



Análise do Impacto da Mudança do Clima na Precipitação sobre as Bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai através da Regionalização de Projeções Climáticas
Using Dynamical Downscaling of Climate Projections for the Assessment of Climate Change Impacts on Precipitation over Paraná and Paraguay River Basins

Aline de Assis Benezath¹; Ana Maria Bueno Nunes¹;
Mauro Cirano¹; Iago Alvarenga e Silva¹ & Rosmeri Porfírio da Rocha²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia,
Av. Athos da Silveira Ramos 274, Bloco G1, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro - RJ - Brasil

²Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas,
Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, 05508-090, São Paulo - SP - Brasil
E-mails: aline.assis.oceano@gmail.com; ana.nunes@igeo.ufrj.br;
mauro.cirano@igeo.ufrj.br; iagoalvarenga@yahoo.com.br; rosmerir.rocha@iag.usp.br
Recebido em: 10/10/2018 Aprovado em: 15/01/2019
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_695_707

Resumo

A bacia do Rio Paraná é uma das bacias hidrográficas mais importantes para o setor de energia no Brasil e, com a bacia do Rio Paraguai, faz parte da segunda maior bacia hidrográfica da América do Sul, a bacia Platina. Uma análise da precipitação sobre as bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai no século XXI é realizada utilizando modelos climáticos para avaliar mudanças no ciclo hidrológico. Além da precipitação, este estudo utiliza uma reanálise global na avaliação da habilidade de três modelos climáticos globais em representar os padrões climatológicos da circulação de verão da América do Sul que afetam o ciclo hidrológico nas duas bacias. As integrações climáticas utilizadas estão disponíveis para o período histórico, 1975-2004, e para as projeções, 2041-2070 e 2071-2100. As projeções climáticas utilizadas neste estudo são forçadas pelo *Representative Concentration Pathway* (RCP) 8.5, que é a trajetória mais extrema do *Fifth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project*. A regionalização, que permite análises mais detalhadas nas bacias, foi feita usando o RegCM4 no âmbito do *Coordinated Regional Downscaling Experiment project*. O RegCM4 usou condições iniciais e de contorno provenientes dos seguintes modelos globais, também analisados neste estudo: o ESM2M do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*; o ESM-MR do *Max Planck Institute*; e o HadGEM2 do *Hadley Center*. Para o período histórico, HadGEM2 e ESM2M concordam melhor com a reanálise global na representação dos padrões atmosféricos na América do Sul do que o ESM-MR. A regionalização do HadGEM2 apresenta menores erros na precipitação do que as demais regionalizações em comparação com as observações nas bacias. Quanto à diferença entre precipitação e evaporação, os resultados mostram pouca alteração no clima futuro para o mês de janeiro, exceto no sudoeste da bacia do Rio Paraná na regionalização do ESM-MR.

Palavras-chave: bacia hidrográfica; CMIP5; mudanças climáticas

Abstract

Paraná River basin is one of the most important river basins for the energy sector in Brazil and, together with Paraguay River basin, forms part of the La Plata basin, which is the second largest river basin in South America. An evaluation of precipitation over Paraná and Paraguay River basins during the 21st century is performed using climate models to assess changes in the water cycle. In addition to precipitation, this study uses a global reanalysis in the evaluation of the ability of three global climate models to represent the climatological patterns of South American summer circulation that impact the hydrological cycle of the two river basins. The climate integrations used in this study are available for the historical period, 1975-2004, and for the projections, 2041-2070 and 2071-2100. The Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5, which is the most extreme RCP from the Fifth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project, forced the climate projections used in this study. The regionalization was performed using RegCM4 under the Coordinated Regional Downscaling Experiment project, which allows for more detailed analyzes in the basins. RegCM4 used initial and boundary conditions from the following global models, also analyzed in this study: The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory's ESM2M; the Max Planck Institute's ESM-MR; and HadGEM2 from the Hadley Center. For the historical period, the performance of HadGEM2 and ESM2M agree better with the global reanalysis in the representation of South American atmospheric patterns than ESM-MR. RegCM4 driven by HadGEM2 shows smaller errors in precipitation compared to the gauge-based products in the basins. Regarding the future climate, small changes in precipitation minus evaporation occur in January, except for RegCM4 driven by ESM-MR in the southwestern Paraná River basin.

Keywords: river basin; CMIP5; climate change

1 Introdução

A região hidrográfica do Paraná responde pela maior demanda por recursos hídricos do País, equivalente a 736 m³/s, que corresponde a 31% da demanda nacional, segundo relatório da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013). A irrigação é a maior usuária de recursos hídricos da bacia (42% da demanda total), seguida do abastecimento industrial (28%) (ANA, 2013). A maior parte da bacia hidrográfica é utilizada como meio de transporte e é considerada uma importante hidrovia ligando cidades do interior da Argentina e do Paraguai com o oceano. Apesar do fato da construção de hidrelétricas ao longo da bacia ter reduzido seu uso como meio de transporte, o impacto dessas construções na economia tem sido compensatório (ANA, 2017). A noroeste da bacia do Rio Paraná se encontra a bacia do Rio Paraguai, a região hidrográfica formada conjuntamente pelas bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai (doravante Região Hidrográfica Paraná-Paraguai) integra grande parte da bacia Platina ou do Rio da Prata dentro do território brasileiro.

Os regimes hidrológicos são altamente dependentes de fatores climáticos, dentre os quais o mais importante é a precipitação. Esses fatores climáticos podem influenciar na frequência, na intensidade e na distribuição sazonal de eventos de chuva (Pumo *et al.*, 2016). A extensão espacial e temporal da precipitação nas estações úmidas varia significativamente na América do Sul e grandes mudanças no regime de precipitação possuem forte influência na geração de energia elétrica e nos recursos de água nas regiões urbanas (Marengo *et al.*, 2012).

Devido à importância de se compreender as respostas das mudanças climáticas no sistema terrestre, os Modelos Climáticos Globais (em inglês, *Global Climate Models* - GCMs) têm sido utilizados como principal ferramenta para isso (e.g., Marengo *et al.*, 2010a, 2010b, 2012). O quinto relatório de mudanças climáticas do IPCC apresentou o *Fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) que trata de um grande conjunto de experimentos a fim de avaliar a eficácia dos modelos climáticos, explorar a previsibilidade climática decadal e investigar as diferenças nas projeções climáticas entre vários modelos (Taylor *et al.*, 2012).

Jones & Carvalho (2013) utilizaram modelos do CMIP5 na avaliação de alterações nas características de grande escala, como amplitude sazonal, data de início e término e duração do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), mostrando um prolongamento na duração de tal sistema no clima futuro.

Alguns estudos têm identificado um aumento da confiabilidade nas projeções de temperatura e de precipitação na América do Sul através do CMIP5 em relação às da terceira fase (CMIP3), essa com diferentes cenários e versões dos GCMs (e.g., Blázquez & Nuñez, 2013). No entanto, o estudo de mudanças na precipitação em escala regional é um desafio para os GCMs desde que devido à sua baixa resolução espacial mostram dificuldades em representar mudanças regionais confiáveis. Então, com a necessidade de resolver a deficiência de resolução dos GCMs, a redução de escala (em inglês, *downscaling*) passou a ser aplicada. Esse método é feito dinamicamente através da utilização de modelos numéricos de maior resolução, os Modelos Climáticos Regionais (em inglês, *Regional Climate Models* - RCMs), a fim de aumentar a resolução dos GCMs, tornando-se uma ferramenta útil, com maior confiabilidade na representação de processos de escala de sub-grade (Fowler *et al.*, 2007; Marengo *et al.*, 2009; Palomino-Lemus *et al.*, 2015).

Em Llopart *et al.* (2014) é feita uma avaliação da mudança do hidroclima nas bacias Amazônica e do Rio da Prata, através do uso de um RCM para redução de escala (doravante, regionalização) de um conjunto de modelos climáticos globais do CMIP5, no âmbito do *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX). O presente estudo utiliza um subconjunto das mesmas regionalizações para avaliar o impacto das mudanças climáticas na Região Hidrográfica (RH) Paraná-Paraguai, uma sub-região da bacia do Rio da Prata no Brasil, durante o seu mês mais chuvoso, o qual foi estabelecido através dos valores mensais de precipitação de um produto com base na rede pluviométrica. Dentre os objetivos específicos incluem-se: i) a avaliação da representação do clima corrente pelos modelos globais com foco nos sistemas que afetam a RH Paraná-Paraguai, ii) a estimativa do ganho obtido pela regionalização dos GCMs na representação da pre-

precipitação sobre a RH Paraná-Paraguai e iii) a avaliação da mudança na precipitação e na conservação de água superficial (P-E) através da regionalização, usando o cenário RCP8.5.

2 Materiais e Métodos

As regionalizações utilizadas no presente estudo foram feitas de acordo com o critério estabelecido pelo CORDEX no projeto RegCM4 *hyperMatrix* (CREMA), descrito por Giorgi (2014). Tal projeto selecionou os modelos do CMIP5 que na época já haviam tornado disponíveis os campos a cada 6 horas, necessários para a regionalização, além de considerar a habilidade destes modelos em reproduzir as principais características observadas do clima na América do Sul. A partir dessas considerações, os GCMs escolhidos foram o *Earth System Model do Geophysical Fluid Dynamic Laboratory* (ESM2M; Dunne *et al.*, 2012), o *Earth System Model Middle Resolution do Max Planck Institute* (ESM-MR; Giorgetta *et al.*, 2012) e o *Hadley Centre Global Environmental Model Earth System* (HadGEM2-ES; Martin *et al.*, 2011). Neste estudo, as regionalizações analisadas sobre a RH Paraná-Paraguai foram as da versão do modelo climático regional, RegCM4, que dispõe do esquema de superfície *Community Land Model* (CLM3.5; Tawfik & Steiner, 2011) e do esquema de Emanuel & Zivkovic-Rothman (1999) para a convecção profunda (RegCM4; Giorgi *et al.*, 2012; Llopart *et al.*, 2014). Essas regionalizações serão denominadas RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR, ou seja, uma combinação entre a nomenclatura para o RegCM4 (RCM4) e os modelos globais. A Tabela 1 apresenta as resoluções dos modelos globais e do modelo regional utilizado na regionalização.

Modelo Climático	Componente Atmosférica	
	Resolução Horizontal	Resolução Vertical (níveis)
HadGEM2'	1,25° lat. x 1,875° long.	38
ESM2M'	2,0225° lat. x 2,5° long.	24
ESM-MR'	1,8653° lat. x 1,875° long.	95
RegCM4	50 km	18

Tabela 1 Resoluções horizontal e vertical das componentes atmosféricas dos modelos climáticos globais, HadGEM2, ESM2M e ESM-MR, e do modelo regional RegCM4.

(*) Fonte: *European Network for Earth System Modelling* (ENES, 2018).

2.1 Métodos de Avaliação

O método de análise do presente estudo é dividido em três fases. A primeira fase tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos globais na representação dos principais padrões atmosféricos associados à precipitação de verão atuantes na América do Sul, com influência sobre a RH Paraná-Paraguai, localizada nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. A segunda fase visa verificar o ganho obtido da regionalização em relação aos modelos globais, para simulação da precipitação. Por fim, a terceira fase tem como objetivo investigar as mudanças na precipitação e evaporação utilizando as três regionalizações do RegCM4 com foco na área da RH Paraná-Paraguai.

2.1.1 Avaliação dos Modelos Globais

A primeira parte do presente estudo compreende a avaliação dos modelos globais no período histórico, de 1975 a 2004, e com foco no mês mais chuvoso do período do SMAS (janeiro).

A análise será realizada através da espacialização das climatologias mensais das seguintes variáveis atmosféricas: precipitação e vento no nível de 200 hPa. Os produtos utilizados como referência na avaliação do desempenho dos modelos globais são a reanálise global do *National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research* (R1), para a climatologia do vento, e análise da precipitação acumulada mensal do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), obtida a partir das observações provenientes da rede global de estações pluviométricas. As resoluções horizontais dessas análises estão descritas na Tabela 2.

A climatologia é produzida a partir das saídas dos modelos ESM2M, ESM-MR e HadGEM2-ES, assim como dos produtos R1 e GPCC, sobre o domínio compreendido entre as latitudes 60°S e 10°N e as longitudes 95°W e 25°W.

Variável	Resolução Horizontal (latitude x longitude)	Produto (Referência)
Precipitação	2,5° x 2,5°	GPCC (Schneider <i>et al.</i> , 2014)
Vento Zonal e Meridional	2,5° x 2,5°	R1 (Kalnay <i>et al.</i> , 1996)

Tabela 2 Resolução horizontal da R1 e do GPCC utilizados como referência para a avaliação dos modelos globais.

2.1.2 Análise Quantitativa da Regionalização

A próxima etapa consiste na investigação da melhoria na representação dos padrões de precipitação, através da regionalização dos modelos globais, utilizando o modelo regional RegCM4. Esse estudo será realizado no período histórico de 1975-2004, através de análise quantitativa utilizando Diagrama de Taylor (Taylor, 2001).

O Diagrama de Taylor sumariza graficamente o quão próximo de um padrão (observação) se encontram os modelos. A similaridade entre dois ou mais padrões se dá em termos da correlação, da raiz do erro quadrático médio e do desvio padrão. Esses diagramas são especialmente úteis na avaliação de múltiplos aspectos de modelos complexos. Os gráficos foram construídos através da média dos valores de precipitação do mês de janeiro, durante o período histórico 1975-2004, sobre a RH Paraná-Paraguai. A fim de obter um resultado mais preciso, foi realizada uma interpolação das regionalizações para a grade dos modelos globais. Dessa forma, todas as séries apresentaram o mesmo número de pontos de grade.

2.1.3 Projeções Climáticas sobre a Região Hidrográfica Paraná-Paraguai

Após a investigação realizada nas fases anteriores, será realizada uma análise das projeções de precipitação e evaporação na área conjunta das bacias. As projeções serão analisadas nos períodos de 2041-2070 e 2071-2100 com o uso das três regionalizações, e comparadas ao período histórico 1975-2004, a fim de avaliar tendências para o meio e o final do século XXI. A diferença entre a precipitação e a evaporação ($P-E$), por exemplo, sobre a área de uma bacia, contribui na avaliação da variação local de água na superfície, e representa uma das componentes da equação do balanço de água superficial (Roads *et al.*, 2003; Nunes & Roads, 2007; Krepper & Venturini, 2009). Em situações onde a média da precipitação na área supera a média de evaporação ($P>E$), a contribuição do termo é positiva para a variação local de água na superfície. Por outro lado, em situações onde a média da precipitação é inferior à da evaporação ($P<E$), essa mesma variação é negativa.

A Figura 1 mostra as bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai, com foco na localização da usina de Itaipu, a qual é responsável pelo fornecimento de energia para os estados das regiões Sul e Sudeste.

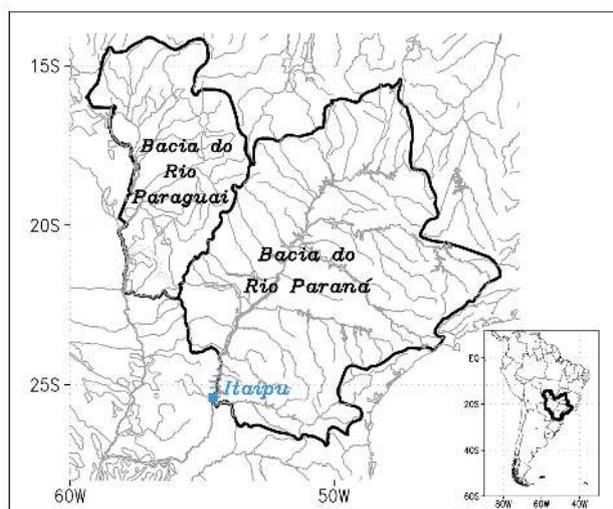


Figura 1 Representação das bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai, com a localização da usina de Itaipu (quadrado azul). A linha espessa preta demarca os limites das bacias, com os rios principais e os afluentes em cinza claro. A RH Paraná-Paraguai está delimitada por contorno preto sobre a América do Sul (lado direito, parte inferior da figura).

3 Resultados

3.1 Avaliação dos Modelos Globais

3.1.1 Avaliação da Precipitação sobre a Região Hidrográfica Paraná-Paraguai

Na Figura 2, a climatologia observada da precipitação mensal sobre a bacia para o período histórico 1975-2004 mostra os meses mais úmidos (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) e mais secos (abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro) durante o ano. Krepper *et al.* (2006) fizeram uma análise da precipitação sobre a bacia do Rio Paraguai, utilizando médias mensais provenientes de um conjunto de dados diferente do GPCC, no período de janeiro de 1901 a dezembro de 2000, sobre uma grade de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Eles determinaram que os máximos ocorrem entre outubro e março, que identificaram como a estação úmida na bacia que coincide com o período ativo do SMAS (Raia & Cavalcanti, 2008), e que os valores anuais decrescem de nordeste para sudoeste na bacia, como visto na Figura 2 entre os meses de novembro a março. Além

disso, a partir da Figura 2, observa-se nos meses mais chuvosos uma heterogeneidade nas porções nordeste (mais úmida) e sudoeste (mais seca) em toda a RH, com destaque para o mês de janeiro com maior volume de precipitação. Enquanto nos meses mais secos, a heterogeneidade apresenta comportamento inverso, com a parte nordeste da RH mais seca e a sudoeste mais úmida.

A diferença de precipitação entre o nordeste e o sudoeste da RH nos meses mais chuvosos do SMAS gera a necessidade de uma melhor avaliação da bacia do Rio Paraná, devido à localização da usina de Itaipu na região mais seca (sudoeste da bacia), assim como da bacia do Rio Paraguai, com nascente no estado de Mato Grosso e confluência com o Rio Paraná ao sul (Krepper *et al.*, 2006). Por se tratar do mês mais chuvoso, o mês de janeiro será avaliado

através da análise dos padrões atmosféricos envolvidos na precipitação das bacias, bem como através da avaliação das mudanças climáticas sobre as mesmas.

3.1.2 Avaliação da Precipitação sobre a América do Sul

As Figuras 3A, 3B e 3C mostram a distribuição espacial da precipitação dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR, para mês de janeiro, o mês mais chuvoso na RH Paraná-Paraguai (Figura 2). Enquanto as Figuras 3D, 3E e 3F, mostram a diferença entre a precipitação dos modelos globais e o observado pelo GPCC.

As Figuras 3A, 3B e 3C mostram maiores valores de precipitação na Região Norte do Brasil, e sobre uma faixa que se estende sobre a Região Su-

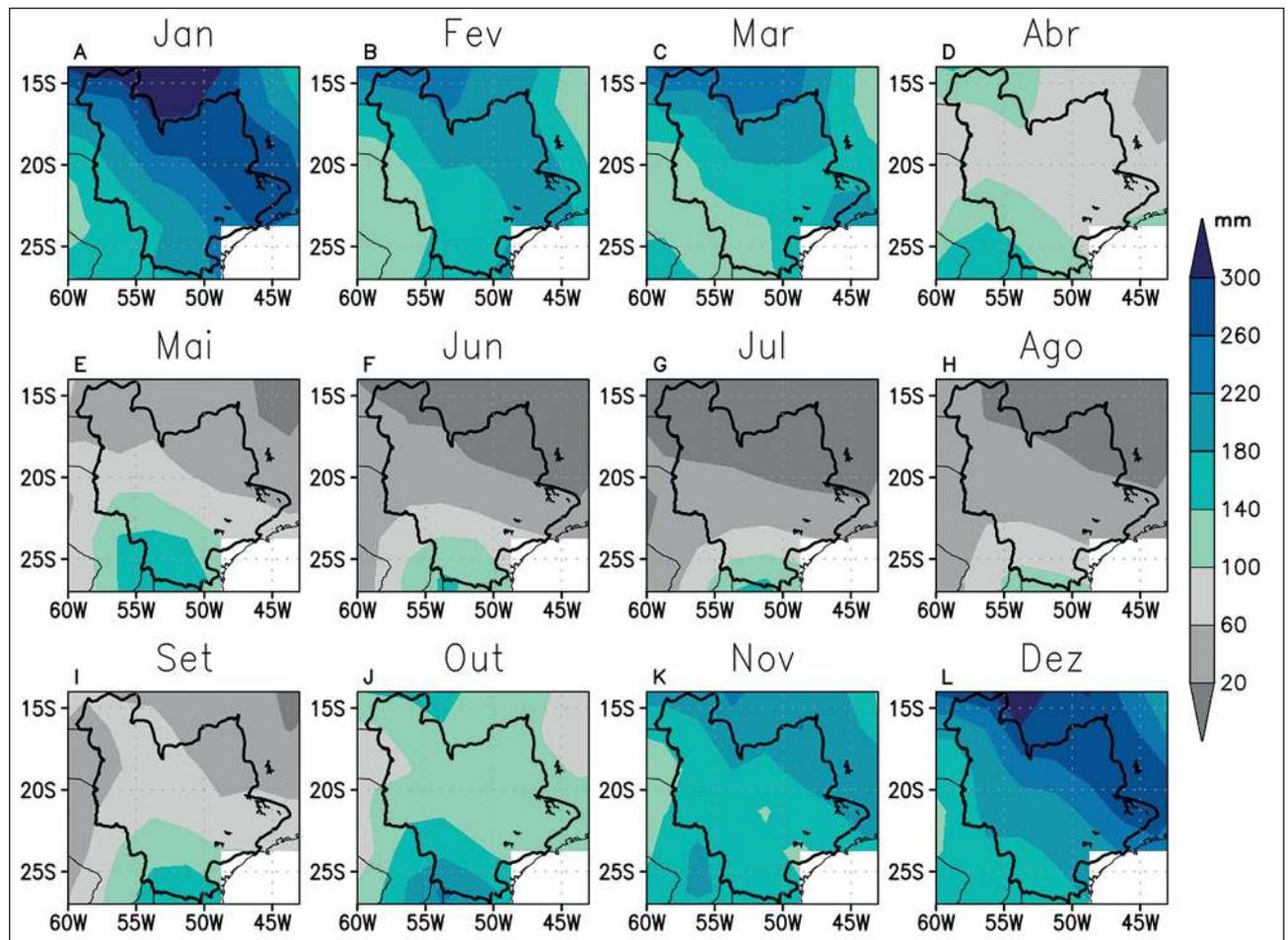


Figura 2 Climatologia de precipitação (mm/mês) do GPCC sobre a RH Paraná-Paraguai (definida pela linha preta grossa), para os meses de janeiro a dezembro no período histórico de 1975-2004.

Análise do Impacto da Mudança do Clima na Precipitação sobre as Bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai através da Regionalização de Projeções Climáticas

Aline de Assis Benezath; Ana Maria Bueno Nunes; Mauro Cirano; Iago Alvarenga e Silva & Rosmeri Porfírio da Rocha

deste, denominada Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), alcançando a RH Paraná-Paraguai.

Nas Figuras 3D, 3E e 3F observa-se que o modelo HadGEM2 apresenta na América do Sul valores de precipitação próximos ao observado, principalmente na área da bacia do Rio Paraná mais próxima ao oceano. Dessa forma, o HadGEM2 apresenta consistente caracterização da ZCAS, conforme observado na Figura 3A. O ESM2M mostra valores acima do observado sobre a bacia do Rio Paraná, assim como apresenta a ZCAS e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) como o mesmo padrão de precipitação, o que pode justificar os valores modelados acima do observado sobre a RH Paraná-Pa-

raguai e o nordeste do Brasil. O ESM-MR representa os padrões de precipitação semelhantes ao ESM2M, com superestimativa no nordeste do Brasil e na parte oeste da RH, com valores de precipitação próximos do observado apenas na parte leste da RH Paraná-Paraguai.

O HadGEM2 é modelo com melhor desempenho na representação da ZCAS sobre a América do Sul, enquanto o ESM2M e o ESM-MR apresentam a ZCAS conectada com a ZCIT o que não ocorre na observação (não mostrado). Além disso, o ESM-MR não representa a precipitação de fraca intensidade na região da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

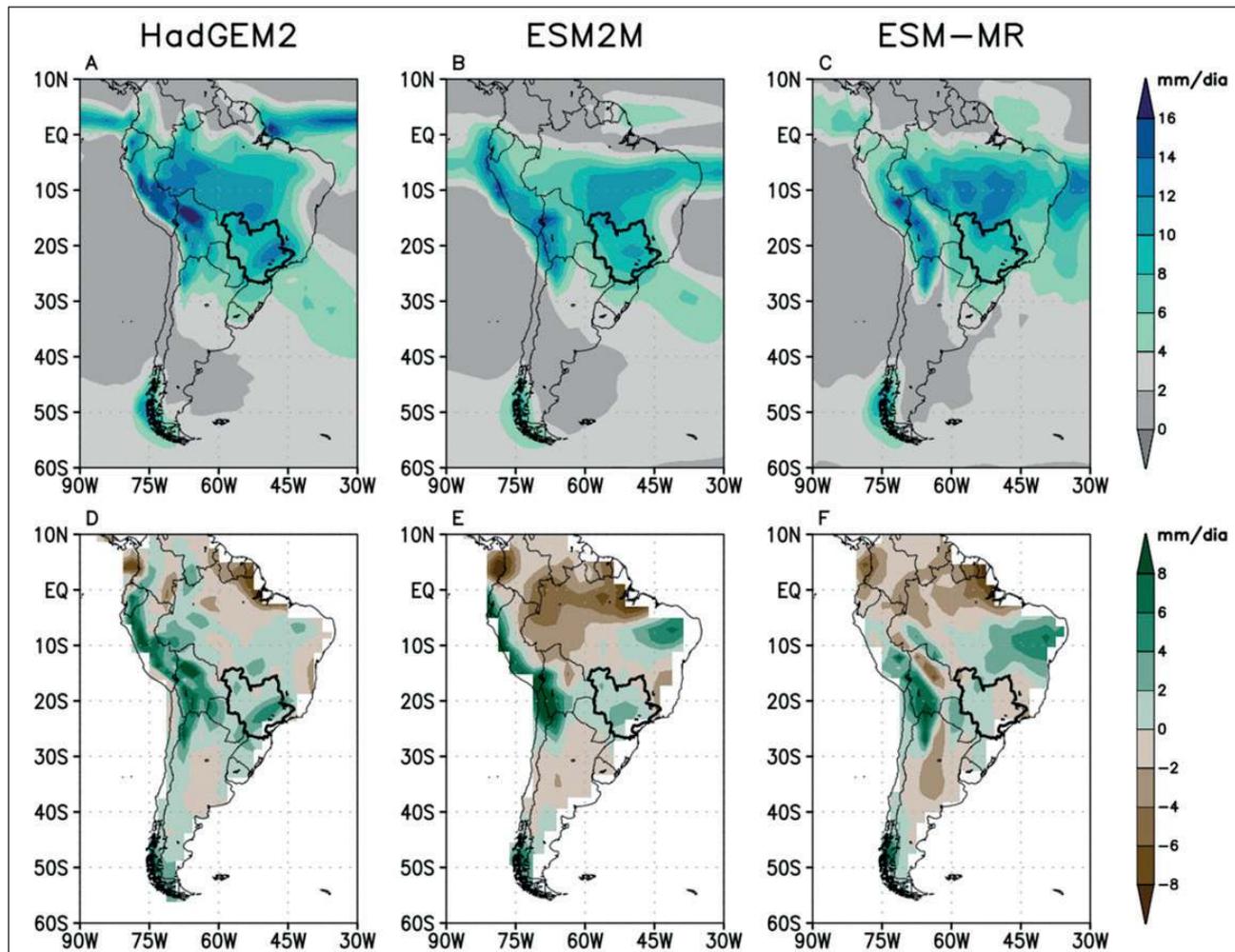


Figura 3 Climatologia da precipitação (mm/dia) em janeiro para o período 1975-2004: A. HadGEM2-ES; B. GFDL-ESM2M; C. ESM-MR. Diferença entre a climatologia dos modelos e o GPCC, para D. HadGEM2 - GPCC; E. ESM2M - GPCC; F. ESM-MR - GPCC. A RH Paraná-Paraguai apresenta seus limites definidos pela linha preta grossa.

3.1.3 Avaliação do Vento em 200 hPa sobre a América do Sul

A Figura 4 mostra a distribuição espacial do vento no nível de 200 hPa a partir dos campos da R1 e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR no mês de janeiro, que corresponde ao mês mais chuvoso sobre a RH Paraná-Paraguai. As linhas de corrente indicam a circulação atmosférica no nível de 200 hPa.

A presença da Alta da Bolívia (AB) é observada próxima à região de máxima precipitação no verão da América do Sul, segundo Zhou & Lau (1998). No mês de janeiro, a AB (representada na Figura 4 pelo núcleo de circulação anticiclônica a oeste da RH) permanece intensa como representada pela R1. Os modelos HadGEM2 e ESM2M simulam a posição da AB semelhante à R1, enquanto no ESM-MR a AB está deslocada para sul. No entanto, os GCMs apresentam uma região mais extensa com atuação de ventos fracos em relação a R1, mostrando uma expansão longitudinal da região de atuação da AB, principalmente no ESM-MR, que não apresenta um cavado no NE do Brasil bem definido a leste da AB no domínio analisado.

Estudos anteriores relacionaram a forte atividade convectiva que ocorre no verão sobre a região tropical da América do Sul com a circulação anticiclônica nos altos níveis da troposfera (e.g., Horel *et al.*, 1989; Jones & Horel, 1990). Jones & Horel (1990) em um estudo sobre a circulação da AB e a atividade convectiva sobre a América do Sul sugeriram

que apesar de fraca, há uma relação consistente entre o movimento da AB e a convecção ao longo dos Andes e nas vizinhanças da ZCAS. Reboita *et al.* (2010) fizeram uma revisão bibliográfica sobre os regimes de precipitação na América do Sul, na qual discutiram o posicionamento a sudoeste da AB, na climatologia de janeiro, em relação ao principal máximo de precipitação que atinge as Regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. A climatologia mensal da precipitação e de vento no nível de 200 hPa apresenta uma correlação positiva entre a ocorrência de precipitação na região SE da América do Sul e a posição da AB e do cavado de NE ao longo da estação de verão.

3.2 Análises da Regionalização

Estudos anteriores mostraram a eficiência na realização da regionalização na análise de variáveis atmosféricas na América do Sul. Sales *et al.* (2015) realizaram a regionalização do HadGEM2 utilizando o RAMS 6.0. Os resultados mostraram que da regionalização resultou uma melhor representação da distribuição de temperatura e do ciclo anual de precipitação.

3.2.1 Precipitação

A Figura 5 mostra o diagrama de Taylor para a precipitação, onde os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR

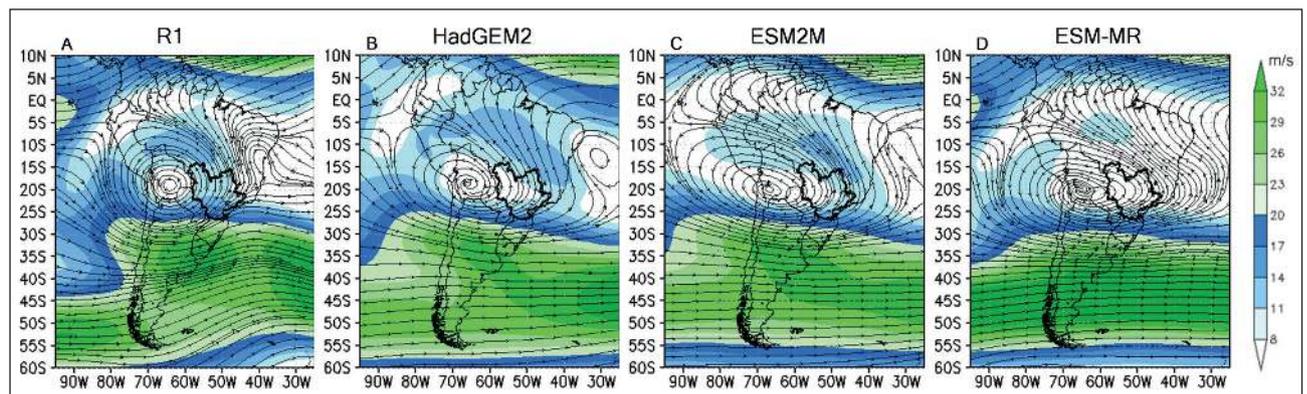


Figura 4 Climatologia mensal do vento (m/s) (área sombreada) e da circulação (linhas de corrente) em 200 hPa sobre a América Sul, com foco na RH Paraná-Paraguai, para o mês de janeiro no período histórico de 1975-2004: A. R1; B. HadGEM2-ES; C. GFDL-ESM2; D. ESM-MR. A RH Paraná-Paraguai apresenta seus limites definidos pela linha preta grossa.

são avaliados em comparação com o GPCC. Os modelos com melhor desempenho na representação da precipitação sobre a RH Paraná-Paraguai são aqueles que apresentam os menores erros quadráticos médios e desvios padrões mais próximos aos do GPCC, e coeficientes de correlação linear mais próximo de 1.

Dentre os modelos globais o HadGEM2 se aproxima mais do GPCC, apresentando 0,62 de correlação linear, 1,8 mm/dia de desvio padrão e 1,4 mm/dia de raiz quadrada do erro quadrático médio. Ao analisar a sua regionalização, RCM4_HadGEM2, nota-se um desempenho semelhante com valores de 0,70 de correlação, 2,0 mm/dia de desvio padrão e 1,4 mm/dia de raiz quadrada do erro quadrático médio. Isso mostra que a regionalização apresenta melhora consistente comparada ao modelo global, com ambos apresentando bons resultados na representação da precipitação sobre a RH Paraná-Paraguai com base no GPCC.

No caso do ESM2M, o coeficiente de correlação linear, o desvio padrão e a raiz quadrada do erro

quadrático médio são próximos aos do HadGEM2, com valores de 0,60, 2,0 mm/dia e 1,6 mm/dia, respectivamente. Já o RCM4_ESM2M apresenta coeficiente de correlação linear ligeiramente superior ao ESM2M, 0,75, mas desvio padrão que se afasta do observado, 2,5 mm/dia, e raiz quadrada do erro quadrático médio de 1,8 mm/dia.

O ESM-MR apresenta desempenho inferior na representação da precipitação, com valores de 0,59 de correlação linear, 1,6 mm/dia de desvio padrão e 1,4 mm/dia de raiz quadrada do erro quadrático médio. A regionalização do ESM-MR, RCM4_ESM-MR, fornece valores de 0,61 de correlação linear, 3,3 mm/dia de desvio padrão (o valor mais distante daquele do GPCC entre todos os modelos considerados) e 2,5 mm/dia de raiz quadrada do erro quadrático médio que é superior aos demais modelos.

Com isso, através da análise do Diagrama de Taylor da precipitação, nota-se que a regionalização realizada com o RegCM4 não apresenta um ganho expressivo na representação da precipitação sobre a RH Paraná-Paraguai em relação aos respec-

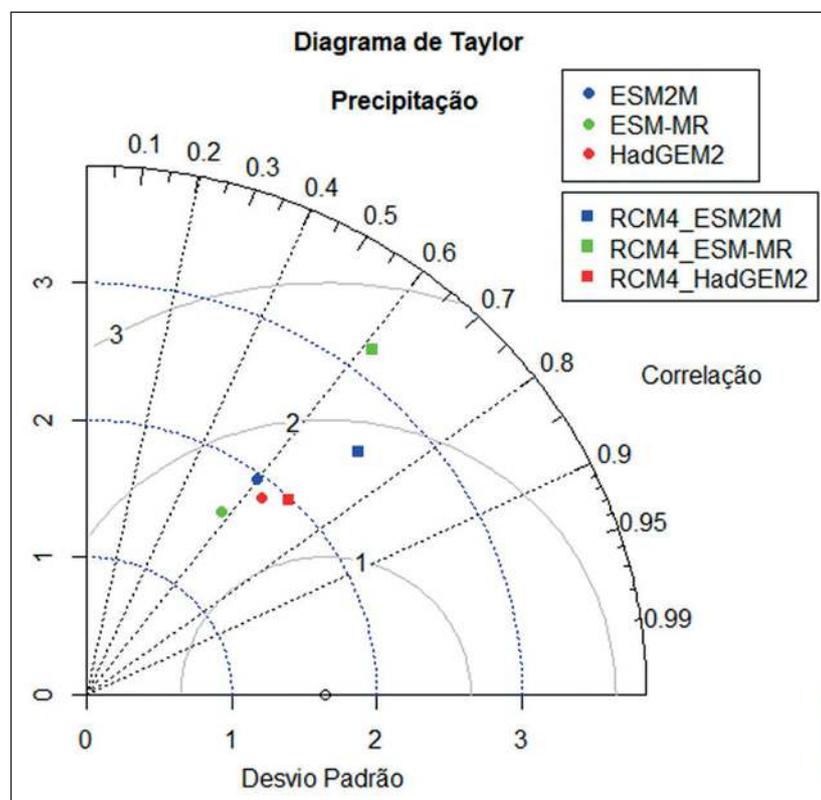


Figura 5 Diagrama de Taylor da precipitação (mm/dia) dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR, tendo como produto de referência o GPCC com resolução de 2,5°x 2,5°, sob o domínio espacial da RH Paraná-Paraguai, para o período histórico 1975-2004.

tivos GCMs. No entanto, na avaliação do modelo global e da respectiva regionalização, é possível observar que o RCM4_HadGEM2 apresenta um bom desempenho em relação ao observado, assim como seu modelo base. O RCM4_ESM-MR mostra o pior desempenho, com valores maiores para a raiz quadrada do erro quadrático médio em comparação aos demais GCMs e suas respectivas regionalizações.

3.3 Projeções Climáticas sobre a Região Hidrográfica Paraná-Paraguai

As projeções climáticas para o mês de janeiro da precipitação e dos componentes da equação de conservação de água superficial (P-E) são analisadas através do fator de mudança entre as projeções do meio do século (2041-2070), e final do século (2071-2100), através das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR.

3.3.1 Precipitação

As Figuras 6A, 6B e 6C mostram o fator de mudança entre a projeção meio do século (2041-2070) e o período histórico (1975-2004). A regionalização RCM4_HadGEM2 apresentou alterações nos valores da precipitação ao longo do tempo, sendo possível observar a heterogeneidade na precipitação entre as regiões nordeste e sudoeste da bacia do Rio Paraná, conforme mencionado anteriormente. Tal fato se dá devido ao aumento dos valores de precipitação na parte nordeste da bacia, enquanto observa-se queda de precipitação na parte sudoeste, mantendo o padrão anteriormente citado. A regionalização RCM4_ESM2M mostrou valores de precipitação próximos ao período histórico em toda a bacia do Rio Paraná, enquanto a regionalização RCM4_ESM-MR apresentou queda nos valores de precipitação em relação ao período histórico.

As Figuras 6D, 6E e 6F mostram o fator de mudança entre a projeção fim do século (2071-2100) e o período histórico (1975-2004). A regionalização RCM4_HadGEM2 mostra aumento da precipitação na maior parte da bacia, com valores próximos ao período histórico apenas na parte sudoeste da bacia, região mais próxima do oceano. Por

outro lado, as regionalizações RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR apresentam valores próximos ao período histórico, com exceção da parte noroeste da bacia, com tendência de aumento da precipitação para o período analisado.

3.3.2 Componentes da Equação de Conservação de Água Superficial (P-E)

As Figuras 7A, 7B e 7C mostram o fator de mudança entre a projeção meio do século (2041-2070) e o período histórico (1975-2004). O fator de mudança entre a precipitação e a evaporação dos períodos meio do século e histórico das regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M indica aumento da relação P-E ao longo do tempo, o que mostra maior contribuição de conservação da água superficial. Ao passo que a regionalização RCM4_ESM-MR projeta uma queda nessa relação na parte sudoeste da RH para o meio do século na região de Itaipu, porém com aumento no final do século na mesma região.

Através das Figuras 7D, 7E e 7F pode-se notar que a contribuição de conservação da água superficial aumenta ao longo do tempo, corroborando o resultado anterior de tendência de aumento da precipitação em direção ao fim do século.

Marengo *et al.* (2012) analisaram a relação de P-E para a bacia do Rio Paraná, utilizando o modelo HadCM3 e o cenário SRES A1B, e concluíram que essa diferença se tornaria maior ao longo do século, o que indica que a bacia se tornará mais úmida, havendo uma contribuição positiva para a conservação de água superficial, o que é consistente com as projeções climáticas do CMIP5-RCP8.5 de precipitação e da relação P-E na RH Paraná-Paraguai apresentadas nas Figuras 6 e 7.

4 Conclusão

Na primeira parte do presente estudo, ao analisar o desempenho dos modelos globais na representação de padrões atmosféricos, conclui-se que o HadGEM2 é o modelo que melhor representa a presença de um padrão característico da ZCAS, quando comparado ao GPCC. Os demais modelos superesti-

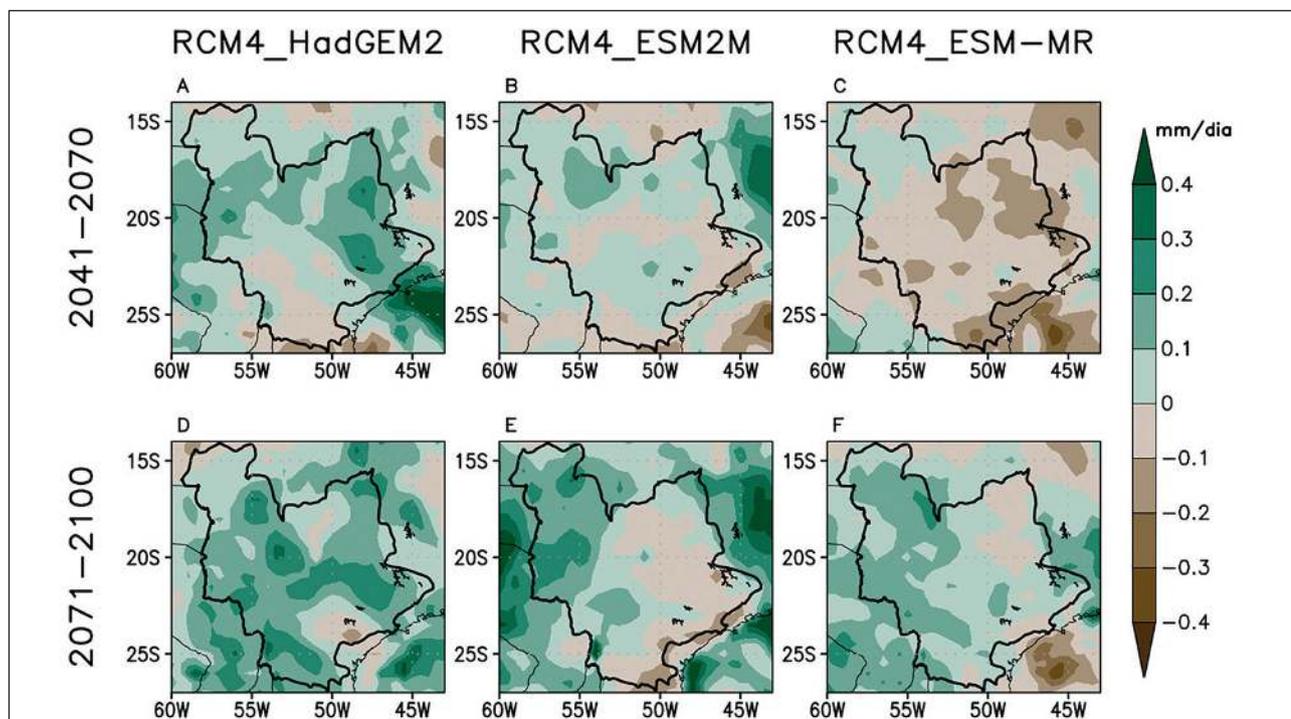


Figura 6 Fator de mudança (em relação ao período histórico 1975-2004) da precipitação (mm/dia) do período meio do século 2041-2070: A. RCM4_HadGEM2; B. RCM4_ESM2M; C. RCM4_ESM-MR e final do século 2071-2100 D. RCM4_HadGEM2; E. RCM4_ESM2M; F. RCM4_ESM-MR sobre a RH Paraná-Paraguai. A RH Paraná-Paraguai apresenta seus limites definidos pela linha preta.

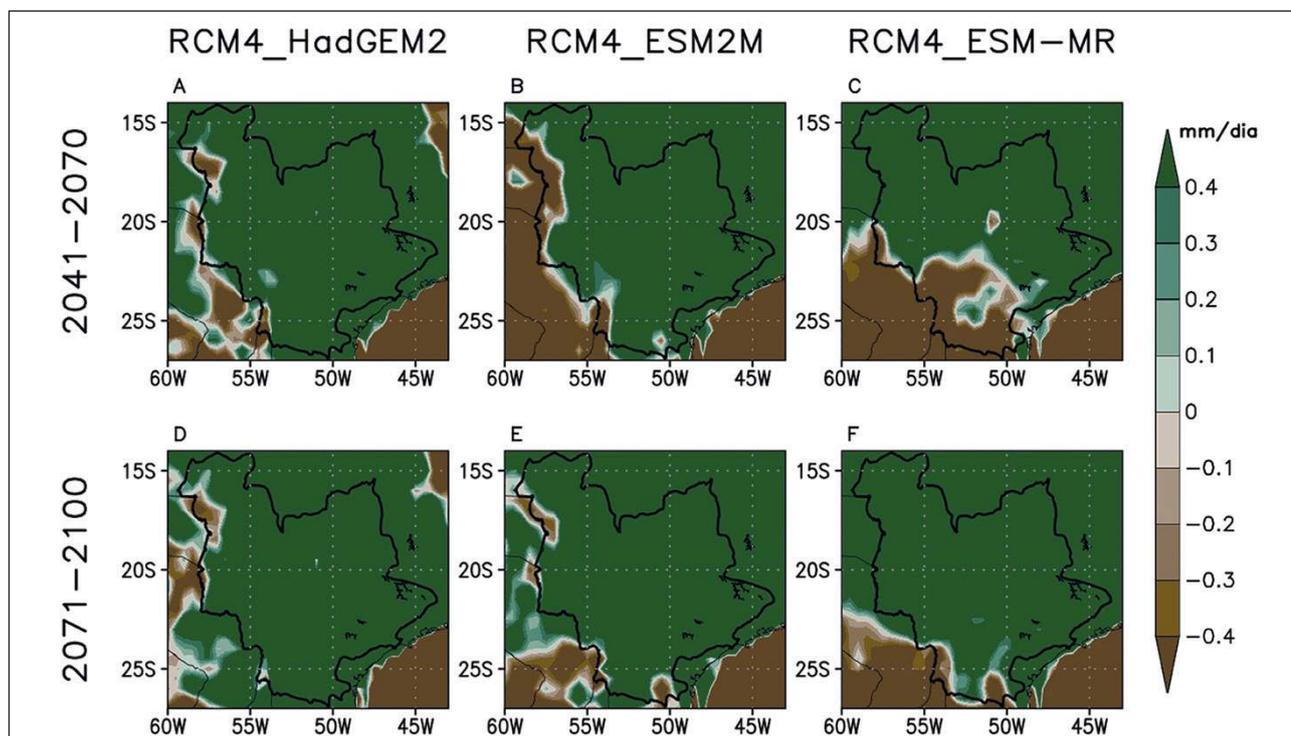


Figura 7 Fator de mudança (em relação ao período histórico 1975-2004) da conservação de água superficial P-E (mm/dia) do período meio do século 2041-2070: A. RCM4_HadGEM2; B. RCM4_ESM2M; C. RCM4_ESM-MR e final do século 2071-2100 D. RCM4_HadGEM2; E. RCM4_ESM2M; F. RCM4_ESM-MR sobre a RH Paraná-Paraguai. A RH Paraná-Paraguai apresenta seus limites definidos pela linha preta. A área em verde escuro indica valores positivos.

mam esse padrão, simulando chuva mais intensa do que as observações. Na análise do vento em altos níveis e da localização da AB, os modelos com melhor desempenho foram o HadGEM2 e o ESM2M, com o ESM-MR apresentando vento mais fracos em torno da AB, sem exibir o cavado no NE do Brasil no domínio analisado, quando comparado a R1.

Na segunda parte, a análise da representação da precipitação pela regionalização, notou-se que o HadGEM2 apresentou bom desempenho comparado com as observações, assim como a sua regionalização, mesmo o RCM4_HadGEM2 não mostrando uma melhoria significativa em relação ao seu modelo global.

Nas projeções climáticas para os períodos futuros, 2041-2070 e 2071-2100, os campos de precipitação mostram que a regionalização RCM4_HadGEM2 indica aumento da precipitação ao longo do século no setor nordeste e diminuição da precipitação no setor sudoeste da RH. A regionalização RCM4_ESM2M não apresenta tendência de mudança na precipitação, enquanto a RCM4_ESM-MR mostra diminuição na precipitação em parte da RH até o meio do século. Para o fim do século, a RCM4_HadGEM2 indica tendência de aumento da precipitação na maior parte da RH, com exceção da sua parte sudeste.

Na análise da conservação de água superficial (P-E) no mês de janeiro, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M não apresentaram tendência de mudança ao longo do século, enquanto a RCM4_ESM-MR simulou valores mais baixos de P-E na região sudoeste da RH para o meio do século (na região de Itaipu) e aumento na relação P-E para toda a RH no fim do século. Com isso, ao analisar o desempenho das regionalizações na representação dos padrões atmosféricos, além da sua avaliação em relação à observação, concluiu-se que a regionalização RCM4_HadGEM2 e seu respectivo modelo global HadGEM2 representaram melhor a precipitação na América do Sul e na região da bacia do Rio Paraná. Considerando que essas características sejam mantidas no futuro, a regionalização RCM4_HadGEM2 da projeção climática na RH Paraná-Paraguai para os períodos futuros analisados seria a mais confiável.

Sendo assim, apesar dos resultados terem de ser utilizados com cautela, por causa da incerteza nas projeções climáticas e de apenas o cenário mais extremo ter sido analisado, as três regionalizações divergiram principalmente no meio do século quanto à redução da precipitação na RH, no mês de janeiro. A diferença entre as regionalizações é realçada na RCM4_ESM-MR que indicou uma redução da precipitação na maior parte da RH, onde está localizada a usina de Itaipu, o que neste caso sugeriria medidas mitigatórias de risco para a manutenção do fornecimento de energia. Para a contribuição da conservação de água superficial, notou-se que as regionalizações apresentaram tendência de alterações menores entre os valores de P-E para o meio e o final do século XXI nas bacias analisadas.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor, o que possibilitou o desenvolvimento dessa pesquisa.

6 Referências

- ANA, 2013. Agência Nacional de Águas: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2013. Anexo 1. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf>. Acesso em: 22 Feb 2019.
- ANA, 2017. Agência Nacional de Águas: Região Hidrográfica do Paraná. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/parana.aspx>>. Acesso em: 25 Ago 2017.
- Blázquez, J. & Nuñez, M.N. 2013. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 41: 1039-1056.
- Dunne, J.P.; John, J.G.; Adcroft, A.J.; Griffies, S.M.; Hallberg, R.W.; Shevliakova, E.; Stouffer, R.J.; Cooke, W.; Dunne, K.A.; Harrison, M.J.; Krasting, J.P.; Malyshev, S.L.; Milly, P.C.D.; Philipps, P.J.; Sentman, L.T.; Samuels, B.L.; Spelman, M.J. Winton, M.; Wittenberg, A.T. & Zadeh, N. 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, 25(19): 6646-6665.
- Emanuel, K.A. & Zivkovic-Rothman, M. 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in cli-

Análise do Impacto da Mudança do Clima na Precipitação sobre as Bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai através da Regionalização de Projeções Climáticas

Aline de Assis Benezath; Ana Maria Bueno Nunes; Mauro Cirano; Iago Alvarenga e Silva & Rosmeri Porfírio da Rocha

- mate models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56: 1766-1782.
- ENES, 2018. European Network for Earth System Modelling: CMIP5 Models and Grid Resolution. Disponível em: <<https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution>>. Acesso em: 28 Dez 2018.
- Fowler, H.J.; Blenkinsop, S. & Tebaldi, C. 2007. Linking climate change Modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*, 27(12): 1547-1578.
- Giorgi, F.; Coppola, E.; Solmon F.; Mariotti, L.; Sylla, M.B.; Bi, X.; Elguindi, N.; Diro, G.T.; Nair, V.; Giuliani, G.; Turuncoglu, U.U.; Cozzini, S.; Güttler, I.; T. A. O'Brien, T.A.; Tawfik, A.B.; Shalaby, A.; Zakey, A.S.; L. Steiner, A. L.; Stordal, F.; Sloan, L.C. & Brankovi, C. 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7-29.
- Giorgi, F. 2014. Introduction to the special issue: the phase I CORDEX RegCM4 hyper-matrix (CREMA) experiment. *Climatic Change*, 125(1): 1-5.
- Giorgetta, M.; Jungclaus, J.; Reick, C.; Legutke, S.; Brovkin, V.; Crueger, T.; Esch, M.; Fieg, K.; Glushak, K.; Gayler, V.; Haak, H.; Hollweg, H-D.; Kinne, S.; Kornbluh, L.; Matei, D.; Mauritsen, T.; Mikolajewicz, U.; Müller, W.; Notz, D.; Raddatz, T.; Rast, S.; Roeckner, E.; Salzmann, M.; Schmidt, H.; Schnur, R.; Segschneider, J.; Six, K.; Stockhause, M.; Wegner, J.; Widmann, H.; Wieners, K-H.; Claussen, M.; Marotzke, J. & Stevens, B. 2012. CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-LR model: The rcp85 experiment, served by ESGF. *World Data Center Climate*.
- Horel, J.D.; Hahmann, A.N. & Geisler, J.E. 1989. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2: 1388-1403.
- Jones, C. & Horel, J.D. 1990. A Circulação da Alta da Bolívia e a atividade convectiva sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 5(1): 379-387.
- Jones, C. & Carvalho, L.M.V. 2013. Climate Change in the South American Monsoon System: Present Climate and CMIP5 Projections. *Journal of Climate*, 26(17): 6660-6678.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R. & Joseph, D. 1996. The NMC/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 437-471.
- Krepper, C.M.; Garcia, N.O. & Jones, P.D. 2006. Paraguay river basin response to seasonal rainfall. *International Journal of Climatology*, 26: 1267-1278.
- Krepper, C.M. & Venturini, V. 2009. Assessing interannual water balance of La Plata river basin. *Atmosfera*, 22(4): 387-398.
- Llopart, M.; Coppola, E.; Giorgi, F.; da Rocha, R.P. & Cuadra, S.V. 2014. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Climatic Change*, 125: 111-125.
- Marengo, J.A.; Jones, R.; Alves, L.M. & Valverde, M.C. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15): 2241-2255.
- Marengo, J.A.; Ambrizzi, T.; da Rocha, R.P.; Alves, L.M.; Cuadra, S.V.; Valverde, M.C.; Torres, R.R.; Santos, D.C. & Ferraz, S.E.T. 2010a. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate Models. *Climate Dynamics*, 35(6): 1089-1113.
- Marengo, J.A.; Rusticucci, M.; Penalba, O. & Renom, M. 2010b. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98(3-4): 509-529.
- Marengo, J.A.; Chou, S.C.; Kay, G.; Alves, L.M.; Pesquero, J.F.; Soares, W.R.; Santos, D.C.; Lyra, A.A.; Sueiro, G.; Betts, R.; Chagas, D.J.; Gomes, J.L.; Bustamante, J.F. & Tavares, P. 2012. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CP-TEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River basins. *Climate Dynamics*, 38(9-10): 1829-1848.
- Martin, G.M.; Bellouin, N.; Collins, W.J.; Culverwell, I.D.; Halloran, P.R.; Hardiman, S.C.; Hinton, T.J.; Jones, C.D.; McDonald, R.E.; McLaren, A.J.; O'Connor, F.M.; Roberts, M.J.; Rodriguez, J.M.; Woodward, S.; Best, M.J.; Brooks, M.E.; Brown, A.R.; Butchart, N.; Dearden, C.; Derbyshire, S.H.; Dharssi, I.; Doutriaux-Boucher, M.; Edwards, J.M.; Falloon, P.D.; Gedney, N.; Gray, L.J.; Hewitt, H.T.; Hobson, M.; Huddleston, M.R.; Hughes, J.; Ineson, S.; Ingram, W.J.; James, P.M.; Johns, T.C.; Johnson, C.E.; Jones, A.; Jones, C.P.; Joshi, M.M.; Keen, A.B.; Liddicoat, S.; Lock, A.P.; Maidens, A.V.; Manners, J.C.; Milton, S.F.; Rae, J.G.L.; Ridley, J.K.; Sellar, A.; Senior, C.A.; Totterdell, I.J.; Verhoef, A.; Vidale, P.L. & Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of Met Office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3): 723-757.
- Nunes, A.M.B. & Roads J.O. 2007. Influence of Precipitation Assimilation on a Regional Climate Model's Surface Water and Energy Budgets. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 642-664.
- Palomino-Lemus, R.; Cordoba-Machado, S.; Gamiz-Fortis, S.R.; Castro-Diez, Y. & Esteban-Parra, M.J. 2015. Summer precipitation projections over northwestern South America from CMIP5 models. *Global and Planetary Change*, 131: 11-23.
- Pumo, D.; Caracciolo, D.; Viola, F. & Noto, L.V. 2016. Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. *Science of the Total Environment*, 542: 76-92.
- Raia, A. & Cavalcanti, I. F. A. 2008. The life cycle of the South American Monsoon System. *Journal of Climate*, 21: 6227-6246.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; da Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2): 185-204.
- Roads, J.; Lawford, R.; Bainto, E.; Berbery, E.; Chen, S.; Fekete, B.; Gallo, K.; Grundstein, A.; Higgins, W.; Kanami-

Análise do Impacto da Mudança do Clima na Precipitação sobre as Bacias do Rio Paraná e do Rio Paraguai através da Regionalização de Projeções Climáticas

Aline de Assis Benezath; Ana Maria Bueno Nunes; Mauro Cirano; Iago Alvarenga e Silva & Rosmeri Porfírio da Rocha

- tsu, M.; Krajewski, W.; Lakshmi, V.; Leathers, D.; Lettenmaier, D.; Luo, L.; Maurer, E.; Meyers, T.; Miller, D.; Mitchell, K.; Mote, T.; Pinker, R.; Reichler, T.; Robinson, D.; Robock, A.; Smith, J.; Srinivasan, G.; Verdin, K.; Vinnikov, K.; Vonder Haar, T.; Vörösmarty, C.; Williams, S. & Yorosh, E. 2003. GCIP water and energy budget synthesis (WEBS). *Journal Geophysical Research*, 108(D16): 8609, doi: 10.1029/2002JD002583.
- Sales, D.C.; Costa, A.A.; Da Silva, E.M.; Vasconcelos Júnior, F.C.; Cavalcante, A.M.B.; Medeiros, S.S.; Marin, A.M.P.; Guimarães, S.O.; Araújo Junior, L.M. & Pereira, J.M.R. 2015. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(4): 435-456.
- Schneider, U.; Becker, A.; Finger, P.; Meyer-Christoffer, A.; Ziese, M. & Rudolf, B. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-control led in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2): 15-40.
- Tawfik, A.B. & Steiner, A.L. 2011. The role of soil ice in land-atmosphere coupling over the United States: a soil moisture precipitation winter feedback mechanism. *Journal of Geophysical Research*, 116: D02113, doi: 10.1029/2010JD014333
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysical Research*, 106(D7): 7183-7192.
- Taylor, K.E.; Stouffer, R.J. & Meehl, G.A. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiments design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): 485-498.
- Zhou, J. & Lau, K.M. 1998. Does a Monsoon Climate exist over South America? *Journal of Climate*, 11(5): 1020-1040.