XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE E CORREÇÃO DE VIÉS DA PRECIPITAÇÃO DE MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL DO CMIP5 NO SUL DO BRASIL

Maria Fernanda Rodrigues Pereima[1]; Pablo Borges de Amorim[2]; Regina Rodrigues Rodrigues[3] & Pedro Luiz Borges Chaffe[4]

RESUMO – Modelos de Circulação Geral (GCM) apresentam erros sistemáticos e a aplicação de métodos de correção de viés são corriqueiras em estudos hidrológicos que utilizem produtos de GCM. No entanto, esses métodos podem adicionar erros à análise e sua aplicação deve ser acompanhada de um estudo de plausibilidade física. Este trabalho analisou o desempenho de diversos GCM do CMIP5 em representar o regime de precipitação no Sul do Brasil antes e depois da correção de viés. Utilizou-se o Quantile Mapping (QM), que estabelece uma função de transferência que iguale as distribuições acumuladas dos modelos à observação. No período histórico (1986-2005), os GCM não representam satisfatóriamente a precipitação no Sul do Brasil considerando três aspectos marginais sugeridos no projeto VALUE-COST. Uma vez corrigidos, o viés na precipitação total anual dos modelos diminui em magnitude. Para as projeções futuras (2081-2100), os modelos mostram um sinal de mudança de diminuição da precipitação anual. Existe diferença no sinal de mudança entre modelos corrigidos e não corrigidos, demonstrando que o QM adiciona informações importantes no estudo de cenários futuros.

ABSTRACT—Global Circulation Models (GCM) have systematic errors due to different forms of initialization and parametrization errors. Thus, bias correction methods are commonplace in hydrological studies based on GCM products. However, those methods can add errors to the analysis and its application must come alongside a physical credibility study. The goal of this study is to analyze the GCM skill to represent the precipitation regime in South of Brazil before and after a Quantile Mapping bias correction. QM sets a Transfer Function that matches the cumulative distributions of models to the observation. In the historical period (1986-2005), the GCM do not well represent the precipitation in South of Brazil considering three marginal aspects suggested by the project VALUE-COST. Once corrected, the bias in the model's annual rainfall decreases in magnitude. For the future projections (2081-2100), models show a negative change signal. There is a difference in change signal between corrected and uncorrected models, showing that QM adds important information in the study of future climate change scenario.

Palavras-Chave – Modelos de Circulação Geral, Correção de viés, Sul do Brasil

1. INTRODUÇÃO

Um aumento da tempertatura média da superfície terrestre pode causar um aumento global de precipitação e uma mudança nos regimes já conhecidos (COLLINS et al., 2013). Um aumento na

1) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA); mfernandapereima@hotmail.com
2) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA); borgesdeamorim.pablo@gmail.com
3) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Oceanografia; regina.rodrigues@ufsc.br
4) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS); pedro.chaffe@ufsc.br

ocorrência de eventos extremos de precipitação significa, para muitas regiões, um aumento no risco de inundações e o entendimento de como o regime de precipitação pode mudar é essencial para medidas de infreaestrutura (e.g. construção de sistemas de abastecimento, controle de enchentes). A forma mais robusta hoje disponível para o entendimento de como o sistema climático pode responder ao aquecimento global é através de Modelos de Circulação Geral (GCM).

GCM são modelos acoplados que representam o sistema climático simulando processos físicos, químicos e biológicos ocorridos nos oceanos, atmosfera, superfície terrestre e criosfera (MARAUN et al., 2010). Fenômenos que não conseguem ser descritos por essas equações ou que se dão em uma escala pequena são parametrizados (e.g. nuvens, transferência de calor latente).Os modelos de clima são desenvolvidos por diferentes instituições ao redor do mundo de forma coordenada pelo *Coupled Model Intercomparasion Project* (CMIP). Os possíveis cenários de aquecimento global são representados em termos de aumento energético, os chamados *Representative Cconcentration Pathways* – RCP (COLLINS et al., 2013). Cada RCP refere-se a um cenários de mudanças climáticas baseados principalmente emissões de gases do efeito estufa, além de uso da terra e concentrações de ozônio e aerossóis na atmosfera (VAN VUUREN et al., 2011).

A resolução espacial dos GCM (entre 0.5° e 3°) é muitas vezes grosseira para aplicação em modelos de impacto às mudanças climáticas na escala local e regional. Este é um fato especialmente problemático no que tange à modelagem hidrológica, que deve ser desenvolvida na escala local (WERNER; CANNON, 2016) e leva em consideração fenômenos físicos de pequena escala não representados pelos GCMs. Além disso, existem também problemas de inconsistências físicas dos modelos, suas diversas inicializações e diferentes parametrizações e os modelos são propensos à erros sistemáticos ou viéses (EHRET et al., 2012). Neste trabalho, entende-se por viés a diferença absoluta entre variáveis simuladas e observadas.

Existem diversos métodos diferentes para a correção de viés, indo desde um ajuste na média (i.e., *delta change*), correções aditivas, às correções individuais de quantis (i.e., *quantile mapping*) (MARAUN; WIDMANN, 2018). Métodos de correção de viés são todos àqueles que calibram uma função de transferência(FT) empírica entre a distribuição estatística simulada e observada para aplicar essa função no período futuro a fim de eliminar erros sistemáticos (MARAUN et al., 2017). Métodos de correção de viés são, portanto, um pós processamento e não são baseados em plausibilidade física e podem, em alguns casos, inflar o resultado para além do seu erro original (EHRET et al., 2012). Um estudo de impacto (e.g. hidrológico) baseado em produtos corrigidos de GCM deve, portanto, vir acompanhando de um estudo de consistência física da variável estudada. Estudos baseiam-se na credibilidade desses modelos e aplicação de métodos de correção de viés, apesar de melhorarem a performance estatística dos GCM, tendem a diminuir sua credibilidade (MARAUN et al., 2017).

Desta forma, este trabalho objetiva analisar o desempenho dos modelos de clima do CMIP5 em representar a precipitação no Sul do Brasil antes e depois de um procedimento de correção de viés, bem como avaliar se sua utilização agrega informações no desenvolvimento de estudos baseados em projeções futuras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. O regime de precipitação difere ao longo da região, apresentando monções de verão mais ao norte enquanto ao sul as precipitações são mais bem distribuídas ao longo do ano (CAVALCANTI et al., 2009).

2.2. Modelos de Circulação Geral e Base de Dados

Como base para o estudo foi utilizado o produto de precipitação de Xavier *et al*. (2015). Tal base de dados conta precipitações de resolução espacial de 0,25°, com dados diários de 1986 a 2005 (XAVIER; KING; SCANLON, 2015). Os modelos de clima utilizados são da quinta versão do CMIP (CMIP5). Foram utilizadas as rodadas históricas (1986-2005), que servem de base para averiguação de desempenho do modelo e do método de correção utilizado. Para os cenários futuros, foi utilizado o cenário RCP8.5, que indica a situação mais grave onde o aquecimento global pode atingir os 4ºC até o fim do século (COLLINS et al., 2013). Todos os modelos foram reamostrados bilinearmente para a resolução dos dados do Xavier (i.e. 0,25°).

Os modelos utilizados foram primeiraimente separados por insituição responsável. São elas: *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) com os modelos ACCESS1-0, ACCESS1-3 e CSIRO-Mk360; *Beijing Normal University* (BNU) com BNU-ESM; *Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici* (CMCC) com CMCC-CMS, CMCC-CM; *Centre National de Recherches Meteorologiques* (CNRM) juntamente com o *Centre Europeen de Recherches et de Formation Avanceé Calcul Scientifique* (CERFACS) com CNRM-CM5; *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CCCma) com CanESM2; *Institute of Atmospheric Physics* (IAP) com FGOALS; *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* juntamente com *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA GFDL) com os modelos GFDL-CM3, GFDL-ESM2G e GFDL-ESM2M; *Met Office Hadley Centre* com HadGEM2-CC; *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (AMSTEC), *Atmosphere and Ocean Research Institute* (AORI) e *National Institute for Environmental Studies* (NIES) com MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC4h e MIROC5; *Max Planck Institute for Meteorology* responsáveis por MPI-ESM-LR e MPI-ESM-MR; *Norwegian Climate Centre* (NCC) com NorESM1-M; *Beijing Climate Center China Meteorological Administration* (BCC) com bcc-csm1-1m e bcc-csm1-1; *Institute for Numerical*

Mathematics (INM) com inmcm4; *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) responsável pelo CCSM4 e *Goddard Institute for Space Studies* (NASA/GISS) com GISS-E2-R e GISS-E2-H. Todos os modelos listados foram analisados, mas foi escolhido um só modelo por instituição para a visualização dos resultados. Modelos de uma mesma instituição tendem a apresentar similaridades estruturais e, portanto, produzir resultados semelhantes (HERGER et al., 2017)

2.3. Correção de viés: Quantile Mapping

A técnica de Quantile Mapping (QM) corrigem erros sistemáticos de uma variável em diferentes escalas através de uma função de transferência que iguale as distribuições acumuladas (CDF) da variável real (observada) e sua representação no GCM (rodada histórica). A premissa do método é que esta relação é, em princípio, estacionária podendo ser propagada para períodos futuros.

Qualquer método de correção de viés deve ser aplicado com o auxílio de extensiva compreensão dos processos físicos a serem estudados, bem como da capacidade dos modelos de clima em representar tais fenômenos. Uma limitação deste método de correção de viés está na sua dificuldade em representar as caudas da distribuição dos dados, representando melhor valores centrais (CANNON; SOBIE; MURDOCK, 2015). Este método pode, portanto, considerar precipitações extremas que ocorram fora do período utilizado como base como anomalias e falhar na sua representação. Métodos de correção de viés baseiam-se em funções de transferência empíricas e não em relações físicas. Ainda, o método baseia-se no princípio que a relação estatística entre modelo e observação é estacionária, premissa que não é necessariamente verdadeira.

Portanto, a análise de saídas de modelos de clima deve ser acompanhada de um estudo da plausibilidade física dos resultados, validando-os através de índices como os estabelecidos pelo projeto VALUE-COST (RÖSSLER et al., 2017).

2.4. Avaliação de desempenho dos Modelos de Clima

De acordo com o projeto *European Union Cooperation in Science and Technology (EU COST) Action ES1102 VALUE* (VALUE-COST) (MARAUN et al., 2014), de forma a melhor avaliar os resultados obtidos de produtos de GCM , métricas de acrodo com a necessidade do usuário final devem ser definidas. Elas podem ser divididas em quatro categorias: aspectos marginais, temporais, espaciais e multivariados. Neste trabalho foram explorados três índices representativos dos aspectos margians: viés na precipitação total anual, erro relativo da variância da precipitação total anual e teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS). O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov é um teste não paramétrico que tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidade acumuladas de duas variáveis(PETTITT, 1978).

De forma a avaliar o desempenho dos GCM em representar a precipitação, o período de 1986 a 2005 foi utilizado para gerar os índices citados. Uma vez estabelecida a necessidade de uma correção,

o método QM foi validado para o período de 1996 a 2005 através do viés na precipitação total anual O período de calibração neste caso foi de 1980 a 1995.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Desempenho dos GCM no período históricos

Em respeito à média (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), é possível constatar que os GCM tendem a simular uma precipitação maior do que àquela ocorrida nas regiões litorâneas do sul de Santa Catarina ao centro do Rio Grande do Sul. As regiões do norte do Paraná ao oeste de Santa Catarina simulam uma precipitação menor que àquela observada (i.e. Xavier, 2015). Apesar do viés apresentado ser considerável (dependendo da região, o modelo pode chegar a simular 1000 mm/ano de diferença com a observação), regiões de transição onde os modelos mudam o sinal do viés tendem a apresenar um viés próximo à zero.

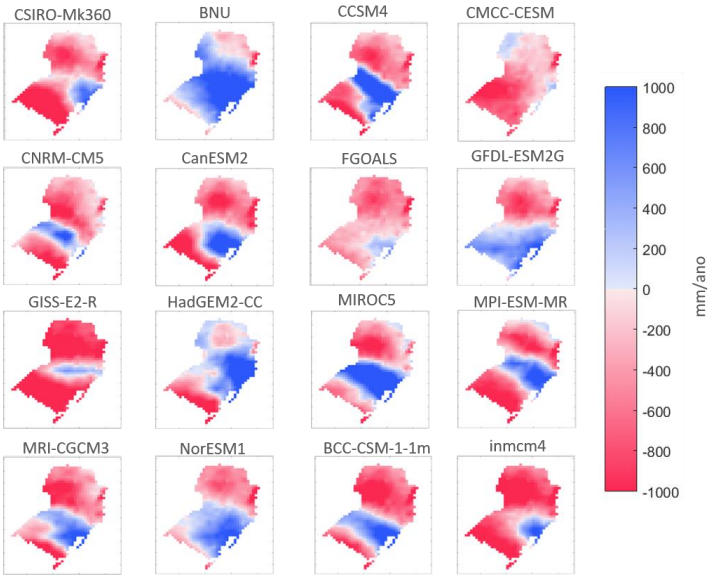

Figura 1: Viés da precipitação simulada pelos GCM em relação à observação. Cada quadro representa a diferença entre a saída de um GCM e os dados de chuva para o período histórico.

Quanto ao erro relativo da variância (Figura 2 A), de forma geral, os modelos tendem a simular uma variância maior que a observada, sendo na maior parte da área de estudo apresentando uma variância de até 100% maior que a observada. No entanto, em algumas famílias de GCM é possível notar uma subrepresentação da variância na região da Lagoa dos Patos (RS), chegando a simular uma variancia 100% menor (no caso do MIROC5).

O último índice para analisar o desempenho dos modelos em representar a precipitação dos GCM é o teste KS (Figura *2* B). Os modelos seguem o mesmo padrão do viés na precipitação total anual. Quando o viés tende à zero, os modelos não rejeitam a hipótese nula (H0, as duas amostras vêm da mesma distribuição estatística) do teste de aderência, já em áreas onde há viés na precipitação total anual, as distribuições entre GCM histórico e observação divergem estatisticamente (i.e., não rejeitam

a hipótese alternativa H1, as duas amostras não vem da mesma distribuição estatística). Em resumo, locais onde não há viés são estatisticamente iguais. Locais onde há viés são estatisticamente diferentes.

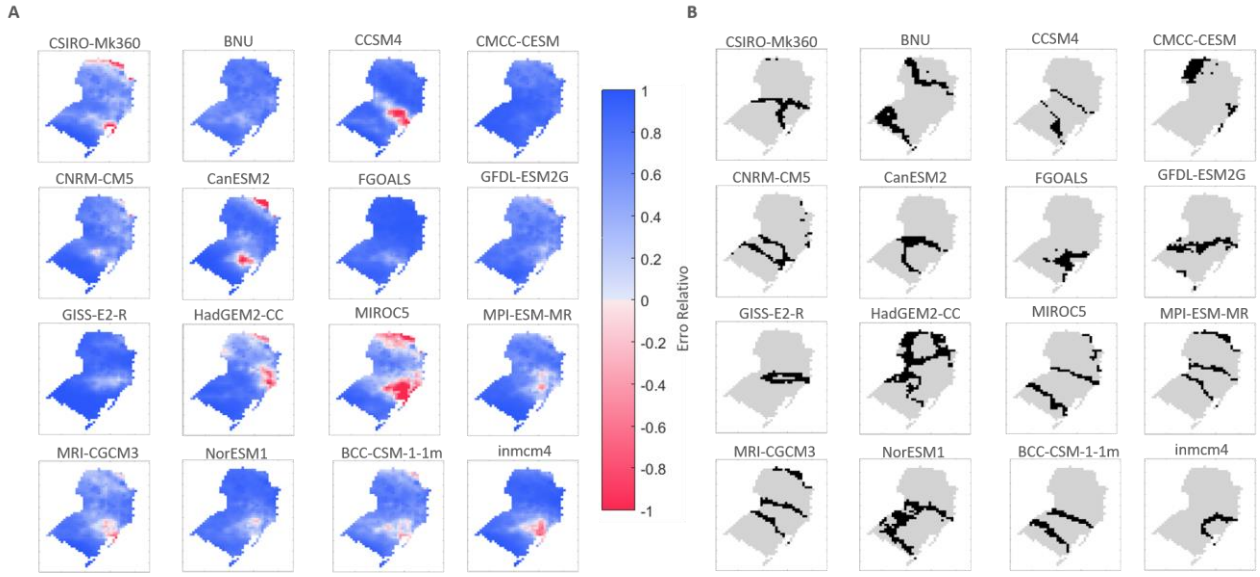

Figura 2: A) Erro Relativo entre a variância dos GCM e da Observação. B) Teste de Aderência Kolmogorov-Smirnov. A cor preta indica locais onde a observação e o GCM são estatisticamente iguais. A cor cinza indica locais onde a observação e o GCM são estatisticamente diferentes.

Salvo nos locais onde o viés tende à zero, os modelos não apresentaram bem o regime de precipitação no Sul do Brasil para o período histórico de 1986 a 2005. Na precipitação total anual, o viés pode ultrapassar os 1000 mm/ano, o que seria um erro muito grosseiro no caso de eventual modelagem hidrológica. Quanto à variância, os modelos no geral simulam uma variância muito maior do que a ocorrida. No caso do teste estatístico de aderência KS, os modelos na maior parte das regiões indicam que as distribuições não são estatisticamente semelhantes. Considerando as fraquezas dos modelos aqui apresentadas, é necessária que uma atenção seja dada à finalidade dessas simulações dada pelo usuário final. No caso da modelagem hidrológica, os erros seriam propagados por modelos de chuva-vazão, por exemplo. Portanto, tendo modelagem hidrológica e a alta sensibilidade dos recursos hídricos à precipitação, este trabalho optou por executar uma métodologia de correção de viés. Este método foi validado para o período de 1996 a 2005.

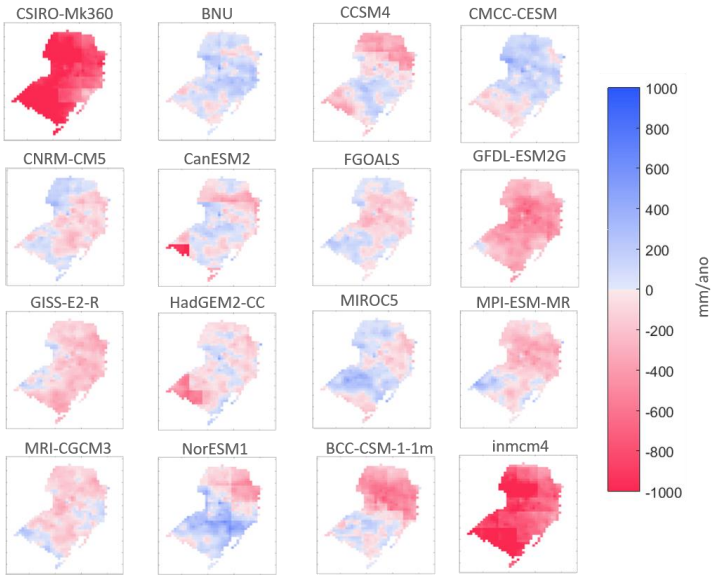

Figura 3: Correção de viés da precipitação simulada pelos GCM em relação à observação no período de 1996 a 2005.

Os GCM após passarem pelo QM (Figura 3) apresentam um viés menor do que o encontrado para os mesmos modelos sem a correção (em alguns locais, os modelos passam de um viés de 1000 mm/ano para 300 mm/ano de diferença do observado). Na maioria das famílias, a influência das condições inicias dos modelos é dissipada, sendo possível ver que não há uma concordância espacial e nem uma área de transição na mudança de sinal do viés.

3.2. Avaliação do período futuro dos GCM

Uma vez observada a necessidade da correção de viés nos GCM históricos a mesma metodologia foi aplicada para um cenário futuro mais severo, o RCP8.5. O intuito desta sessão é identificar o sinal de mudança entre as rodadas futuras e históricas dos GCM antes e depois da aplicação da correção de viés, de forma a verificar se a correção de fato adiciona informações relevantes ao usuário final dos produtos de GCM. Nas figuras apresentadas, os espaços vazios correspondem à modelos que não apresentam cenários futuros RCP8.5.

Neste trabalho, entende-se como cenário de mudança a diferença na precipitação total anual entre o GCM no cenário futuro e o mesmo GCM na rodada histórica. Os modelos após passarem por um procedimento de correção de viés (Figura 4 A), apresentam majoritariamente um cenário de mudança negativo em relação ao modelo na rodada histórica (diminuição da precipitação total anual até o fim do século XXI) ao longo de toda a área, salvo os modelos CMCC-CESM e CNRM-CM5. Quando os resultados da (Figura 4 A) são comparados aos cenários de mudanças sem correção (Figura 4 B), é possível identificar locais em que a diferença entre eles é nula. Nestes casos a aplicação de um método de correção de viés não é informativa, uma vez que os cenários de mudança são iguais antes e depois da correção. Na maior parte da área de estudo, no entanto, é possível ver que há diferença entre os cenários de mudança dos modelos corrigidos e não corrigidos. Desta forma, para esses locais, a

aplicação do QM agrega informações importantes ao usuário final e deve ser aplicado no desenvolvimento de cenários de mudanças climáticas. A diferença encontrada nos sinais de mudanças climáticas (Figura 4 B) pode ser devido à estacionariedade da FT. Portanto, para uma análise mais robusta, recomenda-se a aplicação de um teste de estacionariedade (e.g., utilizando o método de pseudo-realidade) (MARAUN et al., 2014).

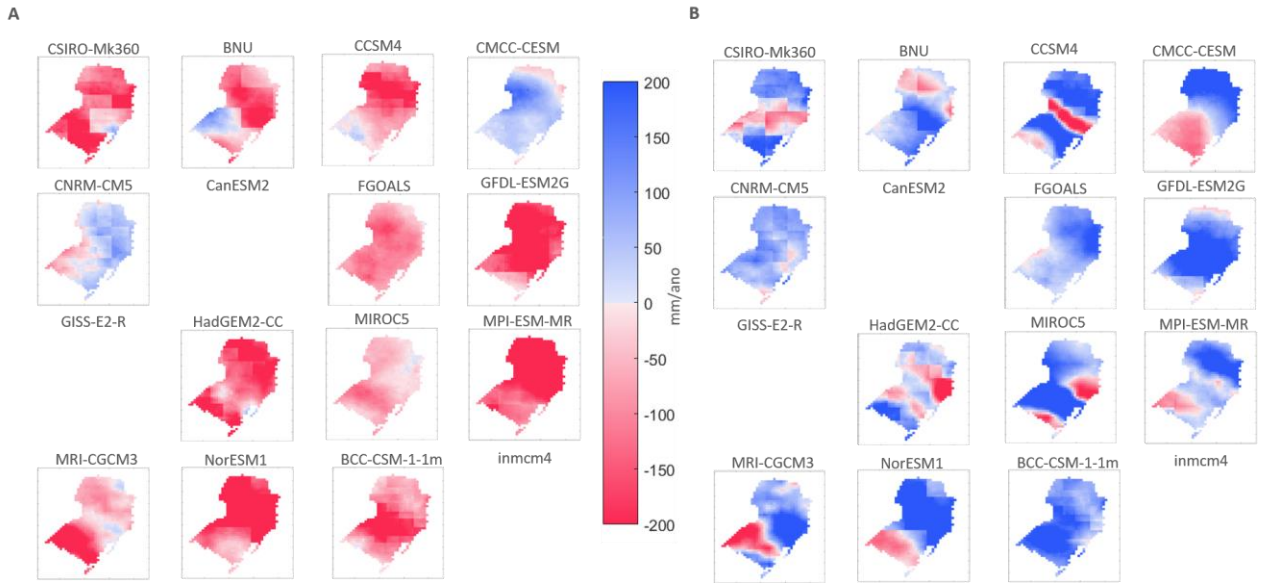

Figura 4: A) Cenário de mudança de precipitação (RCP8.5 - histórico) dos GCM com correção de viés. B) Diferença entre sinais de mudanças do cenário RCP85 não corrigidos.

4. CONCLUSÕES

. A precipitação total acumulada mostra que os modelos simulam mais precipitação do que o ocorrido em regiões litorâneas que vão de Santa Cataria ao Rio Grande do Sul ao mesmo tempo que simula uma precipitação total anual menor que a ocorrida no Paraná, oeste de Santa Catarina e sul do Rio Grande do Sul. Na transição entre essas regiões, no entanto, os modelos apresentam um viés pequeno. Esse padrão é também reproduzido no teste KS onde observação e modelos somente são estatisticamente iguais em áreas onde o viés chegue perto de zero.

Quanto à variância, os modelos no geral simulam uma maior variância do que a ocorrida para quase todo domínio, portanto a aplicação de um método de correção é recomendada. Uma vez corrigidos, o viés restante não demonstra que há uma influência da localização, indicando que o viés devido à erros sistemáticos do modelo foram corrigidos. As áreas de transição também desaparecem.

Para o cenário futuro, os modelos corrigidos apresentam uma concordância entre eles e um cenário de mudança negativo (precipitação total anual diminui) na maior parte de sua área. Quando os cenários de mudança dos modelos corrigidos e não corrigidos é comparada, encontram-se locais onde a diferença entre eles é nula. Nos locais onde essa diferença é expressiva, a aplicação da correção

de viés é informativa e deve ser levada em consideração no desenvolvimento de cenários futuros de mudanças climáticas

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Alburquerque et al (Org.). *Tempo e Clima no Brasil***.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463 p

CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, v. 28, n. 17, p. 6938–6959, 2015.

COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J.-L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAO, X.; GUTOWSKI, W. J.; JOHNS, T.; KRINNER, G.; SHONGWE, M.; TEBALDI, C.; WEAVER, A. J.; WEHNER, M. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 1029–1136, 2013.

EHRET, U.; ZEHE, E.; WULFMEYER, V.; LIEBERT, J. HESS Opinions " Should we apply bias correction to global and regional climate model data ?" p. 3391–3404, 2012.

HERGER, N.; ABRAMOWITZ, G.; KNUTTI, R.; ANGÉLIL, O.; LEHMANN, K.; SANDERSON, B. M. Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties. *Earth System Dynamics Discussions*, n. April, p. 1–24, 2017.

MARAUN, D.; WETTERHALL, F.; CHANDLER, R. E.; KENDON, E. J.; WIDMANN, M.; BRIENEN, S.; RUST, H. W.; SAUTER, T.; THEMESSL, M.; VENEMA, V. K. C.; CHUN, K. P.; GOODESS, C. M.; JONES, R. G.; ONOF, C.; VRAC, M.; THIELE-EICH, I. Precipitation downscaling under climate change: Recent developements to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, v. 48, n. 2009RG000314, p. 1–38, 2010.

MARAUN, D.; WIDMANN, M.; GUTIÉRREZ, J. M.; KOTLARSKI, S.; CHANDLER, R. E.; HERTIG, E.; WIBIG, J.; HUTH, R.; WILCKE, R. A. I. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. p. 1–14, 2014.

MARAUN, D.; SHEPHERD, T. G.; WIDMANN, M.; ZAPPA, G.; WALTON, D.; GUTIÉRREZ, J. M.; HAGEMANN, S.; RICHTER, I.; SOARES, P. M. M.; HALL, A.; MEARNS, L. O. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 11, p. 764–773, 2017.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1978.

RÖSSLER, O.; FISCHER, A. M.; HUEBENER, H.; MARAUN, D.; BENESTAD, R. E.;

CHRISTODOULIDES, P.; SOARES, P. M. M.; CARDOSO, R. M.; PAGÉ, C.; KANAMARU, H.; KREIENKAMP, F.; VLACHOGIANNIS, D. Challenges to link climate change data provision and user needs - perspective from the COST-action VALUE. *International Journal of Climatology*, 2017.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, v. 109, n. 1, p. 5–31, 2011.

WERNER, A. T.; CANNON, A. J. Hydrologic extremes – an intercomparison of multiple gridded statistical downscaling methods. v. 2003, p. 1483–1508, 2016.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, v. 2659, n. October 2015, p. 2644–2659, 2015.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88887318111201900