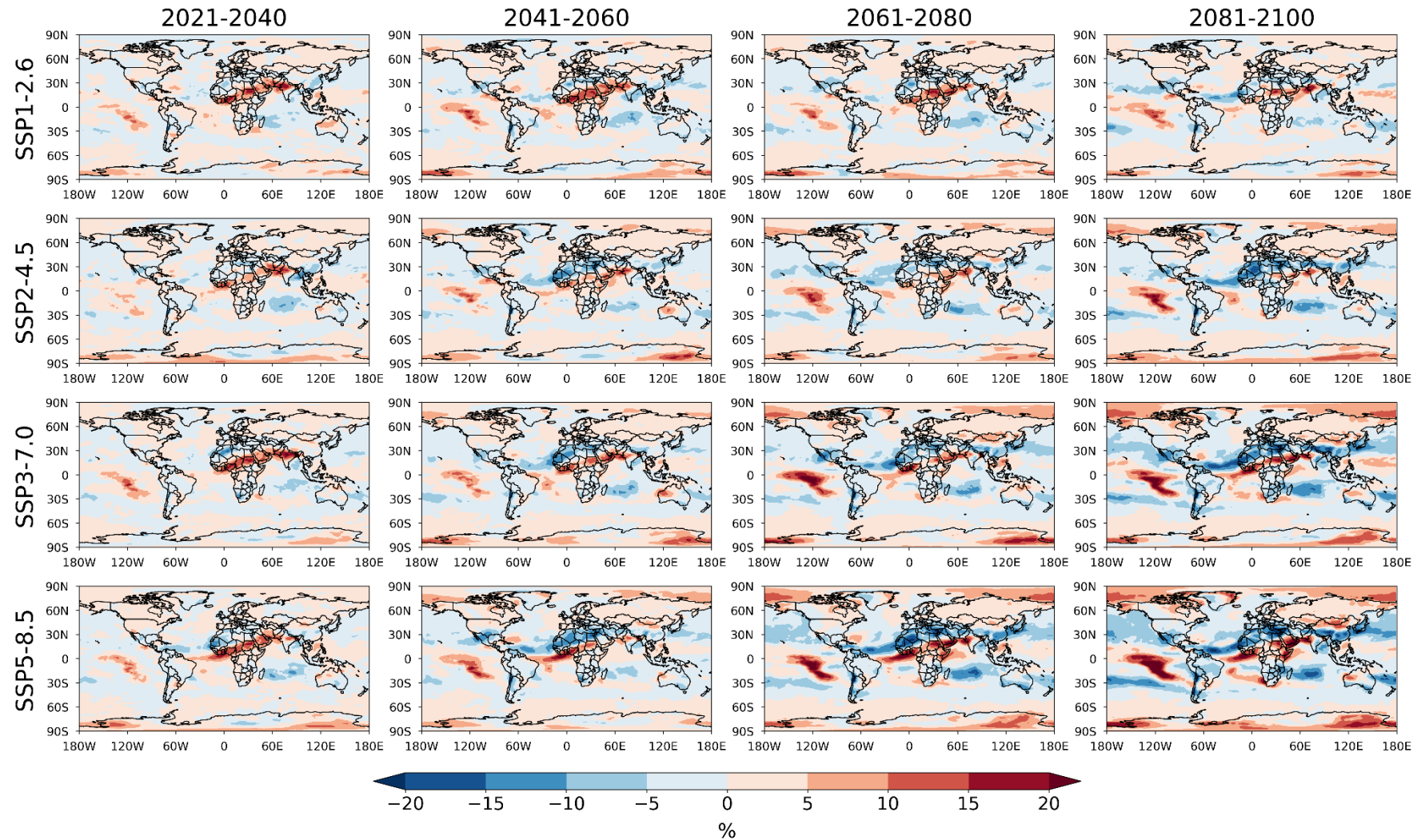


Figura 8. Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

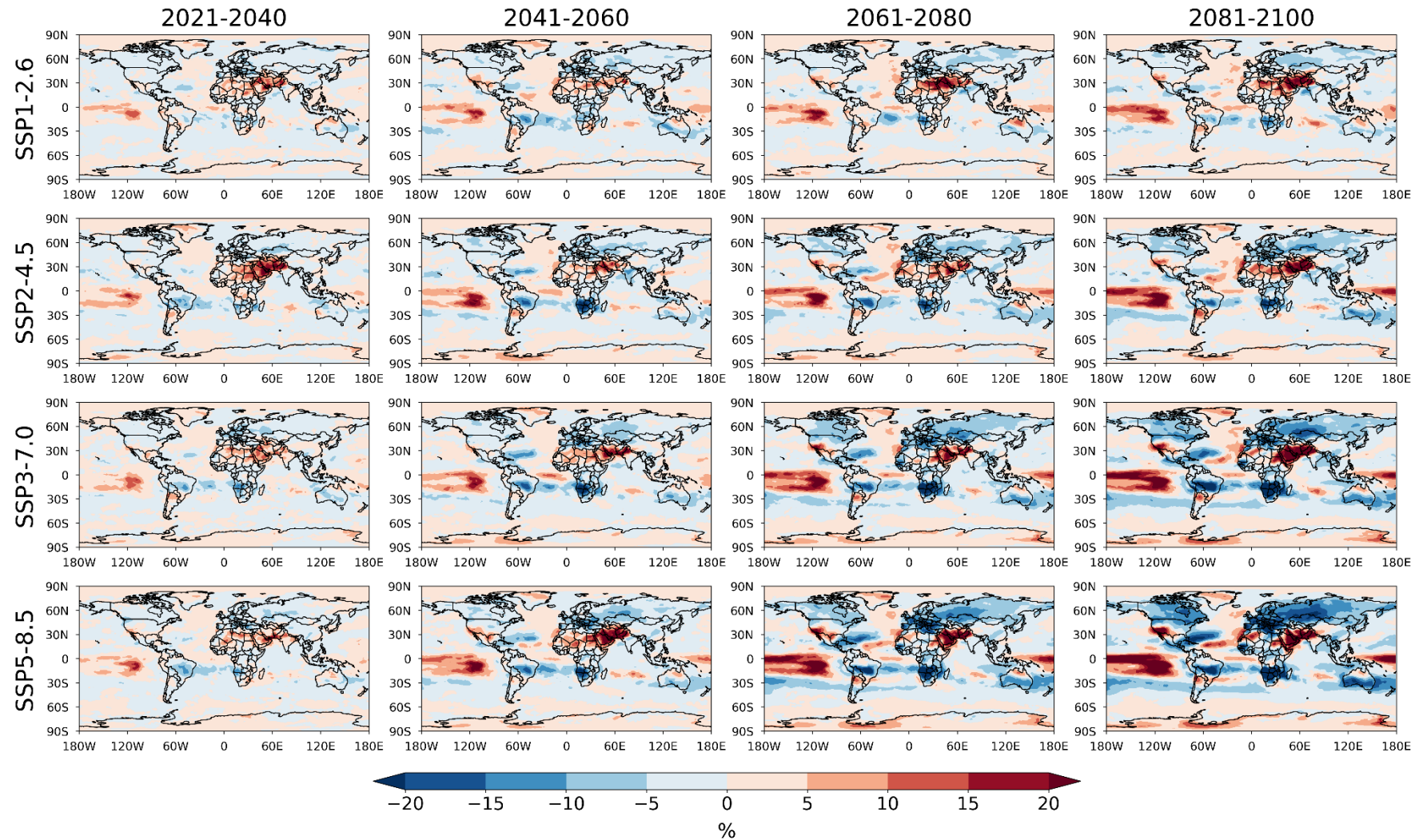


Figura 9. Mudanças projetadas na cobertura total de nuvens (CTN) média para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

A Figura 10 mostra as mudanças projetadas na AOD550 ao longo do século XXI para os diferentes SSPs. Decréscimos de AOD550 no HN são projetados em todos os cenários e períodos avaliados. No entanto, as alterações mais significativas ocorrem em cenários de baixa (SSP1-2.6) e intermediária (SSP2-4.5) forçante radiativa. Na América do Norte e Europa, as mudanças projetadas são de até -62,5% no período 2041-2060 e de até -66,5% no final do século (Tabela 7). A diminuição substancial da AOD550 também foi encontrada por Westervelt *et al.* (2015) e Cherian e Quaas (2020). O menor declínio, projetado sob o cenário SSP3-7.0, está relacionado às menores reduções de aerossóis de sulfato nesta perspectiva de futuro (DRUGÉ *et al.*, 2021).

As maiores magnitudes de alterações da AOD550 estão concentradas no cenário SSP1-2.6, atingindo até -71,5% no final do século. Exceto no SSP3-7.0, há predominância de decréscimos no nordeste, leste, centro-sul e na maior parte do norte da China. Para esses locais e no período intermediário (2041 - 2060), as projeções apontam reduções de até 38,0% nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. No cenário SSP1-2.6, as reduções de AOD estão relacionadas às políticas de qualidade do ar e controle de emissões de poluentes. Por outro lado, as emissões de dióxido de enxofre no cenário SSP3-7.0 (IPCC, 2021) impactam o sinal de mudança projetado ao longo do século.

Apesar das diferenças nos níveis de forçantes radiativas para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, há similaridades nos padrões espaciais das mudanças projetadas na Índia. Os maiores aumentos da AOD550 são encontrados para os cenários SSP3-7.0 (2041 - 2060) e SSP5-8.5 (2021 - 2040), com valores de até 84,7% e 65,3%, respectivamente. No entanto, no final do século, tais cenários apresentam diferentes distribuições espaciais. Enquanto o cenário SSP3-7.0, que prevê menor implementação de controles de qualidade do ar, indica aumento de quase 20,0% na AOD550, o cenário SSP5-8,5, de maior forçante radiativa, prevê diminuição de até 21,5% na AOD550. Os resultados para o SSP5-8.5 são consistentes com as projeções de decréscimo do material particulado (PM_{2,5} - carbono negro, poeira, sulfato, sal marinho e aerossol orgânico) a partir de meados do século (XU; WU; HAN, 2022).

Na África Central e Oriental há predominância de aumentos da AOD550 em todos os cenários SSPs ao longo do século. No entanto, em cenários de forçantes radiativas alta (SSP3-7.0) e muito alta (SSP5-8.5) e, para longo prazo (2081-2100), valores extremos ($\geq 82\%$) são encontrados. Nessas regiões africanas, Westervelt *et al.* (2015) apontaram projeção de aumento do sulfato, do carbono negro e do carbono orgânico no final do século e para o cenário de alta forçante radiativa, o que condiz com os resultados de aumento da AOD550.

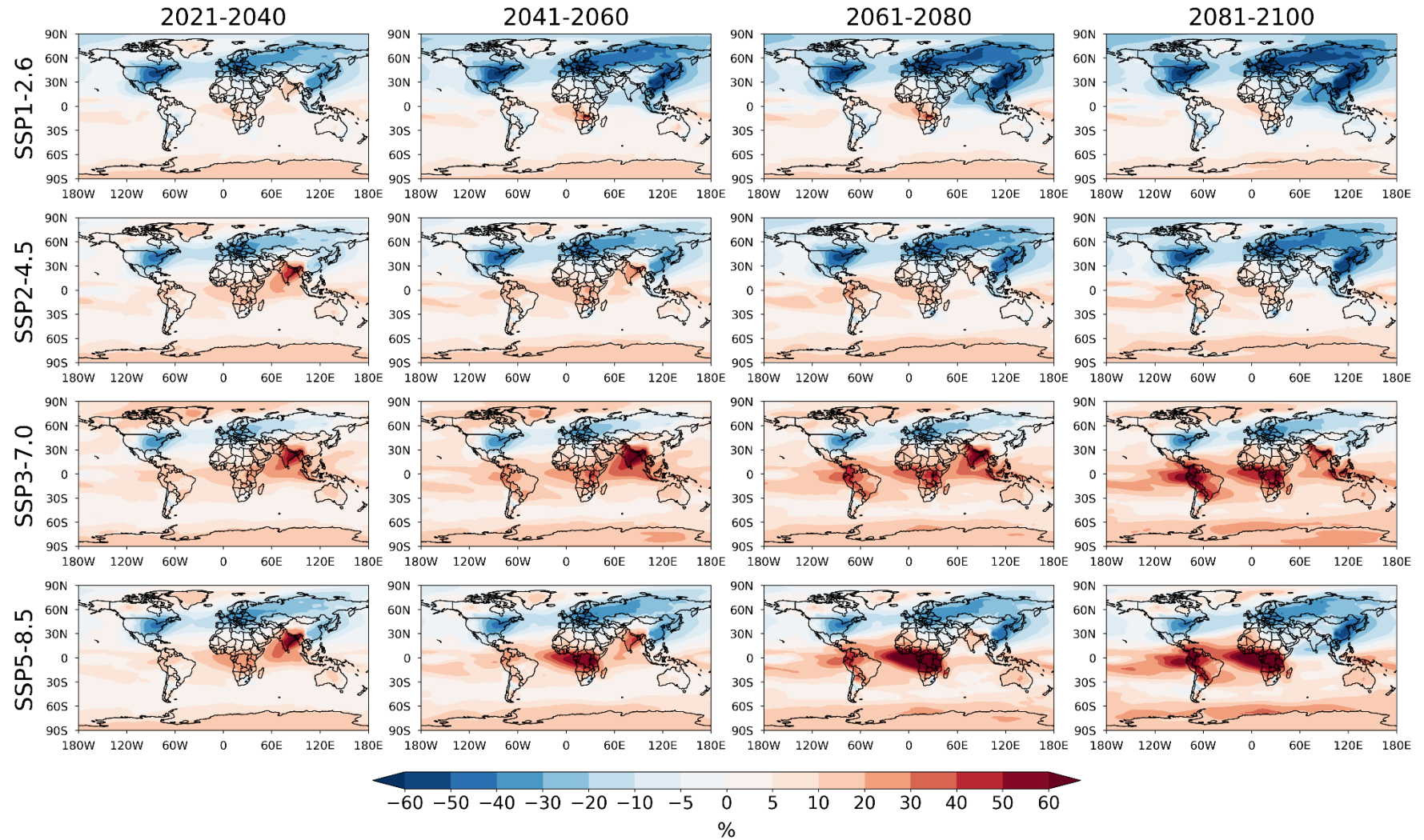


Figura 10. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) média anual para os períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

Tabela 7. Diferenças relativas mínimas e máximas (%) da profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD550) em algumas regiões para os períodos e SSPs.

Período	Cenário	América do Norte	Europa	Nordeste, Leste, Centro-Sul e Norte da China	Índia	Leste e Centro da África
2021-2040	SSP1-2.6	-55,4/10,4	-44,9/-2,2	-40,6/-11,0	4,2/16,7	-7,7/19,9
	SSP2-4.5	-46,2/15,9	-43,2/0,7	-21,4/-6,8	14,2/53,1	0,5/25,5
	SSP3-7.0	-39,4/21,8	-32,1/3,8	0,1/15,5	20,6/60,8	4,3/28,9
	SSP5-8.5	-44,7/16,1	-40,4/0,9	-27,8/-5,5	15,8/65,3	2,0/32,2
2041-2060	SSP1-2.6	-62,5/5,4	-57,8/-4,5	-62,4/-20,9	-18,0/-6,9	-17,2/73,4
	SSP2-4.5	-53,5/13,0	-47,6/-1,7	-37,2/-12,0	9,9/33,4	-1,6/40,4
	SSP3-7.0	-40,8/22,2	-36,7/4,1	0,8/19,4	31,2/84,7	8,8/48,2
	SSP5-8.5	-46,1/14,3	-42,9/1,5	-37,6/-10,7	13,5/43,7	1,3/77,6
2061-2080	SSP1-2.6	-65,5/7,7	-61,1/-6,8	-68,9/-24,4	-34,1/-14,5	-20,4/62,6
	SSP2-4.5	-57,7/8,8	-49,8/-2,1	-50,9/-19,6	0,5/11,2	-5,0/28,1
	SSP3-7.0	-42,2/24,6	-39,5/4,2	-5,1/10,5	26,3/78,7	10,0/63,4
	SSP5-8.5	-45,0/16,3	-41,1/0,1	-47,8/-17,4	3,2/24,3	1,9/115,6
2081-2100	SSP1-2.6	-66,5/1,9	-63,1/-9,3	-71,5/-25,9	-44,4/-17,5	-25,0/20,7
	SSP2-4.5	-59,9/6,5	-51,8/-5,1	-60,6/-22,6	-9,4/2,0	-8,5/17,9
	SSP3-7.0	-45,4/31,2	-43,4/5,3	-13,5/3,1	19,3/58,5	8,6/82,7
	SSP5-8.5	-44,3/20,8	-42,4/4,3	-57,4/-23,4	-21,5/-2,7	-10,8/98,9

As Figuras 12 e 13 mostram as mudanças projetadas para a AOD550 média nos meses de dezembro e junho, respectivamente. Não houve grandes alterações nas distribuições espaciais nos SSPs ao longo do século. Assim, as diferenças observadas entre os meses dizem respeito às magnitudes das mudanças. Por exemplo, para as áreas continentais do HN, as reduções na AOD550 são mais acentuadas no mês de dezembro (inverno boreal; Figura 11) se comparadas ao mês de junho (verão boreal; Figura 12), independentemente do cenário de forçante radiativa. No entanto, as maiores diferenças entre os meses ocorrem para o cenário SSP5-8.5 no final do século (2081 - 2100). Na China, magnitudes inferiores a -60,0% são projetadas em dezembro e de até -50,0% são projetadas em junho.

Notória diferença (sinal da mudança) entre as projeções de AOD550 nos meses de dezembro e junho é observada na Índia para o cenário SSP3-7.0. Para o período próximo (2021 - 2040) e no mês de dezembro, são projetados aumentos superiores a 60,0% sobre todo o território. Por outro lado, para o mês de junho, há predominância de alterações de até 40,0%.

Em relação ao aumento da AOD550, a região de destaque é o setor centro-sul da África e América do Sul. Nessas localidades, as distribuições espaciais das mudanças projetadas são similares entre os meses avaliados, o que reflete também na média anual. Há aumento de magnitudes com aumento da forçante radiativa, podendo atingir valores superiores a 60% em direção ao final do século e para o cenário SSP5-8.5.

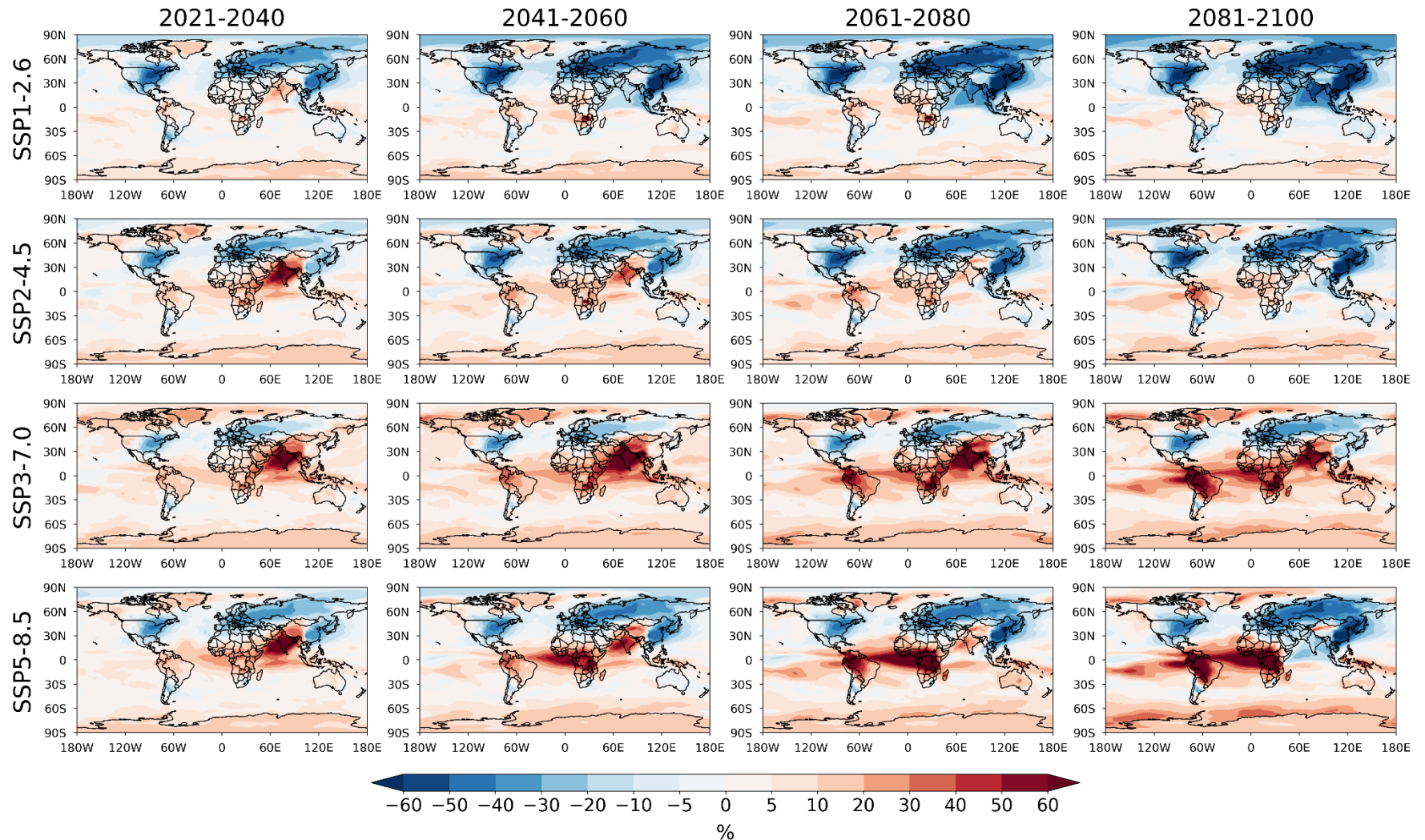


Figura 11. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD₅₅₀) média para o mês de dezembro nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

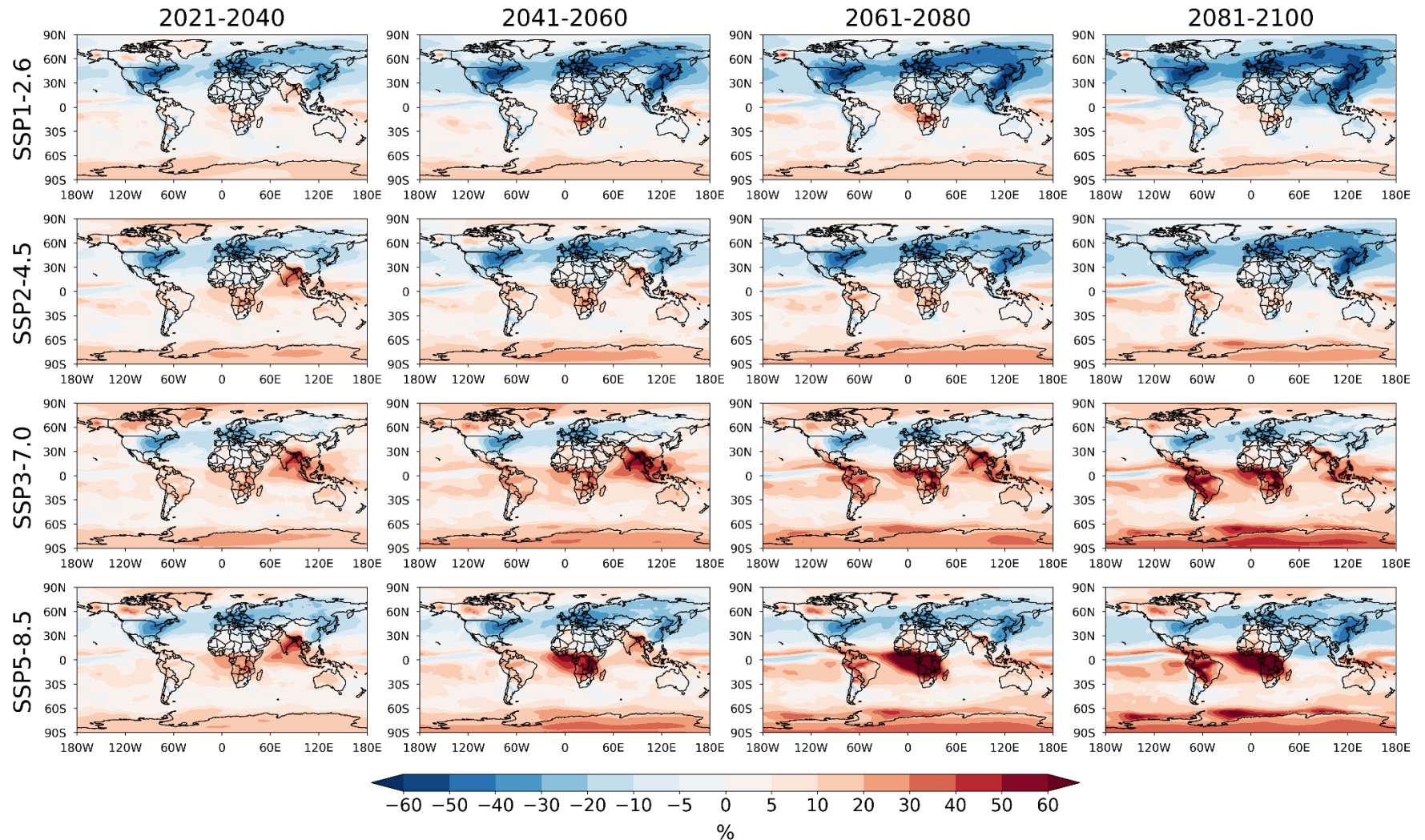


Figura 12. Mudanças projetadas na profundidade óptica do aerossol a 550 nm (AOD₅₅₀) média para o mês de junho nos períodos próximo (2021 - 2040), intermediários (2041 - 2060 e 2061 - 2080) e final (2081 - 2100) do século XXI sob os diferentes cenários SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Todos os painéis foram elaborados considerando o *ensemble mean* dos Modelos do Sistema Terrestre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, P.; KNABEL, P.; FLEISCHER JR, A. B. United States burden of melanoma and non-melanoma skin cancer from 1990 to 2019. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 85, n. 2, p. 388-395, 2021.
- ALI, M. A.; BILAL, M.; WANG, Y.; QIU, Z.; NICHOL, J. E.; DE LEEUW, G.; KE, S.; MHAWISH, A.; ALMAZROUI, M.; MAZHAR, U.; HABTEMICHEAL, B. A.; ISLAM, M. N. Evaluation and comparison of CMIP6 models and MERRA-2 reanalysis AOD against Satellite observations from 2000 to 2014 over China. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 2, p. 101325, 2022.
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N.; RASHID, I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSSON, A. A.; ARIAS, P. A.; ALVES, L. M.; TIPPETT, M. K.; SAEED, S.; HAARSMAN, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, A. G.; ALI, M. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021.
- ANSARI, K.; BAE, T. S.; LEE, J. Spatiotemporal variability of total cloud cover measured by visual observation stations and their comparison with ERA5 reanalysis over South Korea. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E1757-E1774, 2020.
- ARTAXO, P.; MAENHAUT, W.; STORMS, H.; VAN GRIEKEN, R. Aerosol characteristics and sources for the Amazon Basin during the wet season. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16971-16985, 1990.
- BAIS, A. F. ; TOURPALI, K.; KAZANTZIDIS, A.; AKIYOSHI, H.; BEKKI, S.; BRAESICKE, P.; CHIPPERFIELD, M. P.; DAMERIS, M.; EYRING, V.; GARNY, H.; IACHETTI, D.; JÖCKEL, P.; KUBIN, A.; LANGEMATZ, U.; MANCINI, E.; MICHOU, M.; MORGENSTERN, O.; NAKAMURA, T.; NEWMAN, P. A.; PITARI, G.; PLUMMER, D. A.; ROZANOV, E.; SHEPHERD, T. G. ; SHIBATA, K.; TIAN, W.; YAMASHITA, Y. Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 15, p. 7533-7545, 2011.
- BAIS, A. F.; MCKENZIE, R. L.; BERNHARD, G.; AUCAMP, P. J.; ILYAS, M.; MADRONICH, S.; TOURPALI, K. Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 14, n. 1, p. 19-52, 2015.
- BAIS, A. F.; BERNHARD, G.; MCKENZIE, R. L.; AUCAMP, P. J.; YOUNG, P. J.; ILYAS, M.; JÖCKEL, P.; DEUSHI, M. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 18, n. 3, p. 602-640, 2019.
- BARJA, B.; ANTUÑA, J. C. The effect of optically thin cirrus clouds on solar radiation in Camagüey, Cuba. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 16, p. 8625-8634, 2011.
- BELLOUIN, N.; QUAAS, J.; GRYSPEERDT, E.; KINNE, S.; STIER, P.; WATSON-PARRIS, D.; BOUCHER, O.; CARSLAW, K. S.; CHRISTENSEN, M.; DANIAU, A.-L.; DUFRESNE, J.-L.; FEINGOLD, G.; FIEDLER, S.; FORSTER, P.; GETTELMAN, A.;

HAYWOOD, J. M.; LOHMANN, U.; MALAVELLE, F.; MAURITSEN, T.; MCCOY, D. T.; MYHRE, G.; MÜLMENSTÄDT, J.; NEUBAUER, D.; POSSNER, A.; RUGENSTEIN, M.; SATO, Y.; SCHULZ, M.; SCHWARTZ, S. E.; SOURDEVAL, O.; STORELVMO, T.; TOLL, V.; WINKER D.; STEVENS, B. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2019RG000660, 2020.

BENTZEN, J.; KJELLBERG, J.; THORGAARD, C.; ENGHOLM, G.; PHILLIP, A.; STORM, H. H. Costs of illness for melanoma and nonmelanoma skin cancer in Denmark. **European Journal of Cancer Prevention**, v. 22, n. 6, p. 569-576, 2013.

BERNARD, J. J.; GALLO, R. L.; KRUTMANN, J. Photoimmunology: how ultraviolet radiation affects the immune system. **Nature Reviews Immunology**, v. 19, n. 11, p. 688-701, 2019.

BHATTARAI, B. K.; KJELDSTAD, B.; THORSETH, T. M. Assessment of erythemal UV level in Nepal based on solar UV estimates from total ozone mapping spectrometer. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 28, p. 789-796, 2011.

BOSILOVICH, M. G.; LUCCHESI, R.; SUAREZ, M. **GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), MERRA-2: File Specification**. 2016. Disponível em: http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes. Acesso em: 28 jul. 2022.

BOUCHER, O. Atmospheric Aerosols. In: **Atmospheric Aerosols**. Springer, Dordrecht, 2015. p. 9-24.

BOUCHER, O.; DENVIL, S.; LEVAVASSEUR, G.; COZIC, A.; CAUBEL, A.; FOUJOLS, M. A.; MEURDESOF, Y.; CADULE, P.; DEVILLIERS, M.; GHATTAS, J.; LEBAS, N.; LURTON, T.; MELLUL, L.; MUSAT, I.; MIGNOT, J.; CHERUY, F. **IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20180803. Earth System Grid Federation. 2018. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5195>.

BOUCHER, O.; DENVIL, S.; LEVAVASSEUR, G.; COZIC, A.; CAUBEL, A.; FOUJOLS, M. A.; MEURDESOF, Y.; CADULE, P.; DEVILLIERS, M.; DUPONT, E.; LURTON, T. **IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20190903. Earth System Grid Federation. 2019. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1532>.

BOWERS, J. M.; HAMILTON, J. G.; LOBEL, M.; KANETSKY, P. A.; HAY, J. Sun exposure, tanning behaviors, and sunburn: Examining activities associated with harmful ultraviolet radiation exposures in college students. **The Journal of Primary Prevention**, v. 42, n. 5, p. 425-440, 2021.

BRAUN, H. A.; ADLER, C. H.; GOODMAN, M.; YEUNG, H. Sunburn frequency and risk and protective factors: a cross-sectional survey. **Dermatology Online Journal**, v. 27, n. 4, 2021.

BOGDANOV, I.; CHERKEZOV, D.; VELEV, S.; DARLENSKI, R. UV Radiation Exposure of Outdoor Workers in Antarctica. **Photochemistry and Photobiology**, 2022.

CDC. Centers for Disease Control and Prevention. Sunburn and sun protective behaviors among adults aged 18-29 years--United States, 2000-2010. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, v. 61, n. 18, p. 317-322, 2012.

CEPPI, P.; HARTMANN, D. L. Connections between clouds, radiation, and midlatitude dynamics: A review. *Current Climate Change Reports*, v. 1, n. 2, p. 94-102, 2015.

CEPPI, P.; BRIENT, F.; ZELINKA, M. D.; HARTMANN, D. L. Cloud feedback mechanisms and their representation in global climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 8, n. 4, p. e465, 2017.

CHANG, E. K.; MA, C. G.; ZHENG, C.; YAU, A. M. Observed and projected decrease in Northern Hemisphere extratropical cyclone activity in summer and its impacts on maximum temperature. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 5, p. 2200-2208, 2016.

CHAPMAN, S.; MARKS, R.; KING, M. Trends in tans and skin protection in Australian fashion magazines, 1982 through 1991. *American Journal of Public Health*, v. 82, n. 12, p. 1677-1680, 1992.

CHEN, A.; ZHAO, C.; FAN, T. Spatio-temporal distribution of aerosol direct radiative forcing over mid-latitude regions in north hemisphere estimated from satellite observations. *Atmospheric Research*, v. 266, p. 105938, 2022.

CHERIAN, R.; QUAAS, J. Trends in AOD, clouds, and cloud radiative effects in satellite data and CMIP5 and CMIP6 model simulations over aerosol source regions. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 9, p. e2020GL087132, 2020.

CHERNOKULSKY, A.; ESAU, I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012. *International Journal of Climatology*, v. 39, n. 15, p. 5771-5790, 2019.

CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. Action spectrum for the production of previtamin-D3 in human skin, *CIE Technical Report TC 6-54*, Commission Internationale de l'Eclairage, 2006.

COARITI, J. R.; FERNANDEZ, J. H.; SPYRIDES, M. H. C.; CORRÊA, M. P.; LEME, N. P.; PEDRA, G. U.; FAUSTINO, A. B. Radiação solar ultravioleta e fotodermatoses em La Paz–Bolívia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 2, p. 371-380, 2017.

CORRÊA, M. P.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAEFFELIN, M.; BEKKI, S.; SAIAG, P.; BADOSA, J.; PAZMIÑO, A.; MAHÉ, E. Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. *Photochemical & Photobiological Sciences*, v. 12, n. 6, p. 1053-1064, 2013.

CORRÊA, M. P. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, v. 90, p. 297-313, 2015.

CORRÊA, M. P.; YAMAMOTO, A. L. C.; MORAES, G. R.; GODIN-BEEKMANN, S.; MAHÉ, E. Changes in the total ozone content over the period 2006 to 2100 and the effects on the erythemal and vitamin D effective UV doses for South America and Antarctica. *Photochemical & Photobiological Sciences*, v. 18, p. 2931-2941, 2019.

CORRÊA, M. P.; MARTINS, F. B.; YAMAMOTO, A. L. C.; PAIVA, N. B.; SILVA, L. F.; SOUZA, R. J. S. A. P. D.; MELO, M. M.; RIBEIRO, C. S. S. Lack of Knowledge and Misperceptions on Photoprotection among Brazilian Youngsters. **Dermato**, v. 3, n. 1, p. 1-12, 2022.

CORRÊA, M. P. UVBoost: an erythema weighted ultraviolet radiation estimator based on a machine learning gradient boosting algorithm. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 298, p. 108490, 2023.

CRUTZEN, P. J. Tropospheric Ozone: An Overview. *In*: Isaksen, I. S. A. (eds). **Tropospheric Ozone**. Dordrecht: Springer, 1988, p. 3-32.

DANABASOGLU, G. **NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20190912. Earth System Grid Federation. 2019a. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10071>.

DANABASOGLU, G. **NCAR CESM2-WACCM model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20200702. Earth System Grid Federation. 2019b. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10026>.

DHAGE, L.; WIDLANSKY, M. J. Assessment of 21st century changing sea surface temperature, rainfall, and sea surface height patterns in the tropical Pacific Islands using CMIP6 greenhouse warming projections. **Earth's Future**, v. 10, n. 4, p. e2021EF002524, 2022.

DIFFEY, B. Climate change, ozone depletion and the impact on ultraviolet exposure of human skin. **Physics in Medicine & Biology**, v. 49, n. 1, p. R1, 2003.

DOHERTY, R. M. Ozone pollution from near and far. *Nature Geoscience*, v. 8, n. 9, p. 664-665, 2015.

DORAN, C. M.; LING, R.; BYRNES, J.; CRANE, M.; SEARLES, A.; PEREZ, D.; SHAKESHAFT, A. Estimating the economic costs of skin cancer in New South Wales, Australia. **BMC Public Health**, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2015.

DOU, C.; JI, Z.; XIAO, Y.; HU, Z.; ZHU, X.; DONG, W. Projection of Air Pollution in Northern China in the Two RCPs Scenarios. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3064, 2021.

DRUGÉ, T.; NABAT, P.; MALLET, M.; SOMOT, S. Future evolution of aerosols and implications for climate change in the Euro-Mediterranean region using the CNRM-ALADIN63 regional climate model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 10, p. 7639-7669, 2021.

ECMWF. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. **ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)**. 2022. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>. Acesso em: 27 jul. 2022.

ENGELSEN, O. The relationship between ultraviolet radiation exposure and vitamin D status. **Nutrients**, v. 2, n. 5, p. 482-495, 2010.

ENRIQUEZ-ALONSO, A.; SANCHEZ-LORENZO, A.; CALBÓ, J.; GONZÁLEZ, J. A.; NORRIS, J. R. Cloud cover climatologies in the Mediterranean obtained from satellites, surface observations, reanalyses, and CMIP5 simulations: validation and future scenarios. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 1, p. 249-269, 2016.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FAHAD, A.; BURLS, N. J.; STRASBERG, Z. How will southern hemisphere subtropical anticyclones respond to global warming? Mechanisms and seasonality in CMIP5 and CMIP6 model projections. **Climate dynamics**, v. 55, p. 703-718, 2020.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, v. 315, n. 6016, p. 207-210, 1985.

FAUR, C. I.; MOLDOVAN, M. A.; VĂLEANU, M.; ROTAR, H.; FILIP, L.; ROMAN, R. C. The Prevalence and Treatment Costs of Non-Melanoma Skin Cancer in Cluj-Napoca Maxillofacial Center. **Medicina**, v. 59, n. 2, p. 220, 2023.

FEISTER, U.; CABROL, N.; HÄDER, D. UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. **Atmosphere**, v. 6, n. 8, p. 1211-1228, 2015.

FITZPATRICK, T. The validity and practicality of sun reactive skin types I through VI. **Archives of Dermatology**, v. 124, n. 6, p. 869-871, 1988.

FLATO, G.; MAROTZKE, J.; ABIODUN, B.; BRACONNOT, P.; CHOU, S. C.; COLLINS, W.; COX, P.; DRIOUECH, F.; EMORI, S.; EYRING, V.; FOREST, C.; GLECKLER, P.; GUILYARDI, E.; JAKOB, C.; KATTSOV, V.; REASON, C.; RUMMUKAINEN, M. *Evaluation of climate models. In: Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2014. p. 741-866.

FÖCKER, M.; ANTEL, J.; RING, S.; HAHN, D.; KANAL, Ö.; ÖZTÜRK, D.; HEBEBRAND, J.; LIBUDA, L. Vitamin D and mental health in children and adolescents. **European Child & Adolescent Psychiatry**, v. 26, p. 1043-1066, 2017.

FOUNTOULAKIS, I.; BAIS, A. F. Projected changes in erythemal and vitamin D effective irradiance over northern-hemisphere high latitudes. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 14, n. 7, p. 1251-1264, 2015.

FRANSEN, M., KARAHALIOS, A.; SHARMA, N.; ENGLISH D. R.; GILES, G. G.; SINCLAIR, R. D. Non-melanoma skin cancer in Australia. **The Medical Journal of Australia**, v. 197, n. 10, p. 565-568, 2012.

FU, Q.; SMITH, M.; YANG, Q. The impact of cloud radiative effects on the tropical tropopause layer temperatures. **Atmosphere**, v. 9, n. 10, p. 377, 2018.

GETTELMAN, A.; SHERWOOD, S. C. Processes responsible for cloud feedback. *Current Climate Change Reports*, v. 2, n. 4, p. 179-189, 2016.

GIES, P.; ROY, C.; JAVORNICZKY, J.; HENDERSON, S.; LEMUS-DESCHAMPS, L.; DRISCOLL, C. Global solar UV index: Australian measurements, forecasts and comparison with the UK. *Photochemistry and Photobiology*, v. 79, n. 1, p. 32-39, 2004.

GŁĄBSKA, D.; KOŁOTA, A.; LACHOWICZ, K.; SKOLMOWSKA, D.; STACHOŃ, M.; GUZEK, D. The influence of vitamin D intake and status on mental health in children: a systematic review. *Nutrients*, v. 13, n. 3, p. 952, 2021.

GREWE, V. The origin of ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 6, n. 6, p. 1495-1511, 2006.

GUO, Y.-P.; LI, J.-P.; FENG, J.. Climatology and interannual variability of the annual mean Hadley circulation in CMIP5 models. *Advances in Climate Change Research*, v. 7, n. 1-2, p. 35-45, 2016.

GUY JR, G. P.; MACHLIN, S. R.; EKWUEME, D. U.; YABROFF, K. R. Prevalence and costs of skin cancer treatment in the US, 2002– 2006 and 2007– 2011. *American Journal of Preventive Medicine*, v. 48, n. 2, p. 183-187, 2015.

HARRISON, G. I.; YOUNG, A. R. Ultraviolet radiation-induced erythema in human skin. *Methods*, v. 28, n. 1, p. 14-19, 2002.

HOLICK, M. F. Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, v. 80, n. 6, p. 1678S-1688S, 2004.

HOLICK, M. F.; CHEN, T. C.; LU, Z.; SAUTER, E. Vitamin D and skin physiology: AD-lightful story. *Journal of Bone and Mineral Research*, v. 22, n. S2, p. V28-V33, 2007.

HOLICK, M. F. Sunlight, UV-Radiation, Vitamin D and Skin Cancer: How Much Sunlight Do We Need? *In: Reichrath, J. (eds). Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer. Advances in Experimental Medicine and Biology*. New York: Springer, v. 624, 2008.

HU, W.; FANG, L.; NI, R.; ZHANG, H.; PAN, G. Changing trends in the disease burden of non-melanoma skin cancer globally from 1990 to 2019 and its predicted level in 25 years. *BMC Cancer*, v. 22, n. 1, p. 836, 2022.

ICNIRP. International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelength between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, v.87, p.171-186, 2004.

IKINO, J. K.; NUNES, D. H.; SILVA, V. P. M. D.; FRÖDE, T. S.; SENS, M. M. Melasma and assessment of the quality of life in Brazilian women. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, v. 90, p. 196-200, 2015.

INCA. Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. **Estimativa 2020: incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: INCA, 180 p, 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 2021.

JOHN, J. G.; BLANTON, C.; MCHUGH, C.; RADHAKRISHNAN, A.; RAND, K.; VAHLENKAMP, H.; WILSON, C.; ZADEH, N. T.; DUNNE, J. P.; DUSSIN, R.; HOROWITZ, L. W.; KRASTING, J. P.; LIN, P.; MALYSHEV, S.; NAIK, V.; PLOSHAY, J.; SHEVLIAKOVA, E.; SILVERS, L.; STOCK, C.; WINTON, M.; ZENG, Y. **NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20180701. Earth System Grid Federation. 2018. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1414>.

JUNGCLAUS, J.; BITTNER, M.; WIENERS, K. H.; WACHSMANN, F.; SCHUPFNER, M.; LEGUTKE, S.; GIORGETTA, M.; REICK, C.; GAYLER, V.; HAAK, H.; DE VRESE, P.; RADDATZ, T.; ESCH, M.; MAURITSEN, T.; VON STORCH, J. S.; BEHRENS, J.; BROVKIN, V.; CLAUSSEN, M.; CRUEGER, T.; FAST, I.; FIEDLER, S.; HAGEMANN, S.; HOHENEGGER, C.; JAHNS, T.; KLOSTER, S.; KINNE, S.; LASSLOP, G.; KORNBLUEH, L.; MAROTZKE, J.; MATEI, D.; MERANER, K.; MIKOLAJEWICZ, U.; MODALI, K.; MÜLLER, W.; NABEL, J.; NOTZ, D.; PETERS, K.; PINCUS, R.; POHLMANN, H.; PONGRATZ, J.; RAST, S.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SCHULZWEIDA, U.; SIX, K.; STEVENS, B.; VOIGT, A.; ROECKNER, E. **MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20190710. Earth System Grid Federation. 2019. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6594>.

KAWAI, H.; YUKIMOTO, S.; KOSHIRO, T.; OSHIMA, N.; TANAKA, T.; YOSHIMURA, H.; NAGASAWA, R. Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 2875-2897, 2019.

KEEBLE, J.; HASSLER, B.; BANERJEE, A.; CHECA-GARCIA, R.; CHIODO, G.; DAVIS, S.; EYRING, V.; GRIFFITHS, P. T.; MORGENSTERN, O.; NOWACK, P.; ZENG, G.; ZHANG, J.; BODEKER, G.; BURROWS, S.; CAMERON-SMITH, P.; CUGNET, D.; DANEK, C.; DEUSHI, M.; HOROWITZ, L. W.; KUBIN, A.; LI, L.; LOHMANN, G.; MICHOU, M.; MILLS, M. J.; NABAT, P.; OLIVIÉ, D.; PARK, S.; SELAND, Ø.; STOLL, J.; WIENERS, K.-H.; WU, T. Evaluating stratospheric ozone and water vapour changes in CMIP6 models from 1850 to 2100. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 6, p. 5015-5061, 2021.

KEISER, E.; LINOS, E.; KANZLER, M.; LEE, W.; SAINANI, K. L.; TANG, J. Y. Reliability and prevalence of digital image skin types in the United States: results from National Health and Nutrition Examination Survey 2003-2004. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 66, n. 1, p. 163-165, 2012.

KIMLIN, M. G. Geographic location and vitamin D synthesis. **Molecular aspects of Medicine**, v. 29, n. 6, p. 453-461, 2008.

KRASTING, J. P.; JOHN, J. G.; BLANTON, C.; MCHUGH, C.; NIKONOV, S.; RADHAKRISHNAN, A.; RAND, K.; ZADEH, N. T.; BALAJI, V.; DURACHTA, J.; DUPUIS, C.; MENZEL, R.; ROBINSON, T.; UNDERWOOD, S.; VAHLENKAMP, H.; DUNNE, K. A.; GAUTHIER, P. P. G.; GINOUX, P.; GRIFFIES, S. M.; HALLBERG, R.; HARRISON, M.; HURLIN, W.; MALYSHEV, S.; NAIK, V.; PAULOT, F.; PAYNTER, D. J.; PLOSHAY, J.; REICHL, B. G.; SCHWARZKOPF, D. M.; SEMAN, C. J.; SILVERS, L.; WYMAN, B.; ZENG, Y.; ADCROFT, A.; DUNNE, J. P.; DUSSIN, R.; GUO, H.; HE, J.; HELD, I. M.; HOROWITZ, L. W.; LIN, PU.; MILLY, P. C. D.; SHEVLIAKOVA, E.; STOCK, C.; WINTON, M.; WITTENBERG, A. T.; XIE, Y.; ZHAO, M. **NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20190726. Earth System Grid Federation. 2018. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8597>.

KRUPA, S. V.; MANNING, W. J. Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. **Environmental Pollution**, v. 50, n. 1-2, p. 101-137, 1988.

KRUTMANN, J.; BOULOC, A.; SORE, G.; BERNARD, B. A.; PASSERON, T. The skin aging exposome. **Journal of dermatological science**, v. 85, n. 3, p. 152-161, 2017.

KUTTIPPURATH, J.; LEFÈVRE, F.; POMMEREAU, J. P.; ROSCOE, H. K.; GOUTAIL, F.; PAZMINO, A.; SHANKLIN, J. D. Antarctic ozone loss in 1979–2010: first sign of ozone recovery. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 3, p. 1625-1635, 2013.

KYLLING, A.; DAHLBACK, A.; MAYER, B. The effect of clouds and surface albedo on UV irradiances at a high latitude site. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 9, p. 1411-1414, 2000.

LACHLAN-COPE, T. Antarctic clouds. **Polar Research**, v. 29, n. 2, p. 150–158, 2010.

LADIZESKY, M.; LU, Z.; OLIVERI, B.; ROMAN, N. S.; DIAZ, S.; HOLICK, M. F.; MAUTALEN, C. Solar ultraviolet B radiation and photoproduction of vitamin D3 in central and southern areas of Argentina. **Journal of Bone and Mineral Research**, v. 10, n. 4, p. 545-549, 1995.

LAMY, K.; PORTAFAIX, T.; JOSSE, B.; BROGNIEZ, C.; GODIN-BEEKMANN, S.; BENCHERIF, H.; REVELL, L.; AKIYOSHI, H.; BEKKI, S.; HEGGLIN, M. I.; JÖCKEL, P.; KIRNER, O.; LILEY, B.; MARECAL, V.; MORGENSTERN, O.; STENKE, A.; ZENG, G.; ABRAHAM, N. L.; ARCHIBALD, A. T.; BUTCHART, N.; CHIPPERFIELD, M. P.; DI GENOVA, G.; DEUSHI, M.; DHOMSE, S.S.; HU, R.-M.; KINNISON, D.; KOTKAMP, M.; MCKENZIE, R.; MICHOU, M.; O'CONNOR, F. M.; OMAN, L.D.; PITARI, G.; PLUMMER, D. A.; PYLE, J. A.; ROZANOV, E.; SAINT-MARTIN, D.; SUDO, K.; TANAKA, T. Y.; VISIONI, D.; YOSHIDA, K. Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 15, p. 10087-10110, 2019.

LANGEMATZ, U. Future ozone in a changing climate. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 7, p. 403-409, 2018.

LANGEMATZ, U. Stratospheric ozone: down and up through the anthropocene. **ChemTexts**, v. 5, p. 1-12, 2019.

LAUER, A.; BOCK, L.; HASSLER, B.; SCHRÖDER, M.; STENGEL, M. Cloud Climatologies from Global Climate Models—A Comparison of CMIP5 and CMIP6 Models with Satellite Data. **Journal of Climate**, v. 36, n. 2, p. 281-311, 2023.

LI, R.; MA, X.; XIONG, F.; JIA, H.; SHA, T.; TIAN, R. Comparisons and evaluation of aerosol burden and optical depth in CMIP5 simulations over East Asia. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 206, p. 105315, 2020.

LIU, K.-N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. San Diego: California: Academic Press, 2002.

LIPPMANN, M. Health effects of tropospheric ozone. *Environmental Science & Technology*, v. 25, n. 12, p. 1954-1962, 1991.

LIU, W.; LAI, W.; WANG, X. M.; LI, L.; TIAN, Y.; LU, Y.; WU, Y. Y.; LI, Y.; ZHANG, P.; WU, Y.; CHEN, L. Skin phototyping in a Chinese female population: analysis of four hundred and four cases from four major cities of China. **Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine**, v. 22, n. 4, p. 184-188, 2006.

LOMAS, A. L. B. J.; LEONARDI-BEE, J.; BATH-HEXTALL, F. A systematic review of worldwide incidence of nonmelanoma skin cancer. **British Journal of Dermatology**, v. 166, n. 5, p. 1069-1080, 2012.

LUCAS, R. M.; YAZAR, S.; YOUNG, A. R.; NORVAL, M.; DE GRUIJL, F. R.; TAKIZAWA, Y.; RHODES, L. E.; SINCLAIR, C. A.; NEALE, R. E. Human health in relation to exposure to solar ultraviolet radiation under changing stratospheric ozone and climate. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 18, n. 3, p. 641-680, 2019.

LUCCINI, E.; CEDE, A.; PIACENTINI, R.; VILLANUEVA, C.; CANZIANI. Ultraviolet climatology over Argentina. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D17, 2006.

LUO, Y.; ZHENG, X.; ZHAO, T.; CHEN, J. A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 863-870, 2014.

MADELEINE, J.-B.; HOURDIN, F.; GRANDPEIX, J.-Y.; RIO, C.; DUFRESNE, J.-L.; VIGNON, E.; BOUCHER, O.; KONSTA, D.; CHERUY, F.; MUSAT, I.; IDELKADI, A.; FAIRHEAD, L.; MILLOUR, E.; LEFEBVRE, M.-P.; MELLUL, L.; ROCHETIN, N.; LEMONNIER, F.; TOUZÉ-PEIFFER, L.; BONAZZOLA, M. Improved representation of clouds in the atmospheric component LMDZ6A of the IPSL-CM6A Earth system model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 10, p. e2020MS002046, 2020.

MÄDER, J. A.; STAEHELIN, J.; PETER, T.; BRUNNER, D.; RIEDER, H. E.; STAHEL, W. A. Evidence for the effectiveness of the Montreal Protocol to protect the ozone layer. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 24, p. 12161-12171, 2010.

MAMALAKIS, A.; RANDERSON, J. T.; YU, J. Y.; PRITCHARD, M. S.; MAGNUSDOTTIR, G.; SMYTH, P.; LEVINE, P. A.; YU, S.; FOUFOULA-GEORGIU, E.

Zonally contrasting shifts of the tropical rain belt in response to climate change. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 2, p. 143-151, 2021.

MARTIN, J. M.; GHAFERI, J. M.; CUMMINS, D. L.; MAMELAK, A. J.; SCHMULTS, C. D.; PARIKH, M.; SPEYER, L.-A.; CHUANG, A.; RICHARDSON, H. V.; STEIN, D.; LIÉGEOIS, A. J. Changes in skin tanning attitudes fashion articles and advertisements in the early 20th Century. **American Journal of Public Health**, v. 99, n. 12, p. 2140-2146, 2009.

MARTIN, S. T.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BAUMGARDNER, D.; CHEN, Q.; GOLDSTEIN, A. H.; GUENTHER, A.; HEALD, C.; MAYOL-BRACERO, O. L.; MCMURRY, P. H.; PAULIQUEVIS, T.; PÖSCHL, U.; PRATHER, K., A.; ROBERTS, G., C.; SALESKA, S. R.; DIAS, M. A. S.; SPRACKLEN, D., V.; SWIETLICKI, E.; TREBS, I. Sources and properties of Amazonian aerosol particles. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 2, 2010.

McKENZIE, R. L.; LILEY, J. B.; BJÖRN, L. O. UV radiation: balancing risks and benefits. **Photochemistry and photobiology**, v. 85, n. 1, p. 88-98, 2009.

McKENZIE, R.; BERNHARD, G.; LILEY, B.; DISTERHOFT, P.; RHODES, S.; BAIS, A.; MORGENSTERN, O.; NEWMAN, P.; OMAN, L.; BROGNIEZ, C.; SIMIC, S. Success of Montreal Protocol demonstrated by comparing high-quality UV measurements with “World Avoided” calculations from two chemistry-climate models. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 12332, 2019.

McKINLAY, A. F.; DIFFEY, B. L. **A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin**, in Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations, W. R. Passchier and B. F. M. Bosnjakovic, (eds.), Elsevier, Amsterdam, 1987.

MEUL, S.; DAMERIS, M.; LANGEMATZ, U.; ABALICHIN, J.; KERSCHBAUMER, A.; KUBIN, A.; OBERLÄNDER-HAYN, S. Impact of rising greenhouse gas concentrations on future tropical ozone and UV exposure. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 6, p. 2919-2927, 2016.

MICHOU, M.; NABAT, P.; SAINT-MARTIN, D.; BOCK, J.; DECHARME, B.; MALLET, M.; ROHRIG, R.; SÉFÉRIAN, R.; SÉNÉSI, S.; VOLDOIRE, A. Present-day and historical aerosol and ozone characteristics in CNRM CMIP6 simulations. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 1, p. e2019MS001816, 2019.

MISRA, A.; KANAWADE, V. P.; TRIPATHI, S. N. Quantitative assessment of AOD from 17 CMIP5 models based on satellite-derived AOD over India. **Annales Geophysicae**, v. 34, n. 8, p. 657–671, 2016.

MOLDOVAN H. R.; WITTLICH, M.; JOHN, S. M.; BRANS, R.; TIPLICA, G. S.; SALAVASTRU, C.; VOIDAZAN, S. T.; DUCA, R. C.; FUGULYAN, E.; HORVATH, G.; ALEXA, A.; BUTACU, A. I. Exposure to solar UV radiation in outdoor construction workers using personal dosimetry. **Environmental Research**, v. 181, p. 108967, 2020.

NAUD, C. M.; BOOTH, J. F.; JEYARATNAM, J.; DONNER, L. J.; SEMAN, C. J.; ZHAO, M.; GUO, H.; MING, Y. Extratropical Cyclone Clouds in the GFDL Climate Model:

Diagnosing Biases and the Associated Causes. **Journal of Climate**, v. 32, n. 20, p. 6685–6701, 2019.

NEALE, R. E.; BARNES, P. W.; ROBSON, T. M.; NEALE, P. J.; WILLIAMSON, C. E.; ZEPP, R. G.; WILSON, S. R.; MADRONICH, S.; ANDRADY, A. L.; HEIKKILÄ, A. M.; BERNHARD, G. H.; BAIS, A. F.; AUCAMP, P. J.; BANASZAK, A. T.; BORNMAN, J. F.; BRUCKMAN, L. S.; BYRNE, S. N.; FOEREID, B.; HÄDER, D.-P.; HOLLESTEIN, L. M.; HOU, W.-C.; HYLANDER, S.; JANSEN, M. A. K.; KLEKOCIUK, A. R.; LILEY, J. B.; LONGSTRETH, J.; LUCAS, R. M.; MARTINEZ-ABAIGAR, J.; MCNEILL, K.; OLSEN, C. M.; PANDEY, K. K.; RHODES, L. E.; ROBINSON, S. A.; ROSE, K. C.; SCHIKOWSKI, T.; SOLOMON, K. R.; SULZBERGER, B.; UKPEBOR, J. E.; WANG, Q.-W.; WÄNGBERG, S.-Å.; WHITE, C. C.; YAZAR, S.; YOUNG, A. R.; YOUNG, P. J.; ZHU, L.; ZHU, M. Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2020. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 20, n. 1, p. 1-67, 2021.

NEWMAN, P. A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole. **The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry**, v. 190, p. 157-171, 2010.

NEWMAN, P. A.; MCKENZIE, R. UV impacts avoided by the Montreal Protocol. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 10, n. 7, p. 1152-1160, 2011.

NORVAL, M.; LUCAS, R. M.; CULLEN, A. P.; DE GRUIJL, F. R.; LONGSTRETH, J.; TAKIZAWA, Y.; VAN DER LEUN, J. C. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 10, n. 2, p. 199-225, 2011.

NOVAKOV, T.; PENNER, J. E. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations. **Nature**, v. 365, n. 6449, p. 823-826, 1993.

OLIVERI, B.; PLANTALECH, L.; BAGUR, A.; WITTICH, A. C.; ROVAI, G.; PUSIOL, E.; GIOVANELLI, J. L.; PONCE, G.; NIEVA, A.; CHAPERÓN, A.; LADIZESKY, M.; SOMOZA, J.; CASCO, C.; ZENI, S.; PARISI, M. S.; MAUTALEN, C. A. High prevalence of vitamin D insufficiency in healthy elderly people living at home in Argentina. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 58, n. 2, p. 337-342, 2004.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; EBI, K. L.; KEMP-BENEDICT, E.; RIAHI, K.; ROTHMAN, D. S.; VAN RUIJVEN, B. J.; VAN VUUREN, D. P.; BIRKMANN, J.; KOK, K.; LEVY, M.; SOLECKI, W. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

PAULOT, F.; PAYNTER, D.; GINOUX, P.; NAIK, V.; HOROWITZ, L. W. Changes in the aerosol direct radiative forcing from 2001 to 2015: observational constraints and regional mechanisms. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 17, p. 13265-13281, 2018.

PETER, T. The stratospheric ozone layer—an overview. **Environmental Pollution**, v. 83, n. 1-2, p. 69-79, 1994.

PFEIFER, G. P.; BESARATINIA, A. UV wavelength-dependent DNA damage and human non-melanoma and melanoma skin cancer. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 11, n. 1, p. 90-97, 2012.

PRATHER, M. J.; WATSON, R. T. Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine. **Nature**, v. 344, n. 6268, p. 729-734, 1990.

RAMANATHAN, V.; CHUNG, C.; KIM, D.; BETTGE, T.; BUJA, L.; KIEHL, J. T.; WASHINGTON, W. M.; FU, Q.; SIKKA, D. R.; WILD, M. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 15, p. 5326-5333, 2005.

RAMOS, P. CAÑETE, F.; DULLAK, R.; BOLLA, L.; CENTURIÓN, N.; CENTURIÓN, A.; CHAMORRO, S.; CHAPARRO, A.; CHAVES, F. Epidemiología del cáncer de piel en pacientes atendidos en la Cátedra de Dermatología de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay (2008-2011). **Anales de la Facultad de Ciencias Médicas (Asunción)**, v. 45, n. 2, p. 49-70, 2012.

RASS, K.; REICHRATH, J. UV damage and DNA repair in malignant melanoma and nonmelanoma skin cancer. **Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer**, p. 162-178, 2008.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. D.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPERNÖDER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; LUDERER, G.; HARMSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

ROBINSON, S. A.; ERICKSON III, D. J. Not just about sunburn—the ozone hole's profound effect on climate has significant implications for Southern Hemisphere ecosystems. **Global Change Biology**, v. 21, n. 2, p. 515-527, 2015.

RUDOLPH, C.; SCHNOOR, M.; EISEMANN, N.; KATALINIC, A. Incidence trends of nonmelanoma skin cancer in Germany from 1998 to 2010. **JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft**, v. 13, n. 8, p. 788-797, 2015.

SACHDEVA, S. Fitzpatrick skin typing: Applications in dermatology. **Indian Journal of dermatology, Venereology and Leprology**, v. 75, p. 93, 2009.

SALAS, L. F. S.; ROJAS, J. L. F.; PEREIRA FILHO, A. J.; KARAM, H. A. Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0 S). **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 16, p. 954-971, 2017.

SALAWITCH, R.; FAHEY, D. W.; HEGGLIN, M. I.; MCBRIDE, L. A.; TRIBETT, W. R.; DOHERTY, S. J. **Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update**. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, 84 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2019. Disponível em: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/downloads/twentyquestions.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

SARKAR, S.; GADDAMEEDHI, S. UV-B-induced erythema in human skin: the circadian clock is ticking. **Journal of Investigative Dermatology**, v. 138, n. 2, p. 248-251, 2018.

SCHUPFNER, M.; WIENERS, K. H.; WACHSMANN, F.; STEGER, C.; BITTNER, M.; JUNGCLAUS, J.; FRÜH, B.; PANKATZ, K.; GIORGETTA, M.; REICK, C.; LEGUTKE, S.; ESCH, M.; GAYLER, V.; HAAK, H.; DE VRESE, P.; RADDATZ, T.; MAURITSEN, T.; VON STORCH, J. S.; BEHRENS, J.; BROVKIN, V.; CLAUSSEN, M.; CRUEGER, T.; FAST, I.; FIEDLER, S.; HAGEMANN, S.; HOHENEGGER, C.; JAHNS, T.; KLOSTER, S.; KINNE, S.; LASSLOP, G.; KORNBLUEH, L.; MAROTZKE, J.; MATEI, D.; MERANER, K.; MIKOLAJEWICZ, U.; MODALI, K.; MÜLLER, W.; NABEL, J.; NOTZ, D.; PETERS, K.; PINCUS, R.; POHLMANN, H.; PONGRATZ, J.; RAST, S.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SCHULZWEIDA, U.; SIX, K.; STEVENS, B.; VOIGT, A.; ROECKNER, E. **DKRZ MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20190710. Earth System Grid Federation. 2019. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2450>.

SENA, E. T.; DIAS, M. S.; CARVALHO, L. M. V.; DIAS, P. S. Reduced wet-season length detected by satellite retrievals of cloudiness over Brazilian Amazonia: a new methodology. **Journal of Climate**, v. 31, n. 24, p. 9941-9964, 2018.

SERRANO, M. A.; CAÑADA, J.; MORENO, J. C.; GURREA, G. Solar ultraviolet doses and vitamin D in a northern mid-latitude. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 744-750, 2017.

SHANG, L.; LUO, J.; WANG, C. Ozone variation trends under different CMIP6 scenarios. **Atmosphere**, v. 12, n. 1, p. 112, 2021.

SIDDAWAY, J. M.; PETELINA, S. V.; KAROLY, D. J.; KLEKOCIUK, A. R.; DARGAVILLE, R. J. Evolution of Antarctic ozone in September–December predicted by CCMVal-2 model simulations for the 21st century. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 8, p. 4413-4427, 2013.

SOLOMON, S. The hole truth. **Nature**, v. 427, n. 6972, p. 289–291, 2004.

SOLOMON, S.; PORTMANN, R. W.; THOMPSON, D. W. J. Contrasts between Antarctic and Arctic ozone depletion. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 2, p. 445-449, 2007.

STAEHELIN, J.; HARRIS, N. R.; APPENZELLER, C.; EBERHARD, J. Ozone trends: A review. **Reviews of Geophysics**, v. 39, n. 2, p. 231-290, 2001.

STANG, A.; STAUSBERG, J.; BOEDEKER, W.; KEREK-BODDEN, H.; JÖCKEL, K. H. Nationwide hospitalization costs of skin melanoma and non-melanoma skin cancer in Germany. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 22, n. 1, p. 65-72, 2008.

STEPHENS, G. L.; L'ECUYER, T. The Earth's energy balance. **Atmospheric Research**, v. 166, p. 195-203, 2015.

SUBBA, T.; GOGOI, M. M.; PATHAK, B.; BHUYAN, P. K.; BABU, S. S. Recent trend in the global distribution of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements. **Atmospheric Science Letters**, v. 21, n. 11, p. e975, 2020.

TORRES, O.; BHARTIA, P. K.; HERMAN, J. R.; SINYUK, A.; GINOUX, P.; HOLBEN, B. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, n.3, p. 398-413, 2002.

TOURPALI, K.; BAIS, A. F.; KAZANTZIDIS, A.; ZEREFOS, C. S.; AKIYOSHI, H.; AUSTIN, J.; BRÜHL, C.; BUTCHART, N.; CHIPPERFIELD, M. P.; DAMERIS, M.; DEUSHI, M.; EYRING, V.; GIORGETTA, M. A.; KINNISON, D. E.; MANCINI, E.; MARSH, D. R.; NAGASHIMA, T.; PITARI, G.; PLUMMER, D. A.; ROZANOV, E.; SHIBATA, K.; TIAN, W. Clear sky UV simulations for the 21st century based on ozone and temperature projections from Chemistry-Climate Models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 4, p. 1165-1172, 2009.

TRAKATELLI, M.; ULRICH, C.; DEL MARMOL, V.; EUVRARD, S.; STOCKFLETH, E.; ABENI, D. Epidemiology of nonmelanoma skin cancer (NMSC) in Europe: accurate and comparable data are needed for effective public health monitoring and interventions. **British Journal of Dermatology**, v. 156, p. 1-7, 2007.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T. Global warming due to increasing absorbed solar radiation. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 7, 2009.

UNEP. United Nations Environment Programme. **The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**, Ozone Secretariat, 2000.

VELDERS, G. J.; ANDERSEN, S. O.; DANIEL, J. S.; FAHEY, D. W.; MCFARLAND, M. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 12, p. 4814-4819, 2007.

VIGNESH, P. P.; JIANG, J. H.; KISHORE, P.; SU, H.; SMAY, T.; BRIGHTON, N.; VELICOGNA, I. Assessment of CMIP6 cloud fraction and comparison with satellite observations. **Earth and Space Science**, v. 7, n. 2, p. e2019EA000975, 2020.

VOIGT, A.; ALBERN, N.; CEPPI, P.; GRISE, K.; LI, Y.; MEDEIROS, B. Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change. **WIREs Climate Change**, v. 12, n. 2, p. e694, 2021.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey** (Vol. 92). Elsevier, 2006.

WANG, C.; SODEN, B. J.; YANG, W.; VECCHI, G. A. Compensation between cloud feedback and aerosol-cloud interaction in CMIP6 models. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 4, p. e2020GL091024, 2021.

WEBB, A. R.; ENGELSEN, O. Calculated ultraviolet exposure levels for a healthy vitamin D status. **Photochemistry and photobiology**, v. 82, n. 6, p. 1697-1703, 2006.

WESTERVELT, D. M.; HOROWITZ, L. W.; NAIK, V.; GOLAZ, J. C.; MAUZERALL, D. L. Radiative forcing and climate response to projected 21st century aerosol decreases. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 22, p. 12681-12703, 2015.

WIENERS, K. H.; GIORGETTA, M.; JUNGCLAUS, J.; REICK, C.; ESCH, M.; BITTNER, M.; LEGUTKE, S.; SCHUPFNER, M.; WACHSMANN, F.; GAYLER, V.; HAAK, H.; DE VRESE, P.; RADDATZ, T.; MAURITSEN, T.; VON S., J. S.; BEHRENS, J.; BROVKIN, V.; CLAUSSEN, M.; CRUEGER, T.; FAST, I.; FIEDLER, S.; HAGEMANN, S.; HOHENEGGER, C.; JAHNS, T.; KLOSTER, S.; KINNE, S.; LASSLOP, G.; KORNBLUEH, L.; MAROTZKE, J.; MATEI, D.; MERANER, K.; MIKOLAJEWICZ, U.; MODALI, K.; MÜLLER, W.; NABEL, J.; NOTZ, D.; PETERS, K.; PINCUS, R.; POHLMANN, H.; PONGRATZ, J.; RAST, S.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SCHULZWEIDA, U.; SIX, K.; STEVENS, B.; VOIGT, A.; ROECKNER, E. **MPI-M MPI-ESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20190710. Earth System Grid Federation. 2019a. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6595>.

WIENERS, K. H.; GIORGETTA, M.; JUNGCLAUS, J. N.; REICK, C.; ESCH, M.; BITTNER, M.; GAYLER, V.; HAAK, H.; DE VRESE, P.; RADDATZ, T.; MAURITSEN, T.; VON STORCH, J. S.; BEHRENS, J.; BROVKIN, V.; CLAUSSEN, M.; CRUEGER, T.; FAST, I.; FIEDLER, S.; HAGEMANN, S.; HOHENEGGER, C.; JAHNS, T.; KLOSTER, S.; KINNE, S.; LASSLOP, G.; KORNBLUEH, L.; MAROTZKE, J.; MATEI, D.; MERANER, K.; MIKOLAJEWICZ, U.; MODALI, K.; MÜLLER, W.; NABEL, J.; NOTZ, D.; PETERS, K.; PINCUS, R.; POHLMANN, H.; PONGRATZ, J.; RAST, S.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SCHULZWEIDA, U.; SIX, K.; STEVENS, B.; VOIGT, A.; ROECKNER, E. **MPI-M MPIESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20190710. Earth System Grid Federation. 2019b. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.793>.

WILLIAMSON, C. E.; NEALE, P. J.; HYLANDER, S.; ROSE, K. C.; FIGUEROA, F. L.; ROBINSON, S. A.; HÄDER, D.-P.; WÄNGBERG, S.-Å.; WORREST, R. C. The interactive effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change on aquatic ecosystems. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 18, n. 3, p. 717-746, 2019.

WLASCHEK, M.; TANTCHEVA-POÓR, I.; NADERI, L.; MA, W.; SCHNEIDER, L. A.; RAZI-WOLF, Z.; SCHÜLLER, J.; SCHARFFETTER-KOCHANÉK, K. Solar UV irradiation and dermal photoaging. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 63, n. 1-3, p. 41-51, 2001.

WMO. World Meteorological Organization. **International Cloud Atlas. Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors**. WMO-No. 407, 1975.

WMO. World Meteorological Organization. **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991**, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 25, 1991.

WHO. World Meteorological Organization. **Global Solar UV Index: A Practical Guide**. Geneva: World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Program (UNEP), and International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNRP), 2002.

WMO. World Meteorological Organization. **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018**, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 58, 588 pp., Geneva, Switzerland, 2018.

XU, Y.; WU, J.; HAN, Z. Evaluation and Projection of Surface PM_{2.5} and Its Exposure on Population in Asia Based on the CMIP6 GCMs. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12092, 2022.

XU, Q.; WANG, X.; BAI, Y.; ZHENG, Y.; DUAN, J.; DU, J.; WU, X. Trends of non-melanoma skin cancer incidence in Hong Kong and projection up to 2030 based on changing demographics. **Annals of Medicine**, v. 55, n. 1, p. 146-154, 2023.

YAMAMOTO, A. L. C.; CORRÊA, M. D. P.; CCOYLLO, O. R. S. Avaliação e Análise da Série Temporal de Radiação UV Coletadas em Diferentes Cidades Peruanas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 298-305, 2018.

YAMASOE, M. A; CORRÊA, M. P. **Processos radiativos na atmosfera (Fundamentos)**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 142 p.

YANG, X.; ZHAO, C.; ZHOU, L.; WANG, Y.; LIU, X. Distinct impact of different types of aerosols on surface solar radiation in China. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 11, p. 6459-6471, 2016.

YIP, J.; DIAO, M.; BARONE, T.; SILBER, I.; GETTELMAN, A. Evaluation of the CAM6 climate model using cloud observations at McMurdo Station, Antarctica. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 16, p. e2021JD034653, 2021.

YOUN, J.-I.; CHOE, Y.-B.; PARK, S.-B.; SUH, D.-H.; PARK, Y.-K.; AHN, S.-K.; KIM, K.-H.; KIM, S.-T.; KIM, H.-Y.; LEE, S.-C; OH, S.-J.; KIM, J.-J.; KANG, S.-H. The Fitzpatrick skin type in Korean people. **Korean Journal of Dermatology**, p. 920-927, 2000.

YUKIMOTO, S.; KOSHIRO, T.; KAWAI, H.; OSHIMA, N.; YOSHIDA, K.; URAKAWA, S.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; TANAKA, T.; HOSAKA, M.; YOSHIMURA, H.; SHINDO, E.; MIZUTA, R.; ISHII, M.; OBATA, A.; ADACHI, Y. **MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20200207. Earth System Grid Federation. 2019a. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>.

YUKIMOTO, S.; KOSHIRO, T.; KAWAI, H.; OSHIMA, N.; YOSHIDA, K.; URAKAWA, S.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; TANAKA, T.; HOSAKA, M.; YOSHIMURA, H.; SHINDO, E.; MIZUTA, R.; ISHII, M.; OBATA, A.; ADACHI, Y. **MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. Version 20200222. Earth System Grid Federation. 2019b. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.638>.

YUKIMOTO, S.; KAWAI, H.; KOSHIRO, T.; OSHIMA, N.; YOSHIDA, K.; URAKAWA, S.; TSUJINO, H.; DEUSHI, M.; TANAKA, T.; HOSAKA, M.; YABU, S.; YOSHIMURA, H.; SHINDO, E.; MIZUTA, R.; OBATA, A.; ADACHI, Y.; ISHII, M. The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. Ser. II, v. 97, n. 5, p. 931-965, 2019c.

ZARATTI, F.; FORNO, R. N.; GARCIA FUENTES, J.; ANDRADE, M. F. Erythemally weighted UV variations at two high-altitude locations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D9, 2003.

ZEMPILA, M.-M.; VAN GEFFEN, J. H. G. M.; TAYLOR, M.; FOUNTOULAKIS, I.; KOUKOULI, M.-E.; VAN WEELE, M.; VAN DER A, R. J.; BAIS, A.; MELETI, C.; BALIS, D. TEMIS UV product validation using NILU-UV ground-based measurements in Thessaloniki, Greece. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 11, p. 7157-7174, 2017.

ZHOU, C.; ZELINKA, M. D.; KLEIN, S. A. Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 12, p. 871-874, 2016.