

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

ALINE DE ASSIS BENEZATH

O USO DA REGIONALIZAÇÃO DE PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA ANÁLISE
DOS EFEITOS DA MUDANÇA DO CLIMA SOBRE A BACIA DO PARANÁ

Orientadores: Ana Maria Bueno Nunes
Mauro Cirano

RIO DE JANEIRO - RJ

2017

O USO DA REGIONALIZAÇÃO DE PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA ANÁLISE
DOS EFEITOS DA MUDANÇA DO CLIMA SOBRE A BACIA DO PARANÁ

ALINE DE ASSIS BENEZATH

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia, PPGM, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadores: Ana Maria Bueno Nunes
Mauro Cirano

Rio de Janeiro

Setembro de 2017

**O USO DA REGIONALIZAÇÃO DE PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA ANÁLISE
DOS EFEITOS DA MUDANÇA DO CLIMA SOBRE A BACIA DO PARANÁ**

ALINE DE ASSIS BENEZATH

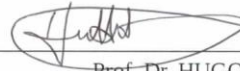
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.



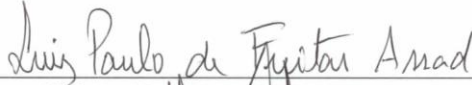
Prof. Dr. ANA MARIA BUENO NUNES



Prof. Dr. MAURO CIRANO



Prof. Dr. HUGO ABI KARAM



Prof. Dr. LUIZ PAULO DE FREITAS ASSAD



Prof. Dr. ALEXANDRE MACEDO FERNANDES

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e serenidade em todo o caminho do Mestrado. À minha família, meu pai, irmã e cunhado por toda a força nesse processo.

Gostaria de agradecer meu marido Peterson em especial, que me apoiou desde o início, ainda quando esse projeto era apenas um processo seletivo, um sonho. Obrigada por ter me ouvido nos momentos mais difíceis, por nunca ter me deixado desistir, por ter me mostrado que valeria a pena, por ter sempre me mostrado o lado bom de tudo.

Gostaria também de agradecer aos meus professores Ana Nunes e Mauro Cirano por todo o aprendizado e conhecimento ao longo dessa caminhada. Mas, não poderia esquecer uma pessoa, que foi uma base muito forte, em toda a minha trajetória nessa universidade, meu grande amigo (irmão) Iago. Sempre incansável em me ensinar meteorologia, disponível, amigo, paciente (nem tanto). Mas quero te agradecer de coração, por tudo.

E não poderia deixar de agradecer uma pessoa, que não esteve fisicamente comigo nesse processo, mas que sem dúvidas foi minha inspiração em muitos momentos, minha mãe Denise (*in memoriam*). Muito obrigada por ter me ensinado a ter determinação, força, vontade de estudar e de aprender, e por ter me ensinado que o conhecimento é a base de tudo. Dedico mais essa vitória a você!

Agradeço também a Universidade Federal do Rio de Janeiro, por ter me dado condições de terminar esse ciclo acadêmico, à Capes, pela bolsa que me permitiu dedicação exclusiva aos estudos, e a Prof. Dr^a Rosmeri por ter cedido os produtos necessários a execução desse trabalho.

RESUMO

A bacia do Paraná é uma das bacias hidrográficas mais importantes para o setor de energia no Brasil. Uma análise da precipitação sobre a bacia do Paraná no século XXI é realizada usando modelos climáticos para avaliar mudanças no ciclo hidrológico. Além da precipitação, este estudo avalia a capacidade dos modelos climáticos em representar os padrões climatológicos da circulação de verão da América do Sul que afetam o ciclo hidrológico na bacia, utilizando uma reanálise global nas comparações. As integrações climáticas dos Modelos de Circulação Geral (em inglês, General Circulation Models–GCMs) são realizadas para o período histórico, 1975-2004, e para as projeções, 2041-2070 e 2071-2100. As projeções climáticas utilizadas nesse 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 média mensal climatológica é calculada nos períodos histórico e das projeções para modelo climático regional, RegCM4, no âmbito do Coordinated Regional Downscaling Experiment project, o que permite análises mais detalhadas na bacia. 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 ESM-MR. A regionalização do HadGEM2 mostra uma correlação da precipitação maior com produtos observacionais. Quanto à diferença entre precipitação e evaporação, uma contribuição positiva é encontrada nas projeções durante os meses de verão na bacia do Paraná.

ABSTRACT

Paraná river basin is one of the most important river basins for the energy sector in Brazil. An evaluation of Paraná river basin precipitation during the 21st century is performed using climate models to assess changes in the water cycle. In addition to precipitation, this study evaluates the ability of climate models to represent the climatological patterns of South American summer circulation that impact the hydrological cycle in the basin for the current climate, using a global reanalysis product. Climate integrations of General Circulation Models (GCMs) are performed for the historical period, 1975-2004, 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. Monthly means averaged over the historical and projection periods from the regional climate model, RegCM4, within the Coordinated Regional Downscaling Experiment project, allow for more detailed analyzes in the basin. 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 improved precipitation correlation with the gauge-based products. As for the difference between precipitation and evaporation, positive contribution is found in the projections during the summer months in Paraná river basin.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Mapa da bacia hidrográfica do Paraná

Figura 2 – Diagrama de Taylor

Figura 3 – Esquema simplificado da contribuição de P-E na variação local de água na bacia do Paraná

Figura 4 – Climatologia anual sobre a bacia do Paraná com o uso do produto do GPCC no período histórico 1975-2004.

Figura 5 – Climatologia mensal de precipitação sobre a bacia do Paraná com o uso do produto do GPCC no período histórico 1975-2004.

Figura 6 – Gráfico de barra da precipitação nas regiões nordeste e sudoeste da bacia do Paraná com o uso do GPCC e dos três modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR durante o período histórico 1975-2004.

Figura 7 – Climatologia mensal da precipitação com o uso dos produtos do GPCC e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 8 – Climatologia mensal da diferença de precipitação entre o produto de referência do GPCC e os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR sobre a América do Sul.

Figura 9 – Climatologia mensal do vento em 200 hPa com o uso dos produtos da R1 e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 10 - Climatologia mensal do transporte de umidade em 850 hPa com o uso dos produtos da R1 e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 11 – Diagrama de Taylor da precipitação com os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR comparados com o GPCC de resolução 0,5° latitude x 0,5° longitude, sob o domínio da bacia do Paraná.

Figura 12 – Climatologia mensal da precipitação com o uso do produto do GPCC e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 13 – Climatologia mensal da diferença de precipitação entre o produto do GPCC e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 14 – Diagrama de Taylor da temperatura com os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR comparados com o CRU de resolução 0,5° latitude x 0,5° longitude, sob o domínio da bacia do Paraná.

Figura 15 – Climatologia mensal da temperatura através do produto do CRU e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 16 – Climatologia mensal da diferença de temperatura entre o produto do CRU e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro sobre a América do Sul.

Figura 17 – Climatologia mensal da precipitação com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de dezembro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná.

Figura 18 – Climatologia mensal da precipitação com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de janeiro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná.

Figura 19 - Climatologia mensal da diferença de temperatura entre os períodos meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 e o período histórico 1975-2004 com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de dezembro sobre a bacia do Paraná.

Figura 20 - Climatologia mensal da diferença de temperatura entre os períodos meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 e o período histórico 1975-2004 representada pelas regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de janeiro sobre a bacia do Paraná.

Figura 21 – Climatologia mensal dos componentes da equação de conservação de água superficial (P-E) com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de dezembro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná.

Figura 22 – Climatologia mensal dos componentes da equação de conservação de água superficial (P-E) com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de janeiro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das resoluções dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR

Tabela 2 – Principais características do modelo RegCM4

Tabela 3 – Resolução horizontal das variáveis da R1 e do GPCC utilizados como referência para avaliação dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR.

LISTA DE ABREVIações

AB - Alta da Bolívia
AR4 - Fourth Assessment Report
AR5 – Assessment Report 5
CMIP – Coupled Model Intercomparison Project
CORDEX – COordinated Regional Downscaling Experiment
CREMA - CORDEX RegCM4 hyperMAtrix
CRU – Climate Research Unit
ESM2M – Earth System Model 2M
ESM-MR – Earth System Model Midle Resolution
ETA – CCS - Eta climate change simulation
FAR – Fourth Assessment Report
GEOS - 1 - Goddard Earth Observing System 1
GCM – Global Climate Model
GPCC - Global Precipitation Climatology Centre
GRADS - Grid Analysis and Display Sistem
HadAM3P - Hadley Centre Global Atmospheric Model 3
HadCM3 - Hadley Centre Coupled Model version 3
HadGEM2 - Hadley Global Environmental Model Earth System
HadRM3P - Hadley Center Regional Model
IPCC - Intergovernmental Panel Climate Change
JBNAS – Jato de Baixos Níveis da América do Sul
LM - Land Model
MIROC5 - Model for Interdisciplinary Research on Climate 5
NCEP - National Centers for Environmental Prediction
NCAR - National Center for Atmospheric Research
RCM – Regional Climate Model
RCP – Representative Concentration Pathway
RegCM – Regional Climate Model
R1 – Reanálise 1
SAR - Second Assessment Report
SMAS – Sistema de Monção da América do Sul
SRES - Special Report on Emission Scenarios
TAR - Third Assessment Report
WCRP - World Climate Research Programme
ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURA	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIACÕES	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Sistemas atuantes no regime de precipitação sobre a América do Sul	4
2.2 O IPCC e as Mudanças Climáticas	8
2.3 Mudanças Climáticas na América do Sul	12
2.4 As mudanças climáticas nas bacias hidrográficas da América do Sul	16
3. METODOLOGIA	17
3.1 Área de Estudo	17
3.2 Modelos Globais	19
3.3 Modelo Regional RegCM4	21
3.4 Produtos Utilizados	22
3.5 Métodos de avaliação	23
4. RESULTADOS	28
4.1 Avaliação dos Modelos Globais	28
4.2 Análises da Regionalização	37
4.3 Projeções Climáticas sobre a bacia do Paraná	46
5. CONCLUSÕES	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês, *Intergovernmental Panel Climate Change – IPCC*), no quinto relatório de avaliações (em inglês, *assessment report 5 - AR5*) (IPCC, 2013), as mudanças climáticas são alterações no estado do clima associadas a mudanças nas médias e/ou variabilidade das propriedades relevantes acima de um longo período de tempo. Essas mudanças estão associadas a alterações nas concentrações de gases do efeito estufa nos últimos 200 anos.

Segundo Sarkar (2015) e Baettig *et al.* (2007), aumentos na temperatura e no nível médio dos oceanos, derretimento de gelo e neve, e alterações na temperatura do ar e no regime de precipitação são indicadores de aquecimento global e mudanças climáticas. Baettig *et al.* (2007) relatou que a média do clima global tende a tornar-se mais úmida, havendo mudanças mais fortes nos trópicos, subtropicais e altas latitudes.

Estudos anteriores identificaram as Américas Central e Sul como regiões com alta vulnerabilidade para mudanças climáticas, com destaque na região tropical (IPCC, 2007). Tais regiões são vulneráveis a climas extremos atualmente e poderiam ser afetadas por um clima mais quente no futuro (MARENGO *et al.*, 2010a; TORRES *et al.*, 2012; TORRES e MARENGO, 2013).

Os regimes hidrológicos são altamente dependentes de fatores climáticos, dentre os quais o mais importante é a precipitação, podendo influenciar a frequência, a intensidade e a distribuição sazonal de eventos de chuva (PUMO *et al.*, 2015). A extensão espacial e temporal de 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.*, 2011). As projeções realizadas em mudanças climáticas apresentam variação de precipitação sobre regimes hidrológicos, e os impactos podem afetar a disponibilidade de recursos de água e a existência de ecossistemas ribeirinhos em regiões de maior vulnerabilidade (PUMO *et al.*, 2015; MARENGO *et al.*, 2011).

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 (e.g. MARENGO *et al.*, 2010a, b; MARENGO *et al.*, 2011). 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 e 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 do sistema. Alguns estudos têm identificado uma melhor representação do clima na América do sul através do CMIP5. Torres e Marengo (2013) descreveram o Brasil e a Bolívia como sendo os países da América do Sul que exibem maior impacto das mudanças climáticas. Por exemplo, o Sul da Amazônia, a região Centro-Oeste e a porção oeste do estado de Minas Gerais são vistos como *hotspots*¹ climáticos persistentes, em relação à temperatura e precipitação.

No entanto, o estudo de mudanças na precipitação em escala regional é um desafio para os GCMs devido à sua baixa resolução espacial incapaz de representar mudanças regionais confiáveis. Então, com a necessidade de resolver a deficiência de resolução dos GCMs, a regionalização (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 Model* - 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 significativos. (FOWLER *et al.*, 2007; MARENGO *et al.*, 2009; PALOMINO-LEMUS *et al.*, 2015).

Devido a necessidade do uso de RCMs para estudos de processos em menores escalas, foi criado o COordinated Regional Downscaling Experiment

¹Hotspots: são regiões nas quais as mudanças climáticas projetadas são maiores, tornando a área mais sensível a possíveis impactos.

(CORDEX). O programa coordenado pelo World Climate Research Programme (WCRP), é um quadro coordenado para produzir uma geração aprimorada de projeções climáticas regionais, através do método de regionalização dinâmico e estatístico, ao redor do mundo através de estudos com modelos globais pertencentes ao CMIP5.

Estudos em mudanças climáticas apontam a América do Sul como uma região com alta relevância em se tratando de alterações climáticas, pela importância de se entender os potenciais impactos no ambiente, sociedade e economia (JONES e CARVALHO, 2013). A compreensão das respostas dos regimes hidrológicos diante das mudanças climáticas se faz necessário para melhorar a gestão de inundações e baixos fluxos de precipitação, a revisão de alocação de água para diferentes setores tais como residências, agricultura, saúde humana, desenvolvimento e planejamento urbano, indústrias e geração de energia elétrica (SARKAR, 2015).

A bacia do Paraná, localizada na região sudeste da América do Sul, possui extrema importância na geração de energia elétrica, agricultura e no ecossistema local, sendo por isso necessário a realização de projeções das mudanças climáticas na região, principalmente com o uso da regionalização, a fim de analisar mudanças futuras e gerar medidas mitigatórias.

1.1 Objetivo

Este estudo tem como principal objetivo analisar o impacto das mudanças climáticas na bacia do Paraná, através da redução de escala, feita a partir de um modelo dinâmico regional (doravante, regionalização), de um conjunto de modelos climáticos globais do CMIP5, no âmbito do CORDEX.

Dentre os objetivos específicos incluem-se:

- Avaliação da representação do clima corrente pelos modelos globais com foco nos sistemas que afetam a bacia do Paraná.
- Estimativa do ganho obtido pela regionalização dinâmica dos modelos globais na representação dos sistemas que afetam a bacia do Paraná.
- Análise da mudança na temperatura e precipitação, assim como da relação da precipitação e evaporação na área da bacia, através da

regionalização dinâmica, usando o cenário RCP 8.5, considerada a forçante mais severa apresentada no CMIP5.

Na seção 2 a seguir será apresentada a área de estudo com os principais padrões atmosféricos atuantes na América do Sul. Em seguida, uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de modelos climáticos, tanto os globais quanto regionais, nas mudanças climáticas, com foco nas bacias hidrográficas da América do Sul. Na seção 3, a metodologia, onde serão detalhados os modelos utilizados e explicitadas as análises realizadas no presente estudo. Na seção 4, serão apresentados os resultados referentes às três etapas posteriormente explicitadas do presente estudo, e na seção 5 serão apresentadas as principais conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada nessa seção tem como finalidade fundamentar a importância do estudo das mudanças climáticas e seus efeitos sobre a América do Sul com foco nas bacias hidrográficas. Desta forma, primeiramente será apresentado uma breve descrição dos principais sistemas atuantes na área de estudo. Logo após será descrito o histórico das mudanças climáticas, assim como a evolução da modelagem através do IPCC. Em seguida, os principais estudos sobre as mudanças climáticas na América do Sul, assim como o resultado dessas alterações nas bacias hidrográficas, utilizando o CMIP3 e CMIP5 e seus respectivos cenários.

2.1 Sistemas atuantes no regime de precipitação sobre a América do Sul

Nessa subseção será realizada uma breve descrição sobre os principais sistemas meteorológicos atuantes no regime de precipitação sobre a América do Sul.

2.1.1 Sistema de Monção da América do Sul (SMAS)

Dentre as definições de sistema de monção, a mais simples consiste na reversão sazonal da direção do vento sobre uma região, causando verões chuvosos e invernos secos, segundo Moran e Morgan (1986). Embora, a região

central da América do Sul apresente uma sazonalidade de precipitação bem definida, devido à ausência da reversão dos ventos em baixos níveis durante a mudança das estações, não era considerada uma região com presença de circulação de monção.

Com base na evolução sazonal de algumas características da circulação atmosférica, Zhou e Lau (1998) em um estudo utilizando o sistema de assimilação de dados do *Goddard Earth Observing System-1* (GEOS-1) mostraram que o sistema existe sobre a América do Sul. Para eles, a reversão sazonal da direção do vento em baixos níveis ocorre quando a componente anual média é removida.

Durante o verão, após remover o ciclo anual, o escoamento de nordeste em baixos níveis associado à Alta Subtropical do Atlântico Norte, entra na região tropical da América do Sul. Em seguida, os ventos em baixos níveis mudam de direção de nordeste para noroeste, devido à conservação de vorticidade absoluta e ao efeito de barreira provocado pela Cordilheira dos Andes, convergindo então para a região central da América do Sul. Por sua vez, no inverno esse escoamento em baixos níveis apresenta uma reversão de sentido.

Enquanto isso, em altos níveis, uma circulação anticiclônica, conhecida como Alta da Bolívia (AB) é observada próximo da região de máxima precipitação no verão (ZHOU E LAU, 1998). A AB consiste em um núcleo quente aproximadamente ao nível de 200 hPa, com altas temperaturas desde a superfície atingindo o máximo no nível de 300 hPa e com topo frio (LENTERS e COOK, 1997).

O início do SMAS de verão é caracterizado pela formação de convecção sobre o noroeste da região Amazônica que se estende em seguida na direção sudeste da América do Sul, intensificando-se progressivamente. Na maior parte da região Central e Sudeste do Brasil, a estação chuvosa pode iniciar entre setembro e novembro e terminar entre março e abril, período de início e de decaimento do SMAS. Durante a fase madura do SMAS (novembro a fevereiro) a maior atividade convectiva do núcleo da monção é observada na região central do Brasil (GAN *et al.*, 2004), apresentando dissipação em direção ao equador no período de decaimento do SMAS.

Em um estudo sobre as mudanças na circulação atmosférica da América do Sul, durante os períodos de transição das estações seca e chuvosa, Gan *et al.* (2004) analisaram a inversão do vento zonal no início e no término da estação chuvosa. Os resultados apresentaram ventos de leste (oeste) em baixos (altos) níveis durante a estação seca, e o inverso na estação chuvosa. Através da análise do Diagrama de Hovmöller analisando a precipitação sobre a América do Sul observaram o início do sistema de monção no começo de setembro, próximo aos Andes, propagando-se para o Sudeste, atingindo a região em dezembro.

O transporte de umidade do Oceano Atlântico e a evapotranspiração da floresta Amazônica contribuem para a precipitação sobre as regiões Central e Sudeste, favorecendo a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante os meses de verão. Rocha *et al.* (2014) em uma análise sobre a América do Sul utilizando as regionalizações realizadas no CORDEX com o uso do Regional Climate Model 4 (RegCM4), o ensemble dos membros do RegCM4 e de três modelos globais, o Earth System Model 2M (ESM2M), o Earth System Model Middle Resolution (ESM-MR) e o *Hadley Global Environmental Model Earth System* (HadGEM2-ES), observaram no verão uma banda de precipitação de 4-6 mm/dia, vindo da Amazônia em direção a região sudeste do Brasil, o que indicaria a fase inicial do SMAS, segundo Vera *et al.* (2006).

Segundo GRIMM (2011), ao analisar a variabilidade climática interanual na América do Sul e os possíveis efeitos das mudanças climáticas, percebeu que o SMAS tem papel importante para o transporte de umidade para a região central da América do Sul, assim como para a configuração da ZCAS. O SMAS tem relação direta com a ZCAS, modulando o ciclo sazonal da precipitação sobre a América do Sul tropical em distintas estações seca e chuvosa.

2.1.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A atividade convectiva no Brasil se inicia no oeste da bacia Amazônica no início de agosto e segue nos meses seguintes em direção ao Sudeste. As Regiões Sudeste e Centro-Oeste têm suas estações chuvosas compreendidas

entre dezembro e fevereiro. Essa atividade convectiva enfraquece na região tropical em meados de março, início de abril.

Durante o verão, observa-se a presença de uma banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que se estende da Amazônia até o Sudeste e frequentemente até o oceano Atlântico Subtropical. Essa característica climatológica que se associa a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera é denominada ZCAS (KODAMA, 1992a).

Durante os meses de verão do Hemisfério Sul, a ZCAS é um fenômeno atmosférico que exerce um papel importante no regime de chuvas da região onde atua, acarretando em altos índices pluviométricos. A manutenção da ZCAS deve-se à contribuição da umidade que pode ser gerada localmente, pela evapotranspiração, ou transportada de outras áreas para a região da ZCAS. A precipitação durante um evento de ZCAS é alimentada pelo aporte de umidade em baixos níveis, gerado tanto pelo escoamento para sul proveniente da região da monção, como pelo escoamento da periferia sudoeste da alta subtropical.

Lima *et al.* (2010), através da análise dos dados de postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas e dos campos de umidade específica, componentes meridional e zonal do vento da Reanálise 1, analisaram as principais características sinóticas associadas a eventos de precipitação extrema sobre o sudeste brasileiro, e observaram que a presença da ZCAS na estação de verão é um dos principais padrões meteorológicos responsáveis pela precipitação na região Sudeste.

Em um estudo analisando o transporte de umidade entre os trópicos e subtropicais associado à ocorrência ou não da ZCAS, Herdies *et al.* (2002) concluíram que este transporte se dá por dois caminhos principais: um associado à presença da ZCAS e outro ao Jato de Baixos Níveis (JBN).

2.1.3 Jatos de Baixos Níveis (JBN)

Os Jatos de Baixos Níveis são fluxos meridionais na baixa atmosfera que ocorrem em alta velocidade (acima de 10 m/s) no lado leste de uma topografia elevada e são associados a movimentos de grande escala que cobrem áreas extensas, como a Cordilheira dos Andes na América do Sul (MARENGO *et al.*, 2009). Na América do Sul, esses jatos de baixos níveis são

conhecidos como Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS), que consiste em um componente do SMAS com o papel de transportar umidade da região Amazônica para a bacia Paraná-Prata, influenciando no clima da região leste dos Andes.

No verão, a advecção de ar quente e úmido realizada pelo JBNAS, associado com a redução da estabilidade vertical da atmosfera, provocam a convecção sobre a região amazônica e sobre a região Central do Brasil. A baixa do Chaco e a AB são respostas regionais ao intenso aquecimento convectivo (VERA *et al.*, 2006).

O transporte de umidade atmosférica inicia no fluxo dos ventos alísios presente sobre a Amazônia, assimilando umidade devido à evapotranspiração na região da floresta. Com isso, esse fluxo sofre mudança de direção devido ao bloqueio topográfico, fluindo paralelamente em direção ao Sul/Sudeste do Brasil e norte da Argentina. Marengo *et al.* (2004) em um estudo sobre os JBNAS verificaram que esse transporte apresenta um ciclo anual de forma que no verão, a umidade que vai para a bacia Paraná-Prata é em grande parte proveniente da Amazônia, enquanto no inverno, esse transporte ganha um novo componente de origem oceânica associado ao ciclo anual da Alta Subtropical do Atlântico Sul.

Devido a grande relevância no abastecimento de água e de energia às principais cidades do Brasil, o estudo sobre o comportamento da precipitação associada a padrões atmosféricos atuantes na região, assim como do escoamento de água superficial em climas futuros, torna-se fundamental para uma melhor gestão política, permitindo avaliações prévias e ações mitigatórias.

2.2 O IPCC e as Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas têm sido discutidas ao longo dos anos pela comunidade científica, através dos relatórios emitidos pelo IPCC, que têm fornecido uma perspectiva histórica sobre o entendimento da ciência climática e as evidências da influência humana em alterações no sistema climático da Terra. A influência antropogênica, além de alterar as concentrações atmosféricas de gases associados ao efeito estufa, altera o fornecimento de energia e de água do planeta através de mudanças na superfície da Terra,

como a redistribuição do balanço entre os fluxos de calor latente e sensível (IPCC, 1990).

O IPCC em 1988 avaliou resultados de pesquisas científicas relacionadas à emissão de maiores concentrações de gases do efeito estufa e a consequente mudança no balanço radiativo da Terra, avaliando os impactos socioeconômicos e ambientais relacionados às mudanças climáticas e a formulação de estratégias de resposta. Tais estudos do IPCC foram emitidos no *First Assessment Report* (FAR) que propôs uma avaliação dos fatores relevantes às mudanças climáticas no próximo século, em especial aqueles associados a ações antropogênicas e a resposta do sistema climático a tais mudanças (IPCC, 1990). O FAR utilizou modelos climáticos nos estudos das respostas do sistema climático diante das alterações nas concentrações dos gases do efeito estufa.

Em seguida foi elaborado o *Second Assessment Report* (SAR), que discutiu os potenciais impactos das mudanças climáticas nos sistemas ecológicos, físicos, socioeconômicos, e a vulnerabilidade do sistema climático à tais alterações. Esses estudos tiveram como proposta medidas de mitigação relacionadas a emissões futuras dos gases do efeito estufa, fornecendo a base para as negociações-chave que levaram a adoção do Protocolo de Kyoto, em 1997 (IPCC, 1995).

O *Third Assessment Report* (TAR) ampliou o estudo sobre os aspectos de mitigação das mudanças climáticas realizadas no IPCC anterior, tendo como principal objetivo a identificação da influência humana na mudança do clima. Em seus resultados, pode-se verificar que as mudanças observadas são consistentes com respostas estimadas devido a uma combinação de efeitos antropogênicos e naturais (IPCC, 2001).

Durante a organização do TAR no final dos anos 90, um conjunto de cenários de emissão foi produzido e documentado no *Special Report on Emission Scenarios* (SRES). Estes cenários abrangiam as principais iniciativas que influenciavam as emissões de gases do efeito estufa, como estruturas alternativas de sistema de energia e mudanças no uso da terra. No entanto, nenhum desses cenários incluiu mitigações de ações políticas (NAKICENOVIC *et al*, 2000)

Um esforço da comunidade científica para executar um conjunto coordenado de simulações climáticas, para os séculos XX e XXI, foi realizado a partir do *Fourth Assessment Report (AR4)*. O relatório apresentou um progresso nos estudos das mudanças climáticas e no entendimento da influência humana no aumento da emissão de gases do efeito estufa, em relação ao TAR. Para isso, houve a inclusão de dados novos, uma análise de dados mais elaborados, melhora no entendimento de processos e suas simulações em modelos.

Durante o IPCC (2007) houve um processo para coordenar um conjunto de experimentos abrangendo muitos aspectos das mudanças e de variabilidade climática a serem realizados através de uma ampla quantidade de modelos possível com uso do estado-da-arte de GCMs. Esse esforço foi sintetizado pela comunidade científica no CMIP3, que teve como objetivo realizar análises de simulações históricas e de projeções climáticas utilizando cenários de emissão representando forçantes baixas (B1), médias (A1B) e altas (A2) de emissão dos gases do efeito estufa para projeção de climas futuros (MEEHL *et al.*, 2007).

O AR5 teve como objetivo descrever os efeitos das forçantes radiativas dos gases do efeito estufa e aerossóis, mudanças observadas nas temperaturas atmosféricas, alterações no ciclo hidrológico incluindo precipitação e nuvens, e mudanças na ocorrência de eventos extremos, levando em consideração mitigações de ação política (IPCC, 2013). Algumas questões que surgiram durante a preparação do AR4, foram então analisadas, em tempo, pelo CMIP5 no AR5.

O CMIP5 permitiu a avaliação dos mecanismos responsáveis pela ocorrência de resultados ainda não compreendidos, associados com o ciclo do carbono e a presença de nuvens. Da mesma forma, os modelos permitiram a análise da previsibilidade climática e exploração da capacidade de previsão de sistemas em escalas de tempo de décadas. O CMIP5 teve também como objetivo a determinação dos motivos pelos quais modelos forçados similarmente apresentam respostas distintas.

Como discutido anteriormente, relativo ao CMIP3, o CMIP5 inclui modelos mais abrangentes e exige um conjunto mais amplo de experimentos que requer uma variedade maior de questões científicas. Em contraste com os

cenários descritos no SRES usados no CMIP3, o qual não incluía intervenções políticas, o CMIP5 apresentou um conjunto de cenários conhecidos como *Representative Concentration Pathway* (RCP), os quais são cenários de mitigação, que assumem ações políticas, com a intenção de alcançar certas metas em relação à emissão dos gases do efeito estufa (TAYLOR *et al.*, 2012)

Segundo Moss *et al.* (2010) os RCPs quando aplicados às mudanças climáticas permitem avaliar as incertezas associadas à contribuição humana, à resposta do sistema climático em relação às atividades humanas, às incertezas do impacto do clima futuro e das diferentes abordagens de mitigação e adaptação. Então para isso, quatro RCPs foram formulados baseados no alcance de projeções futuras do crescimento populacional, desenvolvimento tecnológico e respostas sociais influenciando na emissão de gases do efeito estufa na atmosfera (TAYLOR *et al.*, 2012). Esses cenários foram nomeados como RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, o que representa a estimativa da forçante radiativa, para o ano de 2100, de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$, $4,5 \text{ W.m}^{-2}$, $6,0 \text{ W.m}^{-2}$ e $8,5 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente, relativas às condições pré-industriais (TAYLOR *et al.*, 2012; MOSS *et al.*, 2010).

Dessa forma, estudos baseados em modelos climáticos definiram a existência de alguns indicadores padrão das mudanças climáticas, como temperatura e precipitação, os quais são utilizados para definição de locais com maior tendência a variações climáticas (e.g BAETTIG *et al.*, 2007; SARKAR, 2015; TORRES *et al.*, 2012; TORRES e MARENGO, 2013). Tais estudos mostraram que há aumento na temperatura do sistema climático associado à elevação do nível de gases do efeito estufa na atmosfera, apresentando maior aquecimento em algumas regiões.

Sutton *et al.* (2007) observaram que há um aumento mais significativo da temperatura superficial no continente em relação aos oceanos como resposta aos níveis elevados dos gases do efeito estufa. Baettig *et al.* (2007) em um estudo sobre as principais regiões impactadas pelas mudanças climáticas relatou que a média do clima global tende a tornar-se mais úmido, havendo mudanças mais fortes nos trópicos, subtropicais e altas latitudes.

2.3 Mudanças Climáticas na América do Sul

As Américas Central e Sul são consideradas regiões com alta vulnerabilidade para mudanças climáticas, com destaque na região tropical (IPCC, 2007). Essas regiões são vulneráveis à climas extremos, ondas de frio e calor, chuvas intensas, inundações, períodos de seca, em todas as estações, sendo estes alguns indicativos de que esses locais seriam fortemente afetados por um clima mais quente (MARENGO *et al.*, 2009; TORRES *et al.*, 2012).

Essa região possui uma economia fortemente dependente da agricultura, além de ter uma matriz energética dominada pela energia renovável, como a energia hidrelétrica, a qual é altamente susceptível as mudanças climáticas, o que gerou maior esforço na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na América do Sul, em especial nas bacias hidrográficas do Brasil.

Vera *et al.* (2006) realizaram simulações utilizando modelos do IPCC-AR4, a fim de analisar mudanças na climatologia da AS, no cenário de mudanças climáticas SRES A1B do CMIP3. Os resultados mostraram que os modelos reproduziram as principais feições relacionadas ao ciclo sazonal de precipitação. Com isso, observaram aumento na precipitação de verão no sudeste, declínio da precipitação no inverno na maior parte do continente e na região sul dos Andes. Contudo, a precipitação na região da ZCAS e o máximo de precipitação sobre o sudeste da América do Sul durante a estação fria não foram bem representadas.

Vera e Silvestri (2009) realizaram uma análise da variabilidade sazonal interanual com os modelos do WCRP-CMIP3. Os resultados mostraram que os modelos reproduzem a migração para o norte da variabilidade de precipitação máxima nos trópicos durante a estação fria e seu posterior retorno ao sul durante a primavera e verão. Contudo, os modelos apresentaram problemas em descrever propriamente a variabilidade interanual da ZCAS, uma feição importante no sistema climático sobre a América do Sul durante o verão.

Alguns estudos, utilizando modelos do CMIP3, analisaram séries históricas e projeções climáticas com base nos cenários de emissão do SRES A2 e B2 do IPCC para climas futuros. MARENGO *et al.* (2009) observaram para o período histórico de 1961-1990 e para o futuro de 2071-2100, que em

todos os cenários climáticos, a América do Sul apresentou diferenças significativas na precipitação e temperatura extremas. Notaram também, no futuro, aumento de noites quentes e declínio de noites frias na região tropical, além de mudanças significativas na precipitação e períodos de seca. Isso inclui aumento nos eventos de precipitação extrema no sudeste da América do Sul e oeste da Amazônia. No Nordeste e no leste da Amazônia foram observadas poucas mudanças na intensidade da precipitação no futuro.

Marengo *et al.* (2010a) utilizando três modelos regionais, o Eta climate change simulation (Eta-CCS), o RegCM3 e o Hadley Center Regional Model (HadRM3P), forçados pelo modelo global *Hadley Centre Global Atmospheric Model 3* (HadAM3P) realizaram projeções do cenário de alta emissão A2 do CMIP3. Os resultados mostraram, no futuro, queda no regime de precipitação no Nordeste e no sul da Amazônia, enquanto no noroeste da costa do Peru-Ecuador e norte da Argentina, houve aumento na precipitação em um futuro mais quente, sendo tais mudanças variáveis de acordo com as estações do ano. Além disso, os três modelos apresentaram aquecimento na região tropical, tanto no verão quanto no inverno, com a temperatura variando de 6-8°C acima do valor atual. Já na região Sul da América do Sul, o verão (inverno) apresentou uma variação positiva de 2-4°C (3-5°C).

Torres *et al.* (2012) desenvolveram uma análise dos resultados de alguns GCMs do CMIP3, os quais permitiram a avaliação da análise climática e da vulnerabilidade sócio-climática da população diante das mudanças climáticas. Nas regiões oeste do Nordeste e noroeste do estado de Minas Gerais observaram declínio na precipitação durante o inverno e diferença na variabilidade interanual de temperatura e precipitação tanto no inverno quanto no verão. Na Região Centro-Oeste houve diferença nas variabilidades de precipitação interanual e média no inverno e de temperatura no verão, enquanto na região norte, notou-se diferença nas variabilidades de temperatura no verão e precipitação no inverno.

Jones e Carvalho (2013), utilizando modelos do CMIP5 e o cenário de emissão RCP 8.5, estudaram as características de grande-escala do SMAS como amplitude sazonal, datas de início e término, e duração do sistema durante o período histórico 1951-2005 e futuro de 2006-2100. As simulações apresentaram aumento na amplitude sazonal, na ocorrência de inícios

precoces, de términos tardios e na duração do sistema, durante o período. Além disso, notaram um aumento na amplitude de 30% nas projeções para os anos de 2045-2050 em relação ao período histórico, assim como adiantamento de 14 dias no início e atraso de 17 dias no término do sistema no futuro. No entanto, os resultados mais consistentes das projeções analisadas dos modelos do CMIP5 foram de mudanças na precipitação na estação úmida sobre a América do Sul.

Em um estudo comparativo utilizando o CMIP3 e CMIP5 e seus respectivos cenários, Torres e Marengo (2013) estudaram para o período histórico de 1961-1990, e para o futuro, 2071-2100, os possíveis *hotspots* de mudanças climáticas na América do Sul. Os resultados mostraram que os dois conjuntos de modelos apresentam distribuição espacial bastante similar. Na região Nordeste e no noroeste do estado de Minas Gerais, os modelos apresentaram um declínio da precipitação no inverno e mudanças na variabilidade interanual da temperatura e precipitação tanto no inverno, quanto no verão. A região Centro-oeste apresentou mudanças na variabilidade média e interanual da precipitação no inverno e de temperatura no verão. Já na região Norte, houve variabilidade interanual de temperatura e precipitação em ambas as estações.

Chou *et al.* (2014) realizaram simulações da regionalização usando o modelo regional Eta forçado por dois modelos globais, o HADGEM2-ES e o Model for Interdisciplinary Research on Climate 5 (MIROC5), em dois RCPs, 4.5 e 8.5. Os resultados mostraram que o maior aquecimento ocorreu nas regiões Central e Sudeste, progredindo em direção ao norte do continente. No Sudeste por sua vez, houve redução no regime de precipitação. Ambos os modelos apresentaram queda na precipitação no fim do século XXI, apresentando valores extremos na frequência de temperatura e precipitação, com destaque nos eventos de precipitação extrema no sudeste da América do Sul.

Sales *et al.* (2015) realizaram simulações de regionalização dinâmica no contexto do projeto CORDEX, utilizando o Regional Atmospheric Modeling System versão 6.0 (RAMS6.0) forçado pelo modelo HadGEM2-ES. O domínio de estudo correspondeu às Américas Tropicais, com foco em duas sub-regiões no Nordeste Brasileiro: Norte e Sul. Nessas regiões foram analisadas as três

“fatias de tempo” futuras sobre o cenário climático RCP8.5. Os resultados mostraram que o modelo regional permite uma melhor representação de alguns aspectos do clima, como a distribuição espacial da temperatura e a fase do ciclo anual de precipitação. Para o clima futuro, ambos os modelos observaram mudanças na precipitação, como a redução no inverno e primavera em médio e longo prazo (exceto o HadGEM2-ES sobre o sul do NE brasileiro em médio prazo), e o aumento no verão nos três períodos futuros analisados, assim como aumento da temperatura ao longo do século XXI.

Rocha *et al.* (2014) investigaram o sinal de precipitação característico do El-Niño durante a primavera sobre a América do Sul através da regionalização de três modelos globais, o ESM-MR, o ESM2M e o HadGEM2-ES forçando o RegCM4. O período histórico consistiu de 1975-2005 e as projeções foram realizadas de 2020-2050 e 2070-2098 utilizando dois cenários de emissão do CMIP5, o RCP4.5 e o RCP8.5. Na análise das projeções com cenário mais extremo (RCP8.5), os modelos projetam um aumento (declínio) na frequência de El-Niño (La-Niña) para o futuro mais distante. No clima presente, o RegCM4 reproduziu as principais feições da precipitação de primavera na América do Sul, assim como a diferença de precipitação entre os anos de El-Niño e La-Niña sobre o sudeste da América do Sul, apresentando maior similaridade com os produtos observados do que com os modelos globais. Na escala regional, o RegCM4 apresentou em ambos os futuros um aumento (declínio) da precipitação de primavera sobre o sudeste (norte-nordeste) da América do Sul.

Llopart *et al.* (2014) utilizando os produtos da regionalização de três modelos globais (MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES) forçando o RegCM4, analisaram os impactos locais e remotos das mudanças climáticas sobre o hidroclima das Bacias Amazônica e do Prata na América do Sul. O período analisado consistiu de 1970-2100 com os cenários de emissão RCP 8.5 para as projeções ao longo do século XXI. Os resultados mostraram que a regionalização apresentou melhorias na simulação do ciclo anual de precipitação sobre ambas as bacias em relação aos modelos globais. Os modelos mostraram um declínio no regime de precipitação sob a Bacia Amazônica no futuro, com máximo na estação seca e especialmente na fase inicial do Sistema de Monção. Na bacia do Prata os modelos apresentaram no

futuro aumento de precipitação na estação úmida e declínio durante a estação seca.

2.4 As mudanças climáticas nas bacias hidrográficas da América do Sul

Marengo *et al.* (2011) utilizando o modelo regional ETA-CPTEC forçado pelo *Hadley Centre Coupled Model version 3* (HadCM3), através do cenário de emissão SRES A1B, realizaram simulações para o período histórico de 1961-1990 e para o futuro próximo (2011-2040), meados do século XXI (2041-2070) e futuro distante (2071-2100). Na Amazônia e Nordeste do Brasil notaram redução de precipitação acima de 40%, enquanto no nordeste da costa Peru-Ecuador e sudeste da América do Sul verificaram aumento da precipitação, com aumento acima de 30% no norte da Argentina. A regionalização realizada no ETA através do cenário A1B mostrou o balanço entre a precipitação e evaporação, que sugeriu um déficit de água e redução do escoamento no leste da Bacia Amazônia e na Bacia de São Francisco, tornando essas regiões mais susceptíveis à ocorrência de secas no futuro.

DeMaria *et al.* (2013) realizaram um conjunto de projeções utilizando modelos do CMIP3 e CMIP5 a fim de avaliar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia hidrográfica Mataquito na região central do Chile, América do Sul, utilizando os cenários de emissão médio e alto de ambos os conjuntos de modelo. A regionalização por método estatístico foi aplicado na temperatura e precipitação máxima e esses resultados foram usados em um modelo hidrológico. Em relação aos resultados do CMIP3 e CMIP5, as projeções climáticas apresentam pequenas diferenças para a bacia, de forma que as análises mostraram queda na precipitação anual no fim do século XXI, na projeção de 2070-2099, assim como apresentaram aumento na temperatura média para o ano de 1960 até o fim do século 2100. Como consequência do aumento de temperatura e declínio da precipitação, houve uma redução de 50% da área da bacia no futuro.

Marengo *et al.* (2015) em um estudo na bacia hidrográfica Paraguai, utilizou o modelo regional Eta-HadGEM2 ES para realizar projeções para os futuros 2011-2040 e 2071-2100 no cenário RCP8.5 do CMIP5. Os resultados

mostraram aquecimento médio anual variando entre 2,5-3,5°C nos anos de 2011-2040 e de 5-7°C nos anos de 2071-2100. A precipitação apresentou uma redução de 30% para o fim do século XXI. Essas mudanças teriam como consequência aumento no déficit de água, principalmente nas partes central e leste da bacia durante a primavera e o verão, o que afetaria o pulso do rio Paraguai devido ao balanço entre precipitação e evaporação.

3. METODOLOGIA

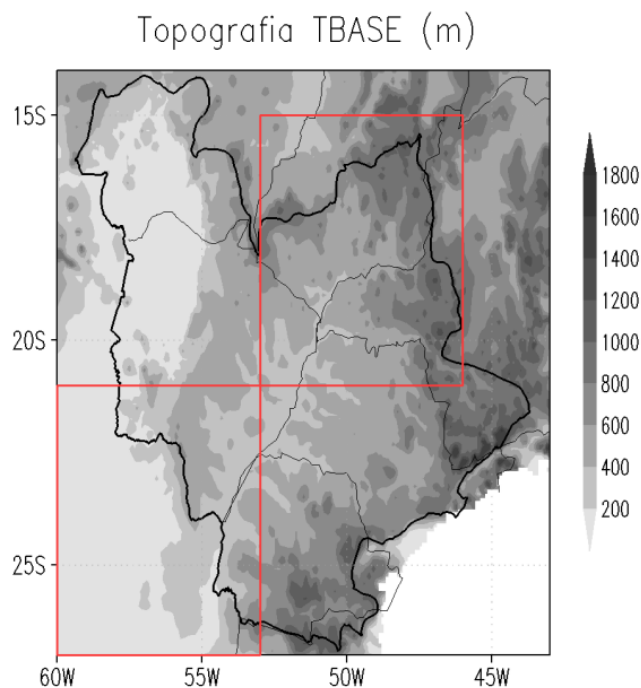
Nessa seção serão apresentadas as metodologias para as análises sobre as mudanças projetadas sobre a América do Sul, com foco na Bacia do Paraná, através da regionalização de três modelos globais com o uso do CORDEX – RegCM4.

3.1 Área de Estudo

O conceito de bacia hidrográfica vem sendo difundida por diversos autores (TEODORO *et al.*, 2007). Barrela *et al.* (2007) definiu como sendo um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação das nascentes e do lençol freático.

A bacia hidrográfica do Paraná (Figura 1) é a segunda maior na América do Sul, originando-se na confluência dos rios Grande e Paranaíba na região Sudeste do Brasil, e possui um fluxo na direção sudoeste, escoando no estuário do Prata. Essa bacia é fonte de água, alimento e energia para milhões de pessoas, e está conectada às maiores cidades da América do Sul, como São Paulo e Buenos Aires. Além disso, há a presença da usina hidrelétrica de Itaipu, localizada no Rio Paraná, no limite do Brasil com Paraguai.

No presente estudo foi realizada uma análise setorial da bacia, conforme mostrado na Figura 1. A bacia foi dividida em duas regiões, já que na análise das mudanças intrasazonais da precipitação, notou-se um gradiente de precipitação entre a região nordeste (mais úmida) e a região sudoeste (mais seca) da bacia em questão.



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 de que a construção de hidrelétricas ao longo da bacia tem impedido seu uso como meio de transporte, o impacto dessas construções na economia tem sido compensatório (ANA, 2017).

A Região Hidrográfica do Paraná possui a maior demanda por recursos hídricos do País, equivalente a $736 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a 31% da demanda nacional. A irrigação é a maior usuária de recursos hídricos (42% da demanda total), seguida do abastecimento industrial (27%), segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017).

A região sudeste abriga grande parte da população brasileira, apresentando alta densidade demográfica e responde por uma parcela importante das atividades econômicas do país. Sua população corresponde a 42% do total populacional do país, segundo uma estimativa feita pelo Ministério da Saúde. Tais fatos tornam a região Sudeste sensível às condições climáticas, por possuírem alta demanda na agropecuária, além do abastecimento urbano e geração de energia (NUNES *et al.*, 2009).

A região Sudeste é localizada na borda oriental da América do Sul e apresenta do ponto de vista climático um fluxo de energia solar considerável ao longo do ano, distribuição da precipitação irregular no espaço e no tempo, assim como elevada evaporação em setores mais ao norte e continentais (NUNES *et al.*, 2009). Tais fatores são de extrema importância na região, pois influenciam nos aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos.

A precipitação apresenta considerável variação inter e intra-anual devido à relação entre as forçantes de grande escala, os distúrbios de mesoescala e condições locais como topografia, exposição de vertentes e uso da terra.

3.2 Modelos Globais

Os modelos utilizados no presente estudo foram escolhidos seguindo o critério estabelecido pelo CORDEX RegCM4 hyperMAtrix (CREMA), descritos por Giorgi (2014). Na fase inicial do CREMA, três GCMs foram selecionados do CMIP5, devido a disponibilidade dos campos de periodicidade de 6h necessários como condição de contorno na regionalização através do RegCM4. Os modelos globais escolhidos fazem parte do CMIP5 e são o HadGEM2-ES (MARTIN *et al.*, 2011), o ESM2M (DUNNE *et al.*, 2012) e o ESM-MR (GIORGETTA *et al.*, 2012). Nesse estudo, as projeções climáticas foram realizadas utilizando o cenário de emissões RCP 8.5, que é considerado o cenário mais extremo, de acordo com MOSS *et al.* (2010).

A Tabela 1 apresenta as resoluções horizontal e vertical e as coordenadas verticais dos modelos.

Tabela 1: Descrição das resoluções dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR.

Modelos Globais	Componente Atmosférica	Descrição
HadGEM2	Resolução Horizontal	1,25° latitude x 1,875° longitude
	Resolução Vertical	38 níveis
	Coordenada Vertical	Z
ESM2M	Resolução Horizontal	2° latitude x 2,5° longitude
	Resolução Vertical	24 níveis
	Coordenada Vertical	Híbrida (Sigma-Theta)
ESM-MR	Resolução Horizontal	1,875° latitude x 1,875° longitude
	Resolução Vertical	95 níveis
	Coordenada Vertical	Sigma

3.2.1 HadGEM2-ES

O modelo global HadGEM2-ES é um modelo da família HadGEM2, o qual engloba processos da troposfera, hidrologia e superfície terrestre, aerossóis, ciclo do carbono terrestre, biogeoquímica e química oceânica.

As características da componente atmosférica acoplada ao HadGEM2-ES estão explicitados na Tabela 1.

O esquema de superfície terrestre presente no HadGEM2-ES é o MOSES II (ESERY *et al.*, 2003). Esse esquema foi escolhido para desenvolvimento uma vez que as trocas superficiais influenciam diretamente o esquema de vegetação e o ciclo de carbono terrestre. A configuração de lagos em MOSES II não varia com o clima, de forma que as áreas permanecem constantes e a evaporação dos lagos esgota a umidade do solo.

O módulo hidrológico de grande-escala aprimora a umidade do solo e conseqüentemente a distribuição da vegetação, e fornece funcionalidade adicional tais como a simulação de zonas úmidas para a interação da emissão de metano. O módulo hidrológico (CLARK e GEDNEY, 2008) é baseado na aproximação TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979) através da qual a umidade do solo e o *runoff* são afetados pela topografia local, a meteorologia, a vegetação e as propriedades do solo.

3.2.2 ESM2M

O modelo atmosférico utilizado pelo ESM2M é o AM2 definido e modificado por Anderson *et al.* (2004), sendo suas principais características descritas na Tabela 1.

O ESM2M possui o modelo de superfície *Land Model 3.0* (LM3.0), que representa os ciclos de água, energia e carbono. Esse modelo inclui uma representação vertical contínua da umidade do solo, abrangendo zonas saturadas e não saturadas, representação do gelo no solo, parametrização da altura do lençol freático e fração de área saturada. Assim como a representação do transporte horizontal da vazão fluvial, lagos e pacotes de gelo nos lagos, além da conservação de energia no conteúdo de calor sensível da água.

O LM3.0 apresenta interação solo-neve-vegetação e três fontes de água: neve, zona de raiz e lençol freático. Além disso, possui 18 níveis de temperatura do solo a 6 m de profundidade, armazenamento de calor latente no solo, parâmetros de superfície dependentes de 8 solos e 8 tipos de vegetação.

3.2.3 ESM-MR

O modelo atmosférico utilizado pelo ESM-MR é o ECHAM6 (GIORGETTA *et al.*, 2013). As principais características do modelo são apresentadas na Tabela 1.

O modelo de superfície acoplado ao ESM-MR é o JSBACH, que fornece condições de limite atmosféricas mais baixas sobre a terra. O JSBACH é baseado na cobertura da área de terra, e inclui vegetação dinâmica com 12 tipos funcionais de planta e dois tipos de área nua. A hidrologia do solo é descrita por um simples modelo de camada única e a temperatura é modelada sobre cinco camadas do solo.

3.3 Modelo Regional RegCM4

O modelo regional RegCM4 é o aprimoramento do modelo antecessor, o RegCM3, descrito por Pal *et al.* (2007). As principais características do modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Principais características do modelo RegCM4.

RegCM4	DESCRIÇÃO
Resolução Horizontal	50 km
Resolução Vertical	18 níveis
Coordenada Vertical	Sigma

Os processos de superfície terrestre do RegCM4 são descritos pelo esquema de transferência atmosfera-biosfera (DICKINSON *et al.*, 1993). Esse esquema possui um modelo de restauração para temperaturas do solo, um esquema de solo de três camadas, e uma simples parametrização de *runoff* superficial. O esquema inclui 20 tipos de superfície e 12 tipos de textura do solo. Além disso, uma configuração de superfície terrestre de ponto de sub-

grade pode ser usado, de forma que cada ponto de grade do modelo é dividido dentro de uma sub-grade regular, e processos de superfície terrestre são calculados nos pontos de sub-grade levando em conta o uso da terra-local e a topografia (GIORGI *et al.*, 2003).

O RegCM4 possui acréscimo de 2 tipos de uso da terra a fim de representar ambientes urbanos e suburbanos. O desenvolvimento urbano não modifica apenas o albedo superficial e o balanço de energia superficial, mas também gera superfícies impenetráveis, com grande influência no *runoff* e na evapotranspiração.

No desenvolvimento do CREMA uma série de testes preliminares com diferentes esquemas físicos sobre vários domínios foram conduzidos com condições de contorno dos diferentes GCMs e somente as configurações com melhor desempenho foram escolhidas, segundo GIORGI (2014). A Tabela 3 mostra o esquema de convecção e o de superfície da Terra usado de acordo com o GCM aplicado como condição de contorno.

MODELO	ESQUEMA DE CONVECÇÃO	ESQUEMA DE SUPERFÍCIE DA TERRA
RMC4_HadGEM2-ES	Emanuel	Community Land Model 3.5 (CLM 3.5)
	Grell – continente Emanuel - oceano	Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS)
RCM4_ESM-MR	Emanuel	CLM 3.5
RCM4_ESM2M	Emanuel	CLM 3.5

3.4 Produtos Utilizados

A fim de realizar uma análise dos modelos globais, serão utilizadas as médias mensais do vento meridional e zonal em 200 hPa, assim como da umidade específica, da Reanálise 1 (R1) (KALNAY *et al.*, 1996) do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR). A escolha da R1 se deve ao fato de que esses produtos apresentam o período escolhido para análise. Os dados de precipitação em

médias mensais foram obtidos pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC). A Tabela 3 descreve as resoluções horizontais da R1 e do GPCC.

Tabela 3: Resolução horizontal das variáveis da R1 e do GPCC utilizados como referência para a avaliação dos modelos globais.

Variável	R1 (KALNAY <i>et al.</i> , 1996)	GPCC(SCHNEIDER <i>et al.</i> , 2013)
Precipitação	-	2,5° x 2,5°
Vento Zonal e Meridional	2,5° x 2,5°	-
Umidade específica	2,5° x 2,5°	-

Na análise do ganho obtido pela regionalização, as médias mensais da precipitação foram obtidas do GPCC. A resolução do GPCC utilizado nessa análise foi de 0,5° latitude x 0,5° longitude. Enquanto na análise da temperatura, o produto de referência utilizado foi o *Climatic Research Unit* (CRU) de 0,5° latitude x 0,5° longitude.

3.5 Métodos de avaliação

A avaliação das projeções climáticas e de suas respectivas regionalizações é dividida em três fases. A primeira fase tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos globais, na representação dos principais padrões atmosféricos atuantes sobre a precipitação na região sudeste da América do Sul. A segunda fase visa verificar o ganho (*value-added*) obtido na regionalização em relação aos modelos globais. Por fim, a terceira fase tem como objetivo realizar análises com as três regionalizações do RegCM4 com foco na área da bacia do Paraná.

3.5.1 Avaliação dos Modelos Globais

A primeira parte do presente estudo compreende a avaliação da capacidade dos modelos globais em caracterizar os padrões de circulação de verão atuantes na América do Sul, com influência no regime de precipitação.

O período escolhido para essa análise foram os meses de dezembro e

janeiro do período histórico 1975-2004, com foco nos meses mais chuvosos do SMAS.

A análise será realizada através da espacialização das climatologias mensais das seguintes variáveis atmosféricas: precipitação, vento analisado através das linhas de corrente, no nível de 200 hPa e o transporte de umidade a 850 hPa. Os produtos utilizados como referência a fim de analisar o desempenho dos modelos globais serão da R1, para as climatologias de vento e de transporte de umidade, e do GPCC para a precipitação.

3.5.2 Distribuição Espacial da Regionalização

Após investigar a qualidade dos modelos globais através da análise das médias climatológicas, a próxima etapa consiste na investigação da melhoria na representação dos padrões de temperatura e precipitação, através da regionalização dos modelos globais, utilizando o modelo regional RegCM4. Esse estudo será realizado no período histórico de 1975-2004, através da espacialização da precipitação e da temperatura, e da análise do Diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001) para ambas as variáveis.

O Diagrama de Taylor fornece um meio de sumarizar 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 diferença quadrática média e dos desvios padrões. Esses diagramas são especialmente úteis na avaliação de múltiplos aspectos de modelos complexos.

A Figura 2 mostra o Diagrama de Taylor que pode ser utilizado para sumarizar a habilidade com a qual os modelos globais e as regionalizações simulam padrões espaciais de variáveis atmosféricas e de superfície em relação a um conjunto de observações.

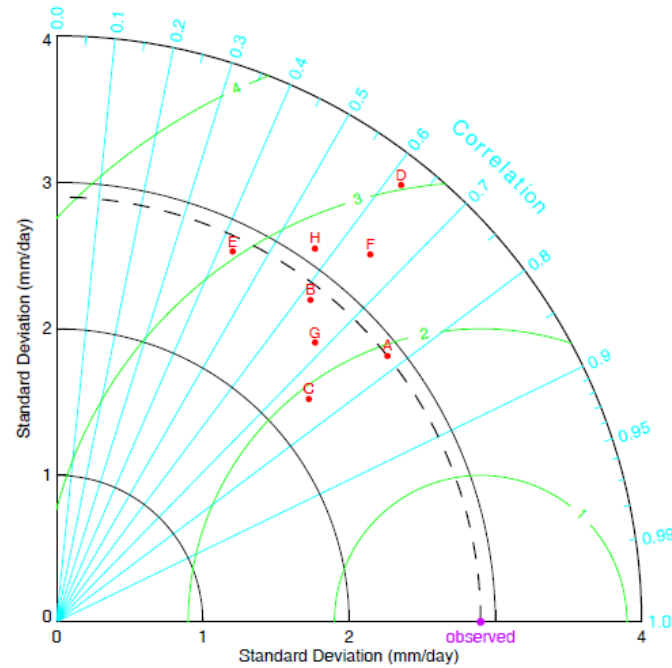


Figura 2: Diagrama de Taylor. (Fonte: Taylor, 2005)

O Diagrama é constituído pelo desvio padrão (Equação 3.1), a correlação linear, representada na figura pelas linhas verdes (Equação 3.2), e a diferença quadrática média (Equação 3.3) dos modelos e produtos analisados, de forma que o desvio padrão deve ser próximo ao produto de observação, a correlação linear próximo de 1 e o erro quadrático médio menor possível. As fórmulas a seguir serão utilizadas para cálculos desses dados estatísticos de composição do Diagrama, seguindo Taylor (2001) e o IPCC (2001).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (V_n - \bar{V})^2} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{(V_n - \bar{V})(V_n^* - \bar{V}^*)}{\sigma_V \sigma_{V^*}} \right) \quad (3.2)$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(V_n - \bar{V}) - (V_n^* - \bar{V}^*)]^2} \quad (3.3)$$

Sendo V_n as variáveis dos modelos analisados, \bar{V} as climatologias mensais dos respectivos modelos, V_n^* as variáveis de referência e \bar{V}^* a média climatológica das variáveis de referência; e σ_V e σ_{V^*} os desvios-padrão das variáveis dos modelos e da referência, respectivamente.

Então serão elaborados dois diagramas de Taylor, de forma a avaliarem espacialmente a precipitação e a temperatura sobre a bacia do Paraná, compostos pelos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e pelas regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR. No diagrama de precipitação, será utilizado como referência, o GPCC de 0,5° latitude x 0,5° longitude, enquanto o de temperatura, terá como referência, o CRU de 0,5° latitude x 0,5° longitude.

Logo após a análise do Diagrama de Taylor será realizada uma análise qualitativa através da espacialização das climatologias mensais da precipitação, sobre a América do Sul com o uso das três regionalizações. A análise será realizada no período de 1975-2004 utilizando como produtos de referência o GPCC.

3.5.3 Projeções Climáticas sobre a Bacia do Paraná

Após a investigação realizada nas fases anteriores sobre o desempenho dos modelos globais e de suas regionalizações, foi feita uma análise das regionalizações das projeções da precipitação, da temperatura à 2m e dos principais termos da equação de conservação de água superficial, representados pela diferença entre a precipitação e a evaporação (P-E), na área da bacia. As projeções foram realizadas para os períodos de 2041-2070 e 2071-2100 com o uso do RegCM4 forçado pelo RCP8.5.

A mudança na temperatura foi calculada através da diferença encontrada nas projeções 2041-2070 e 2071-2100, em relação ao período histórico 1975-2004, no verão. A mudança na temperatura foi representada para os períodos acima com intuito de avaliar as alterações sobre a região da bacia do Paraná. O cálculo da diferença de temperatura ΔT foi realizado através da seguinte fórmula:

$$\Delta T = T_f - T_h \quad (3.4)$$

Sendo T a temperatura, enquanto os índices “f” e “h” correspondem à projeção e ao histórico, respectivamente. ΔT é dado em $^{\circ}\text{C}$.

A precipitação será representada através da climatologia do período histórico 1975-2004 e das projeções do meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100, a fim de verificar a evolução da precipitação ao longo do século.

O termo definido pela diferença entre a precipitação e a evaporação ($P-E$), por exemplo, sobre a área de uma bacia, contribui na variação local de água na superfície, e representa uma das componentes da equação de conservação de água superficial (ROADS *et al.*, 2003; NUNES e ROADS, 2007). Em situações onde a média da precipitação na área apresenta valores superiores ao valor médio 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. O esquema a seguir (Figura 3) mostra a relação entre a precipitação e a evaporação, em que a seta para cima representa perda de água ao longo do período pelo sistema; e, para baixo, indica ganho de água durante o mesmo período pelo sistema.

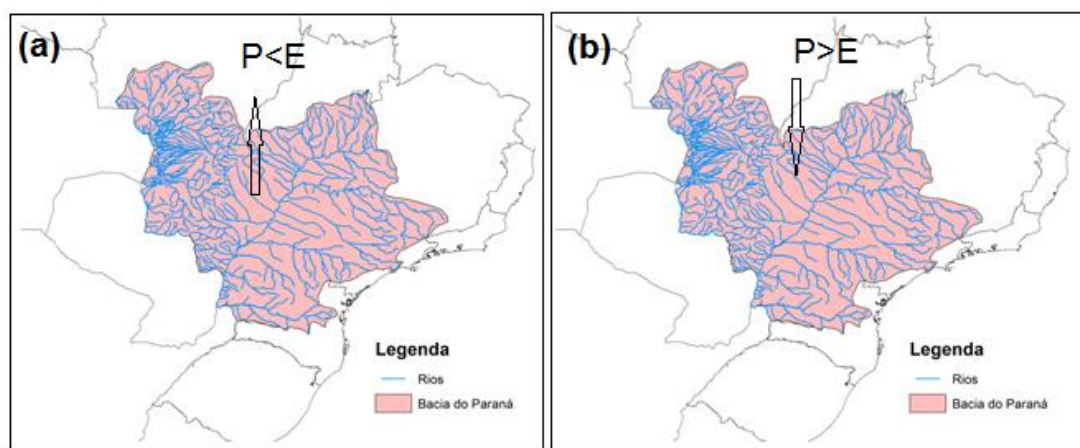


Figura 3: Esquema simplificado da contribuição de $P-E$ na variação local de água na Bacia do Paraná. (a) Contribuição negativa para a variação local de água na superfície. (b) Contribuição positiva para a variação local de água na superfície.

4. RESULTADOS

Nessa primeira etapa, inicialmente será analisada a precipitação sobre a bacia do Paraná, através dos produtos do GPCC, a fim de avaliar os meses de maior precipitação sobre a bacia do Paraná. Logo após, serão realizadas análises de climatologias, sobre a América do Sul, da precipitação tendo como referência as médias mensais do GPCC; o vento em 200 hPa e o transporte de umidade em 850 hPa, ambos verificados em relação a R1, para o período histórico de 1975-2004. Essas análises tem o intuito de avaliar os GCMs na representação dos principais padrões atmosféricos relacionados à precipitação na região sudeste da América do Sul.

4.1 Avaliação dos Modelos Globais

Nesse primeiro momento será analisada a climatologia mensal da precipitação sobre a bacia do Paraná com o intuito de analisar o comportamento da precipitação ao longo do ano, assim como verificar os meses de maior precipitação.

Na Figura 4, nota-se através da climatologia da precipitação mensal sobre a bacia para o período histórico 1975-2004, nota-se uma diferença na precipitação em toda a bacia, apresentando meses mais úmidos (primavera e verão) e mais secos (outono e inverno). Nos meses considerados os mais chuvosos do SMAS (dezembro e janeiro), a precipitação apresentou uma heterogeneidade entre as regiões nordeste (mais úmida) e sudoeste (mais seca) da bacia. Por outro lado, nos períodos mais secos, essa heterogeneidade se apresenta de forma inversa, com a região nordeste mais seca e a sudoeste mais úmida. Tal fato está associado à influência da banda de nebulosidade característica da ZCAS atuante sobre a região nordeste da bacia durante os meses mais chuvosos do SMAS, como veremos mais adiante.

A diferença de precipitação entre as regiões nordeste e sudoeste da bacia nos meses mais chuvosos do SMAS gera a necessidade de uma melhor avaliação da bacia do Paraná, devido à localização da usina de Itaipu na região mais seca (sudoeste). Por isso os meses de dezembro e janeiro serão avaliados, tanto no âmbito da América do Sul, através da análise dos padrões

atmosféricos envolvidos na precipitação da região da bacia, como através da avaliação das mudanças climáticas sobre a bacia do Paraná.

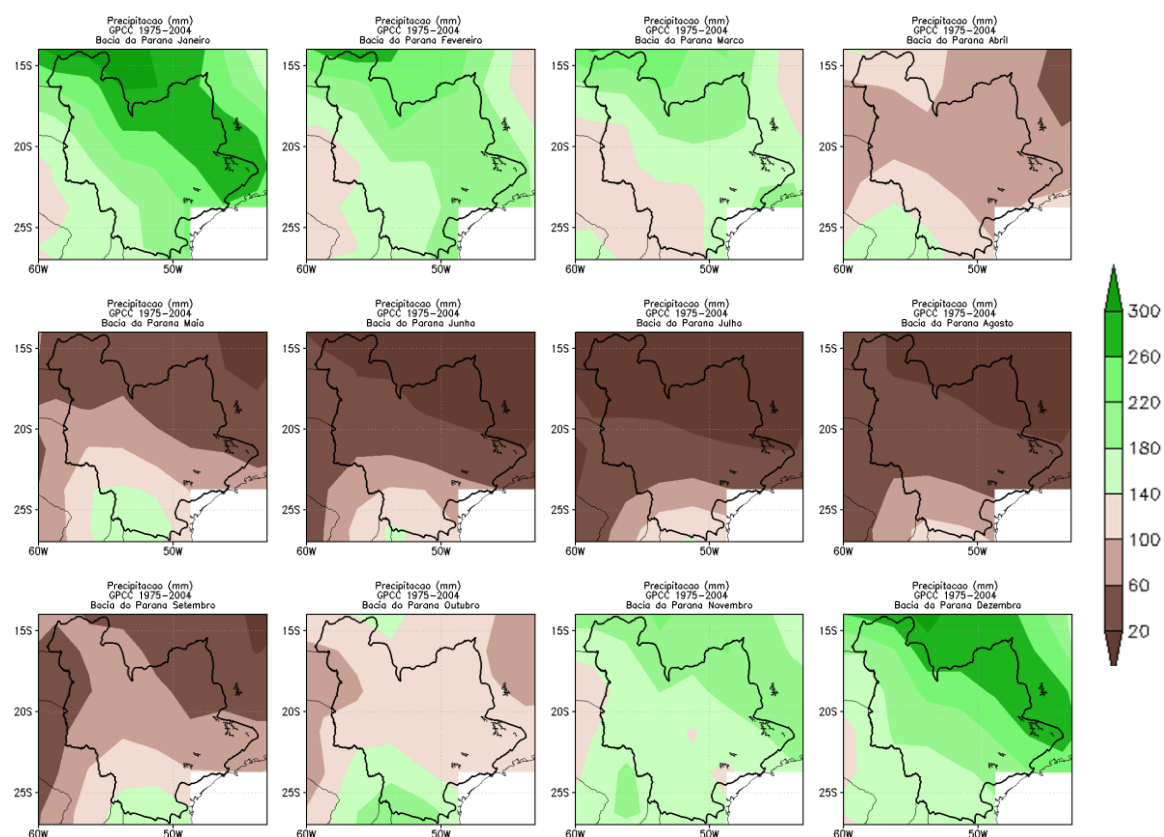


Figura 4: Climatologia mensal de precipitação (mm/mês) sobre a bacia do Paraná com o uso do produto GPCC no período histórico de 1975-2004. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

A Figura 5 mostra a climatologia da precipitação dos três GCMs e o GPCC como produto de referência, nas regiões nordeste e sudoeste da bacia do Paraná. A região nordeste da bacia apresentou valores maiores de precipitação, corroborando a análise anterior. O GPCC apresentou valores entre 7,9 e 9,7 mm/dia. Os GCMs apresentaram valores próximos ao observado, entre 6,0 e 10,4 mm/dia (ESM2M), 6,7 e 11,1 mm/dia (ESM-MR), enquanto o HadGEM2 apresentou valores maiores que o GPCC, entre 7,5 e 12,1 mm/dia.

Na região sudoeste os valores de precipitação encontrados foram inferiores aos da região nordeste. O GPCC apresentou valores entre 4,4 e 7,2 mm/dia, o GCM ESM-MR apresentou valores mais próximos da referência, entre 4,1 e 7,9 mm/dia. O ESM2M apresentou valores entre 3,8 e 8,4 mm/dia e o HadGEM2 entre 6,0 e 9,6 mm/dia.

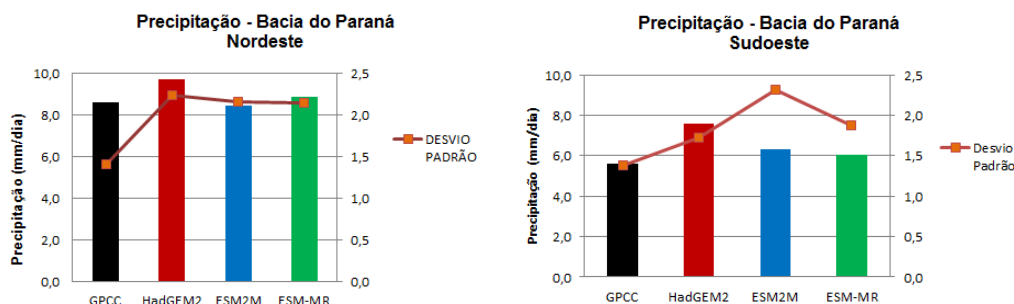


Figura 5: Gráfico de barra da precipitação nas regiões nordeste e sudoeste da bacia do Paraná, com o uso do GPCC e dos três modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR durante o período histórico 1975-2004. O eixo vertical esquerdo representa a média diária de precipitação, enquanto o eixo direito representa o desvio padrão. A linha vermelha representa o desvio padrão.

Devido a diferença de precipitação observada na bacia do Paraná, é importante analisar a influência de padrões atmosféricos sobre a precipitação na região, assim como, utilizar modelos regionais, os quais possuem maior resolução, a fim de ter uma visão mais refinada do comportamento da precipitação sobre a bacia. Da mesma forma, compreende-se também a importância de realizar projeções nessa área, a fim de entender o comportamento da precipitação e de outros parâmetros atmosféricos no futuro.

4.1.1 Avaliação da precipitação sobre a América do Sul

A variação de precipitação entre os meses mais chuvosos (verão/primavera) e mais secos (outono/inverno) na América do Sul está associada ao SMAS, segundo Moran e Morgan (1986). Esse sistema é composto de padrões atmosféricos igualmente relacionados à precipitação sobre a América do Sul, como discutido anteriormente. Estudos anteriores associaram determinados padrões atmosféricos à precipitação sobre a América do Sul. Lima *et al.* (2010) relacionaram eventos de precipitação extrema à presença da ZCAS durante o verão.

A Figura 6 mostra a distribuição espacial da precipitação oriunda do produto GPCC, e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR, para os meses de dezembro e janeiro, que são os meses mais chuvosos do SMAS, segundo análise prévia. Nos dois meses analisados, foi possível observar a zona de precipitação com sentido noroeste-sudeste sobre a América do Sul, um padrão característico da ZCAS.

No mês de dezembro, como simulado pelo GPCC, a precipitação se intensificou sobre a região norte com prolongamento em direção à região sudeste do Brasil, alcançando a bacia do Paraná. Na avaliação do desempenho dos modelos na representatividade da zona de precipitação, o HadGEM2 apresentou melhor desempenho na simulação da ZCAS, com forte influência sobre a bacia do Paraná. O ESM-MR também apresentou um desempenho semelhante à observação, enquanto o ESM2M mostrou uma subestimativa desses valores. Ambos os modelos apresentaram uma subestimativa da intensidade de precipitação sobre a bacia do Paraná.

Na análise do mês de janeiro, os maiores valores de precipitação são encontrados sobre a Região Norte, e uma faixa que se estende sobre a Região Sudeste, alcançando a bacia do Paraná, segundo o GPCC. Os modelos com melhor desempenho na representação da ZCAS sobre a América do Sul foram o HadGEM2 e o ESM-MR, sendo que o ESM2M subestima a precipitação sobre a região da ZCAS. Os modelos HadGEM2 e ESM2M mostraram forte influência do padrão de precipitação sobre a bacia do Paraná, enquanto o ESM-MR apresentou valores menores de precipitação sobre a bacia.

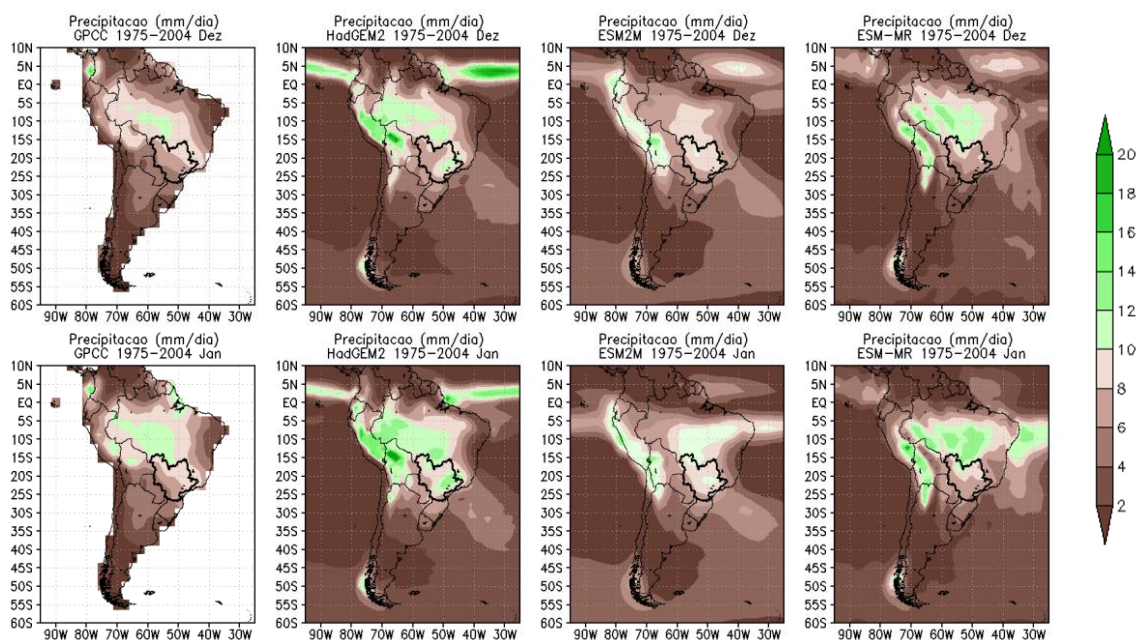


Figura 6: Climatologia mensal da precipitação (mm/dia) com o uso dos produtos do GPCC e dos modelos globais ESM2M, HadGEM2-ES e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro correspondentes aos meses de máxima precipitação do período de monção sobre a América do Sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

A figura 7 mostra a diferença de precipitação e a correlação entre o produto de observação GPCC e os GCMs individualmente. Nota-se que o

modelo HadGEM2 além de possuir maior coeficiente de correlação (0,73 em dezembro e 0,74 em janeiro) apresentou valores de precipitação muito próximos entre a observação e o modelo, com exceção nas proximidades das Cordilheiras dos Andes, onde houve maior precipitação no modelo e na região norte do Brasil, onde o modelo subestimou a precipitação. Além disso, na área da bacia do Paraná, foi possível notar na região sudeste valores maiores de precipitação do modelo em relação ao GPCC, como observado anteriormente na Figura 7.

O modelo ESM-MR também obteve valores altos de correlação (0,70 em dezembro e 0,68 em janeiro), porém apresentou valores distintos em relação à observação como na Cordilheira dos Andes e na região nordeste, onde o modelo apresentou valores mais altos de precipitação. Na região norte, o modelo subestimou a intensidade da precipitação, apresentando valores menores, principalmente no mês de janeiro. No entanto, sobre a bacia do Paraná, esse modelo foi o que melhor representou a precipitação, alcançando valores muito próximos ao observado.

O ESM2M foi o modelo que apresentou correlação mais baixa em relação ao GPCC (0,50 em dezembro e 0,46 em janeiro). Na Figura 8 foi possível observar no mês de dezembro valores baixos de precipitação do modelo sobre a região nordeste. O mesmo pode ser observado no mês de janeiro sobre a região norte do Brasil.

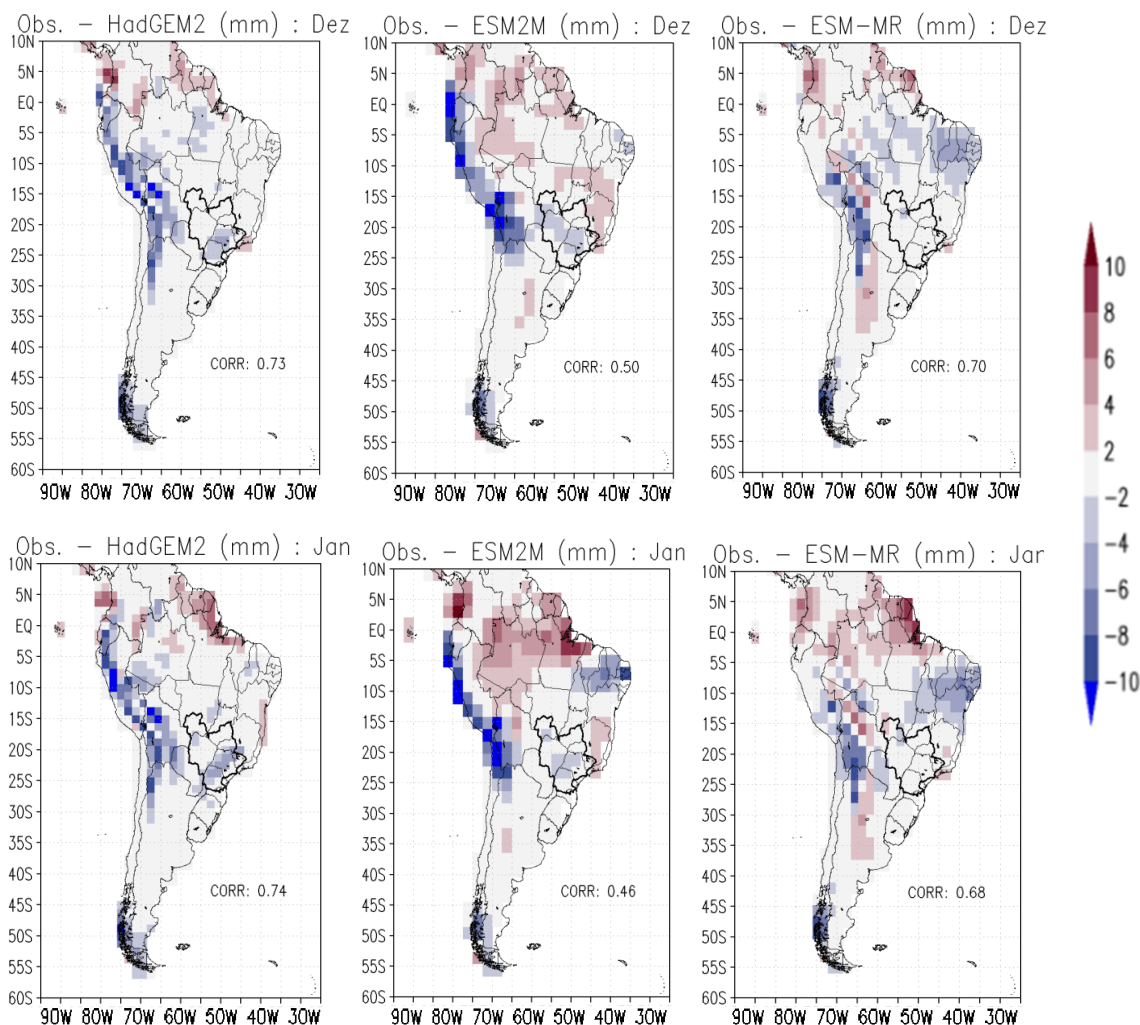


Figura 7: Climatologia mensal da diferença de precipitação entre o produto de referência do GPCC e os GCMs HadGEM2, ESM2M e ESM-MR sobre a América do sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

As análises das climatologias de precipitação dos modelos globais, nos meses de dezembro e janeiro, permitem observar uma caracterização positiva do padrão atmosférico relacionado ao regime de precipitação da América do Sul. Nos dois meses, é possível notar a presença da zona de precipitação com sentido noroeste-sudeste, com a presença mais intensa na região sudeste no mês de Janeiro. Entre os modelos analisados, quanto a precipitação, os modelos que mais se assemelham ao observado foram o HadGEM2 e o ESM-MR, com o ESM2M subestimando a intensidade da precipitação sobre a América do Sul e apresentando baixo valor de correlação com o observado.

4.1.3 Avaliação do vento em 200 hPa sobre a América do Sul

A presença da AB é observada próxima à região de máxima precipitação no verão da América do Sul, sendo então também um padrão atmosférico

associado à ocorrência do SMAS (Zhou e Lau,1998). Shi *et al.* (2000) analisaram os sistemas associados a precipitação sobre a América do Sul, na estação mais seca (inverno) e mais úmida (verão) com o uso da R1. Os autores observaram a existência de uma circulação anticiclônica em altos níveis característicos da AB sobre a região oeste do Brasil, no período de verão.

A AB é caracterizada pela presença de ventos fracos em altos níveis no seu centro, como observado na Figura 8, através da distribuição espacial do vento no nível de 200 hPa a partir dos campos da R1 e dos GCMs HadGEM2, ESM2M e ESM-MR no período que corresponde aos meses mais chuvosos do período do SMAS.

Na análise do mês de dezembro, a R1 mostrou a intensificação e deslocamento na direção sul da AB. Os GCMs HadGEM2 e ESM2M apresentaram melhor desempenho na representação da AB e do cavado de nordeste, enquanto o ESM-MR, apesar de apresentar bom desempenho na simulação dos ventos fracos no centro da AB, apresentou intensificação das linhas de corrente no núcleo da AB, quando comparado com a R1. Tanto a R1 quanto os GCMs mostraram influência da AB sobre a bacia do Paraná principalmente na região norte.

No mês de janeiro, a AB permanece intensa e bem representada pela R1. Os modelos caracterizaram bem a posição da AB, assim como o cavado de nordeste em relação a R1. No entanto, os GCMs apresentaram uma região mais extensa com atuação de ventos fracos em relação a R1, mostrando uma superestimativa da região de atuação da AB, principalmente através da simulação do ESM-MR. Tal fato é corroborado pela maior influência da AB sobre a bacia do Paraná, observada na simulação de todos os GCMs, em relação a R1.

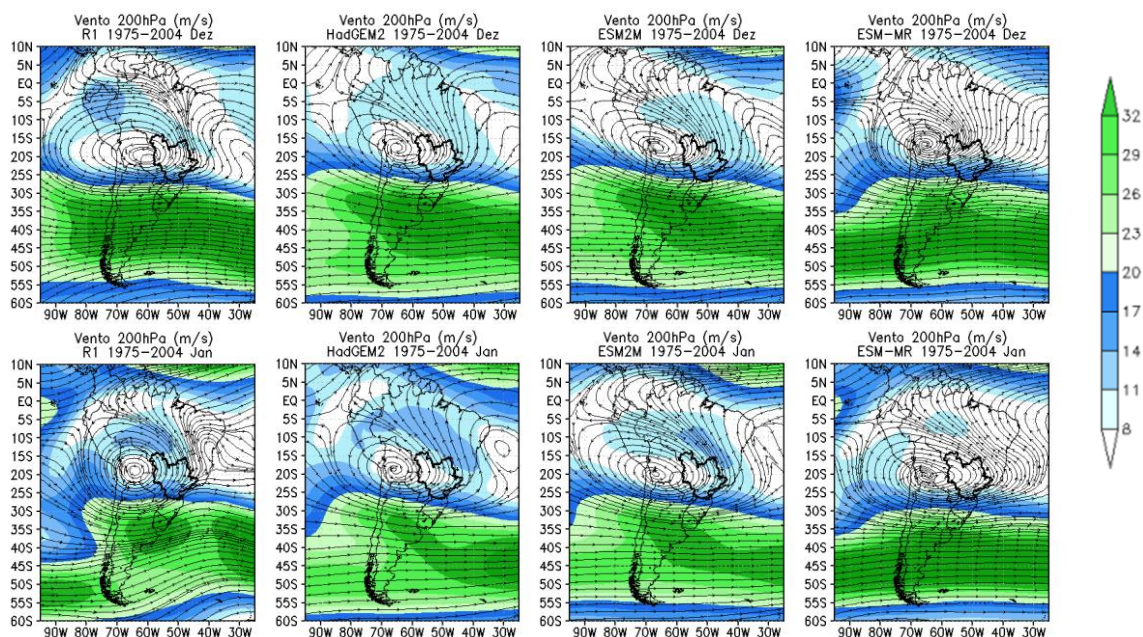


Figura 8: Climatologia mensal do vento em 200 hPa com o uso dos produtos da R1 e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro correspondentes aos meses de máxima precipitação do período de monção sobre a América do Sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

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, associada a AB (Jones e Horel, 1990). As climatologias de precipitação e de vento no nível de 200 hPa apresentam uma relação positiva entre o movimento da precipitação em direção ao SE da América do Sul e a posição da AB e do cavado de NE ao longo da estação de verão. Jones e 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 na vizinhança da ZCAS.

4.1.4 Avaliação do transporte de umidade sobre a América do Sul

O JBNAS afeta o clima e o tempo nas regiões Sul/Sudeste do Brasil e Norte da Argentina, pois alimenta com umidade sistemas convectivo de mesoescala que ocorrem nestas regiões (SOARES E MARENGO, 2002), sendo então responsáveis pelo transporte de umidade proveniente da Amazônia para a região sudeste da América do Sul (MARENGO *et al.*, 2004). Segundo Marengo *et al.* (2004) e Vera *et al.* (2006), o fluxo de umidade proveniente do Atlântico Norte entra na América do Sul através da bacia

Amazônica. Esse fluxo de umidade quando de encontro aos Andes, tende a se deslocar para Sudeste em direção ao Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, ou para o Sul do Brasil / Norte da Argentina.

Na Figura 9 observa-se a distribuição espacial da climatologia do transporte de umidade da região norte até a região sudeste pelo JBNAS a partir dos campos da R1 e dos GCMs HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro.

Na climatologia de dezembro os GCMs apresentaram bom desempenho na simulação do transporte de umidade com relação a R1. O ESM2M foi o modelo com melhor representatividade tanto da umidade na região norte quanto da intensidade do seu transporte para as regiões central e sudeste. Os GCMs HadGEM2 e ESM-MR mostraram valores mais baixos de umidade na região norte e intensificação do transporte de umidade. Sobre a bacia do Paraná notou-se melhor desempenho do ESM2M sobre o transporte de umidade para a região.

No mês de janeiro, o modelo que melhor simulou o transporte de umidade em relação a R1 foi o ESM2M, tanto em relação a umidade na região norte quanto a intensidade do transporte de umidade para as regiões central e sudeste. O ESM-MR apresentou valores mais baixos de umidade e uma intensificação no transporte, principalmente na região dos Andes. Quanto a influência do JBNAS sobre a bacia do Paraná, em relação a R1, o HadGEM2 foi o GCM com melhor desempenho, com o ESM2M e ESM-MR apresentando maior intensidade do transporte sobre a região.

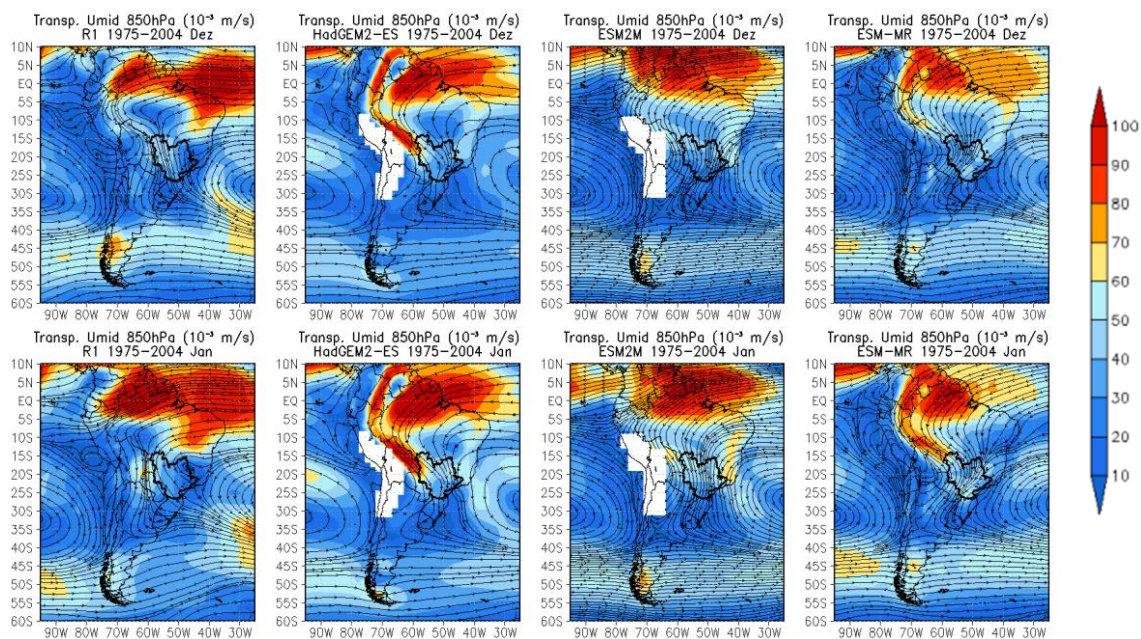


Figura 9: Climatologia mensal do transporte de umidade em 850hPa com o uso dos produtos da R1 e dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro correspondentes aos meses de máxima precipitação do período de monção sobre a América do Sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Em relação ao transporte de umidade a 850 hPa, nos meses de dezembro e janeiro, os modelos ESM2M e ESM-MR são os que apresentaram melhor desempenho na representação do JBNAS, que é o responsável por transportar a umidade da Amazônia para a região sul/sudeste da América do Sul.

4.2 Análises da Regionalização

A partir de agora, será analisada a eficiência da regionalização realizada através do modelo regional RegCM4. A avaliação será realizada pela análise da precipitação e da temperatura de forma qualitativa e quantitativa. Para isso, será utilizado o Diagrama de Taylor na análise quantitativa e uma análise espacial das climatologias das regionalizações para a parte qualitativa.

Estudos anteriores mostraram a eficiência da regionalização na análise de variáveis atmosféricas na América do Sul. Sales *et al.* (2015) realizaram simulações da regionalização dinâmica do HadGEM2 utilizando o RAMS6.0. Os resultados mostraram que os produtos da regionalização apresentaram uma melhor representação da distribuição de temperatura e do ciclo anual de precipitação.

4.2.1 Precipitação

A fim de avaliar o desempenho das regionalizações em relação aos modelos globais, sob o aspecto da precipitação, foi utilizado o Diagrama de Taylor.

Sierra *et al.* (2015) analisou a precipitação média sazonal com o uso de sete modelos globais para o período histórico 1850-2005. Através do Diagrama de Taylor, os autores concluíram que o modelo HadGEM2 obteve melhor representação da precipitação sazonal sobre o nordeste da América do Sul, apresentando menor erro quadrático médio e desvio padrão, e coeficiente de correlação próximo de 1, principalmente para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

A Figura 10 mostra o diagrama de Taylor para a precipitação, onde os GCMs HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR são avaliados quantitativamente em comparação ao GPCC de resolução $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Os modelos com melhor desempenho na representação da precipitação sobre a bacia do Paraná foram aqueles que apresentaram os menores erros quadráticos médios, desvios padrões próximos aos do GPCC e coeficiente de correlação linear mais próximo de 1.

O HadGEM2 apresentou boa performance da precipitação, apresentando valores de 0,68 de correlação linear, 1,80 de desvio padrão e 1,50 de erro quadrático médio. Ao analisar a sua regionalização RCM4_HadGEM2, notou-se um desempenho semelhante com valores de 0,69 de correlação, 2,00 de desvio padrão e 1,50 de erro quadrático médio. Isso mostra que a regionalização não apresentou melhora consistente em relação ao modelo global equivalente, e que apesar disso, ambos apresentaram bons resultados na representação da precipitação sobre a bacia do Paraná.

O ESM2M apresentou 0,60 de correlação linear, 2,00 de desvio padrão e 1,60 de erro quadrático médio. Na análise da respectiva regionalização, a correlação encontrada foi de 0,70, desvio padrão de 2,70 e erro quadrático médio de 1,70. Tais valores mostram que o ESM2M apresentou melhor desempenho da precipitação em relação à sua regionalização quando comparados ao observado.

O ESM-MR apresentou 0,59 de correlação linear, 1,60 de desvio padrão e 1,50 de erro quadrático médio. Na análise da sua regionalização, notou-se valores de 0,62 de correlação linear, 3,20 de desvio padrão e 2,50 de erro quadrático médio. Tais valores mostram que o modelo regional apresentou desempenho inferior a sua regionalização, principalmente através da análise do desvio padrão e do erro quadrático médio.

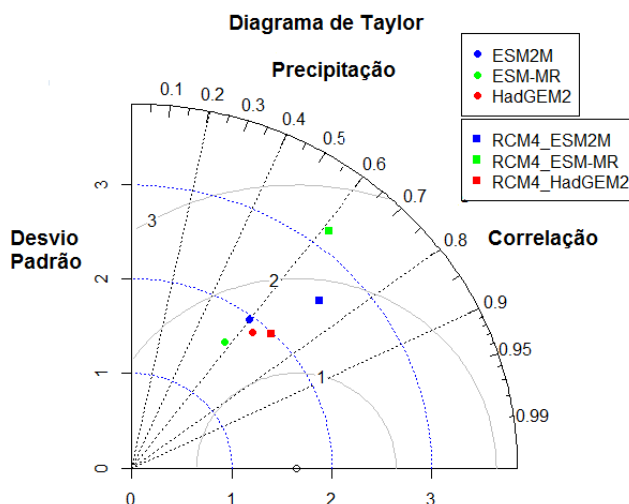


Figura 10: (a) Diagrama de Taylor da precipitação com os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR tendo como produto de referência o GPCC com resolução de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, sob o domínio espacial da bacia do Paraná, para o período histórico 1975-2004.

Com isso, através da análise do Diagrama de Taylor da precipitação, nota-se que a regionalização realizada com o RegCM4 não apresentou um ganho expressivo na representação da precipitação sobre a bacia do Paraná em relação aos respectivos GCMs, apresentando performances inferiores, principalmente a RCM4_ESM-MR, com o erro quadrático médio apresentando valores superiores aos demais modelos e regionalizações. Além disso, na avaliação do modelo global com a sua respectiva regionalização, é possível observar que o RCM4_HadGEM2 manteve uma boa performance em relação ao observado, assim como seu modelo base.

A queda no desempenho da precipitação das regionalizações em relação aos seus respectivos GCMs e a observação está associada ao fato de que o modelo regional apresenta uma topografia mais detalhada em relação ao modelo global usado nas condições de contorno, podendo gerar maiores

quantidades de precipitação próximas de áreas mais elevadas (Chou e Nobre, 2011).

Na Figura 11, foi possível observar a representação espacial da precipitação através do GPCC e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR, nos meses de dezembro e janeiro para o período histórico 1975-2004.

No mês de dezembro, pode-se observar um melhor desempenho do RCM4_HadGEM2 na representação da zona de maior precipitação sobre a América do Sul, enquanto os modelos RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR apresentaram uma superestimativa na intensidade da precipitação nas regiões central e sudeste do Brasil. Na análise da bacia do Paraná, o HadGEM2 apresentou melhor desempenho na simulação da influência da zona de precipitação sobre a região.

No mês de janeiro, ao analisar o GPCC, foi possível notar a presença da zona de precipitação mais intensa próximo da região central da América do Sul. O modelo que melhor representa essa intensificação na região central é o RCM4_HadGEM2, enquanto o RCM4_ESM2M apresenta a precipitação mais concentrada próxima da região nordeste e o RCM4_ESM-MR mostra tanto a intensificação na região central, quanto no nordeste da América do Sul, com valores superiores aos do GPCC.

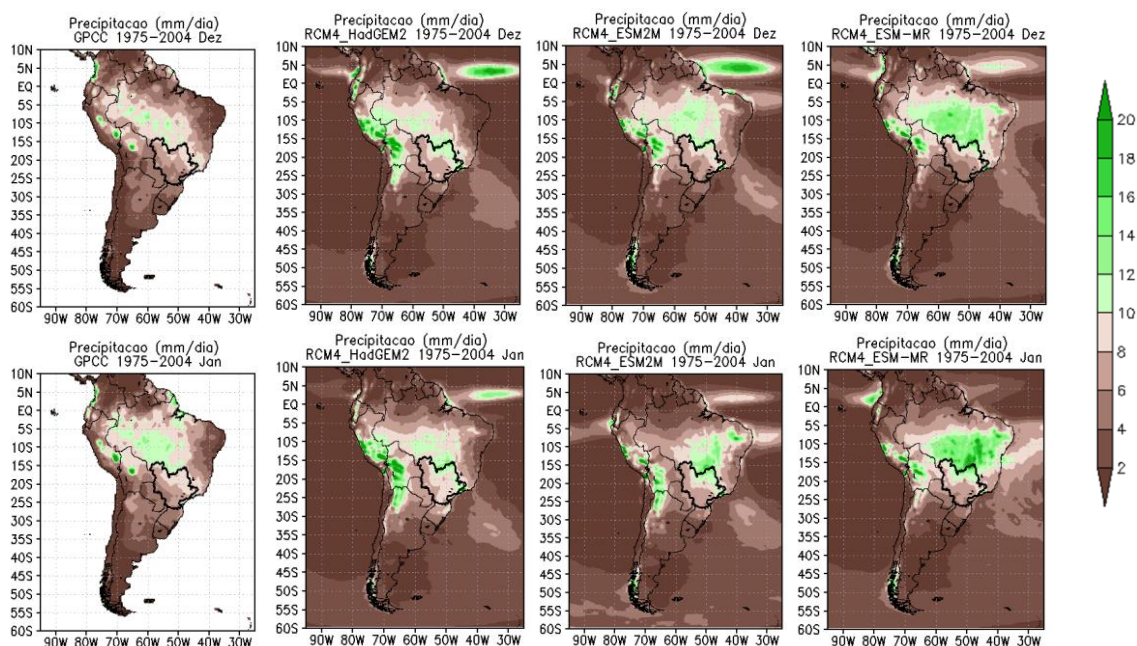


Figura 11: Climatologia mensal da precipitação com o uso do produto do GPCC e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro correspondentes aos meses de máxima precipitação do período de monção sobre a América do Sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

A Figura 12 mostra a diferença de precipitação e a correlação entre o produto de observação GPCC e as regionalizações individualmente. A regionalização RCM4_ESM-MR apresentou os maiores valores de correlação (0,66 em dezembro e 0,53 em janeiro). No entanto, apresentou em algumas regiões uma superestimativa da precipitação, como na região nordeste, principalmente no mês de janeiro. A regionalização RCM4_HadGEM2 apresentou valores de correlação de 0,56 em dezembro e 0,50 em janeiro, entretanto, na análise da diferença de precipitação entre a regionalização e o observado, observou-se valores similares ao GPCC em grande parte da América do Sul, com exceção da região norte, onde a regionalização apresentou valores menores de precipitação no mês de janeiro.

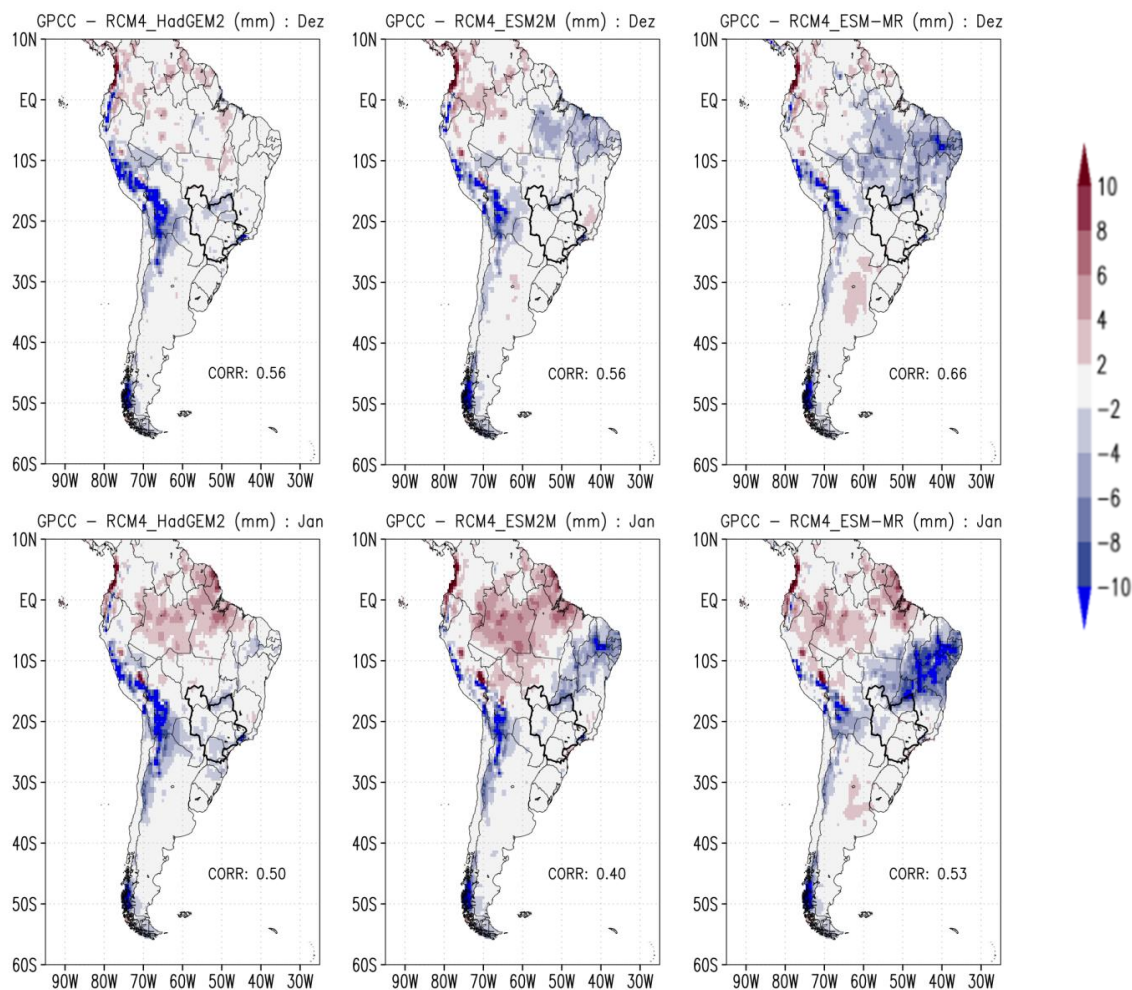


Figura 12: Climatologia mensal da diferença de precipitação entre o produto de referência do GPCC (0,5° latitude x 0,5° longitude) e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR sobre a América do sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Através de uma análise quantitativa, realizada pelo Diagrama de Taylor, e da espacialização da precipitação, é possível observar que o RCM4_HadGEM2 é a regionalização com melhor performance quando comparado ao GPCC, já que apresentou valores de precipitação similares ao observado em maior parte da América do Sul, apesar de obter uma correlação baixa em relação ao GPCC. Além disso, foi a regionalização que apresentou melhor relação com seu modelo base. A RCM4_ESM-MR apresentou uma correlação linear mais alta em relação ao observado, mas quando analisada a diferença de precipitação com o GPCC, notou-se uma superestimativa na região Nordeste do Brasil.

4.2.2 Temperatura

Na análise do desempenho das regionalizações e dos GCMs na representação da temperatura, foi realizada uma análise quantitativa sob a visão do Diagrama de Taylor, assim como a distribuição espacial da temperatura na América do Sul. A Figura 13 mostra o diagrama de Taylor para a temperatura, onde estão os modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR sendo avaliados segundo o CRU de resolução 2,5° latitude x 2,5° longitude. Para a degradação da grade do CRU foi utilizado os produtos da R1 de resolução 2,5°x2,5°. A análise foi realizada de forma que os modelos e regionalizações devem apresentar baixos erros quadrático médio e desvios padrão e coeficientes de correlação mais próximos de 1.

O HadGEM2 apresentou 0,92 de correlação linear, 1,75 de desvio padrão e 0,75 de erro quadrático médio. Na análise da respectiva regionalização, a RCM4_HadGEM2 apresentou valor de correlação de 0,97, desvio padrão de 2,10 e erro quadrático médio de 0,60. Com isso, notou-se que a regionalização apresentou desempenho semelhante ao global na representação da temperatura sobre a bacia, por apresentar erro quadrático médio baixo e coeficiente de correlação próximo de 1.

O ESM2M apresentou 0,70 de correlação linear, 1,90 de desvio padrão e 1,40 de erro quadrático médio. A respectiva regionalização RCM4_ESM2M por sua vez, apresentou 0,97 de correlação linear, 2,30 de desvio padrão e 0,70 de erro quadrático médio. Esses valores mostram que a regionalização apresentou uma semelhança consistente com o observado em relação à temperatura na bacia, assim como, obteve um ganho nessa representação em relação ao modelo global, representado pelas diferenças entre os coeficientes de correlação.

O modelo ESM-MR apresentou 0,90 de correlação linear, 2,10 de desvio padrão e 0,90 de erro quadrático médio. A sua regionalização RCM4_ESM-MR por sua vez apresentou 0,95 de correlação linear, 2,10 de desvio padrão e 0,75 de erro quadrático, o que mostra que a regionalização apresentou um ganho em relação ao modelo global quando comparado ao observado, representado por menor erro quadrático médio e maior coeficiente de correlação.

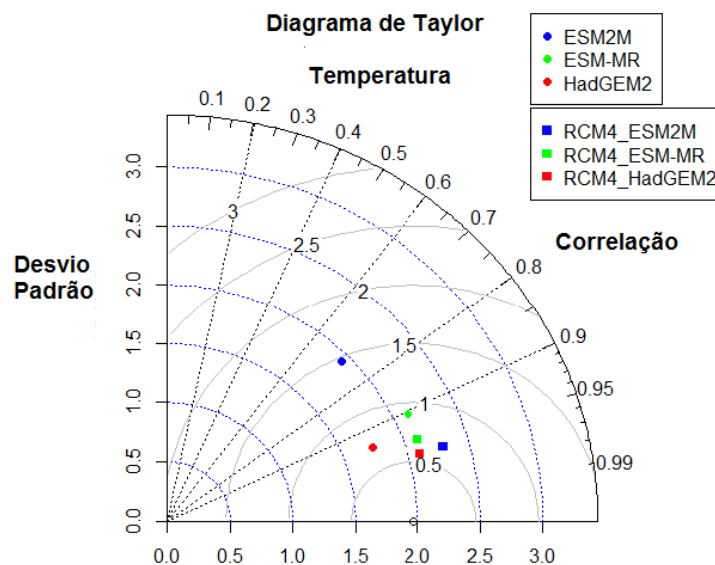


Figura 13: Diagrama de Taylor dos modelos globais HadGEM2, ESM2M e ESM-MR e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR tendo como produto de referência o CRU com resolução de 2,5°x2,5°, sob o domínio espacial da bacia do Paraná, para o período histórico 1975-2004.

Com isso, através da análise do Diagrama de Taylor da temperatura, notou-se que as regionalizações realizadas com o RegCM4 apresentaram bom desempenho com dados estatísticos semelhantes ao observado, principalmente a RCM4_ESM2M, com maior coeficiente de correlação (0,97), apesar de ter apresentado desvio padrão mais distante ao observado em relação ao modelo global (2,30). Além disso, na avaliação das regionalizações com seus respectivos GCMs, a RCM4_ESM2M apresentou melhor desempenho em relação ao GCM, com maior coeficiente de correlação e menor erro quadrático médio.

Na Figura 14 foi realizada a distribuição espacial das regionalizações através da distribuição espacial da temperatura sobre a América do Sul em relação ao CRU de 0,5° latitude x 0,5° longitude. No mês de dezembro, a regionalização que mais se assemelha ao observado é a RCM4_HadGEM2 apresentando bom desempenho as temperaturas mais altas na região nordeste do Brasil. As demais regionalizações simularam temperaturas mais baixas ao que se observa no CRU nas regiões central e nordeste do Brasil. Sob a perspectiva da bacia do Paraná, as três regionalizações simularam valores baixos de temperatura em relação ao CRU, com destaque para o RCM4_ESM-MR.

No mês de janeiro, ao analisar as três regionalizações, é possível notar um melhor desempenho do RCM4_HadGEM2 em relação ao CRU, apesar de mostrar uma área com valores mais baixos de temperatura na região sudeste do Brasil. As regionalizações RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR simularam valores mais baixos de temperatura nas regiões sudeste e nordeste quando comparado com o CRU. Ao observar a bacia do Paraná, as três regionalizações apresentaram valores mais baixos de temperatura em relação ao observado.

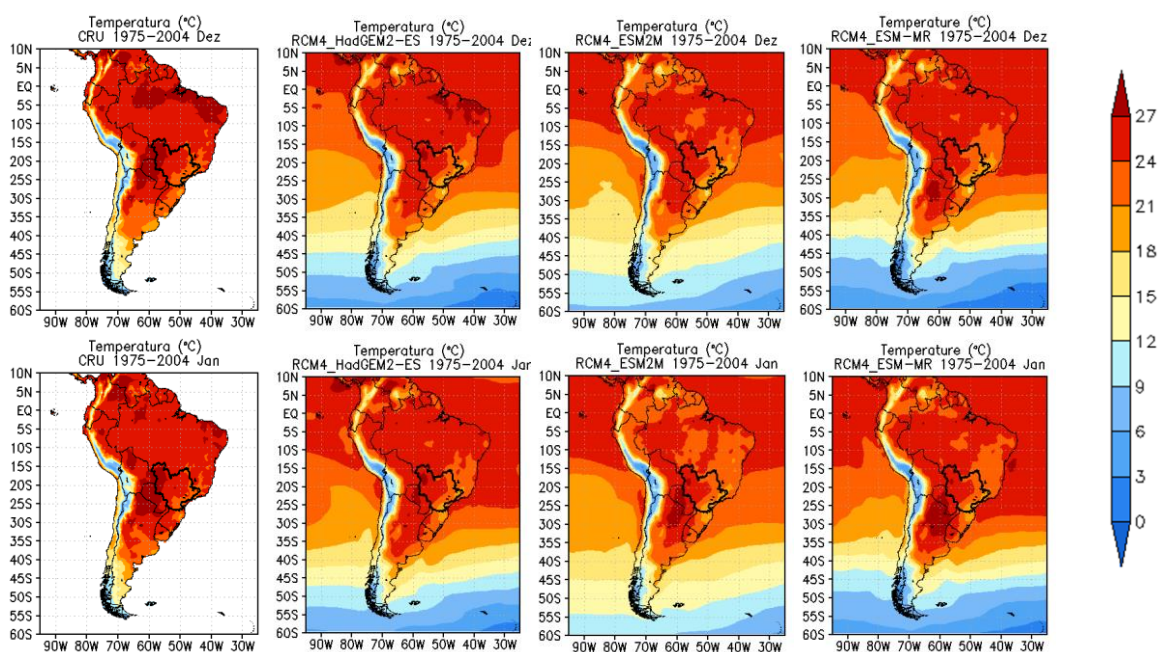


Figura 14: Climatologia mensal da temperatura com o uso do produto do CRU e das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para os meses de dezembro e janeiro correspondentes aos meses de máxima precipitação do período de monção sobre a América do Sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

A Figura 15 mostra a diferença entre a temperatura da observação e as regionalizações individualmente no mês de dezembro. As regionalizações, como vistas anteriormente, apresentaram uma boa relação com o CRU, com correlação linear de 0,96. A RCM4_HadGEM2 obteve valores próximos ao observado em toda a extensão da América do Sul, no entanto, mostrou valores abaixo do observado na região norte da América do Sul. As regionalizações RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR apresentaram uma subestimativa nos valores da temperatura em quase toda a América do Sul, com exceção da Argentina, que apresentou valores de temperatura superiores em relação ao observado.

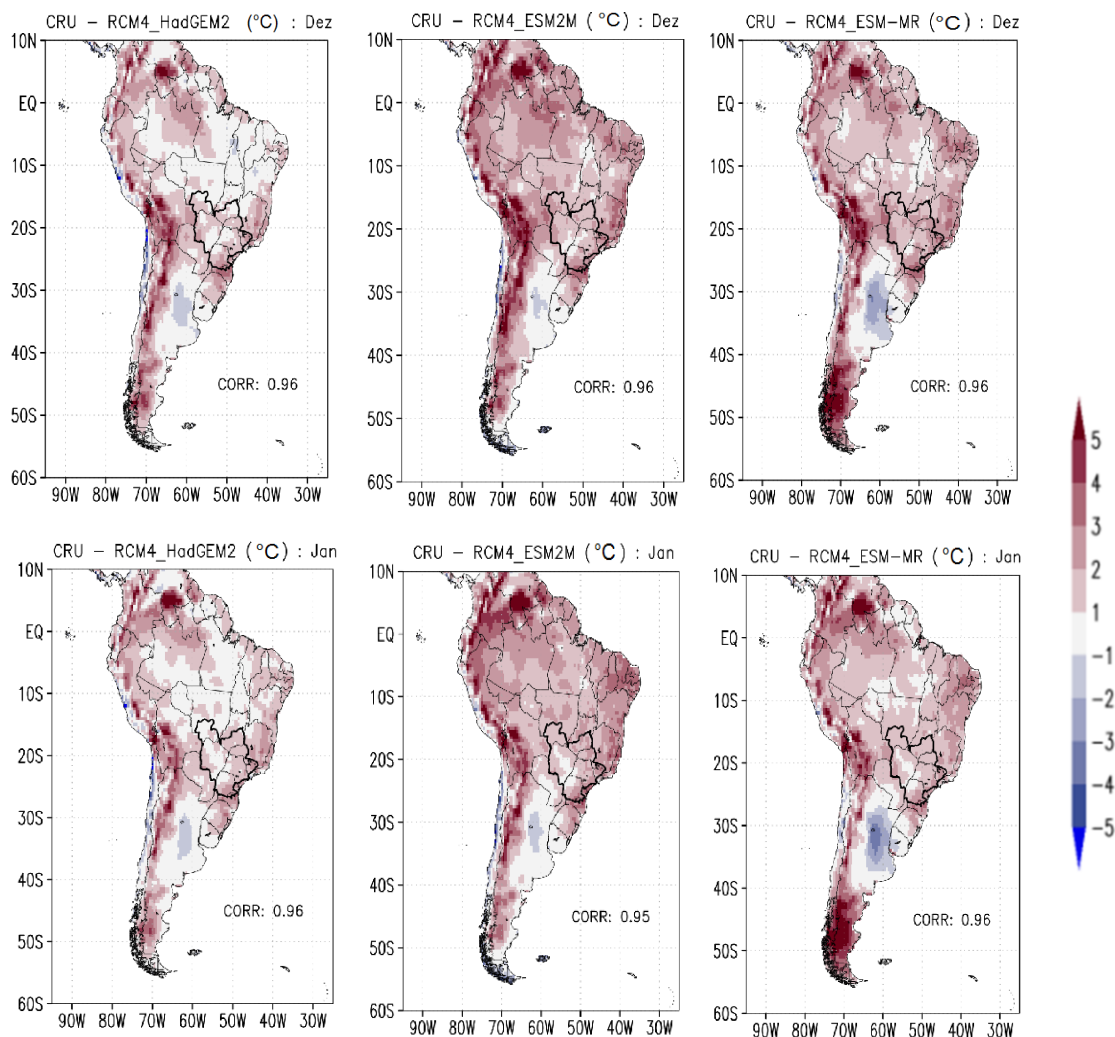


Figura 15: Climatologia mensal da diferença de temperatura entre o produto de referência do CRU e as regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR sobre a América do sul. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Na análise quantitativa realizada pelo Diagrama de Taylor, observou-se que a regionalização RCM4_ESM2M mostrou melhor desempenho em relação ao CRU e em relação ao respectivo GCM, com baixo valor de desvio padrão e coeficiente de correlação linear mais próximo de 1. No que se refere a avaliação qualitativa, a regionalização que apresentou valores de temperatura mais próximos do CRU foi a RCM4_HadGEM2, tanto na América do Sul quanto na bacia do Paraná.

4.3 Projeções Climáticas sobre a bacia do Paraná

Estudos anteriores abordaram a importância de realizar projeções climáticas sobre ambientes hídricos, principalmente aqueles que possuem usinas hidrelétricas (MARENGO *et al.*, 2011; LIOPART *et al.*, 2014) A bacia do

Paraná apresenta grande importância no abastecimento de energia, devido a presença da usina de Itaipu, e produção agrícola como discutido anteriormente.

Milly *et al.*, (2015) avaliaram as projeções climáticas de descarga de muitos rios ao redor do mundo usando doze GCMs do IPCC AR4 e a forçante SRES A1B, e eles sugeriram para o rio São Francisco, uma redução de 15-20% do runoff no ano de 2080-2099, em relação ao período histórico de 1900-1970. Para o rio Amazonas foi encontrado redução de 5-20% na região leste e aumento de 5-20% na região oeste. No rio Paraná foi sugerido que o aumento do runoff deve alcançar em torno de 40% no mesmo período.

Desta forma, a partir de agora, serão analisadas as projeções climáticas sobre a precipitação, a temperatura e os componentes da equação de conservação de água superficial (P-E), para o período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100, através das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR.

4.3.1 Precipitação

Nas Figuras 16 e 17, foi possível analisar a precipitação sobre a bacia do Paraná, nos meses de dezembro e janeiro, para o período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100, com o uso da forçante RCP8.5. Nesse período observou-se um gradiente de precipitação com sentido nordeste-sudoeste, de forma que os maiores valores de precipitação estão na região nordeste (mais úmida), enquanto valores inferiores estão na região sudoeste (mais seca).

Na avaliação da climatologia do mês de dezembro (Figura 16), as três regionalizações representaram a precipitação de formas distintas. As regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M, apresentaram no decorrer do século, aumento da precipitação na parte nordeste da bacia. A região sudoeste, mesmo apresentando valores mais baixos de precipitação, permanecendo a região mais seca, simulou aumento nos valores de precipitação para o fim do século. A regionalização RCM4_ESM-MR apresentou, por outro lado, estabilização dos valores de precipitação na região nordeste da bacia ao longo do século, enquanto na região sudoeste apresentou

aumento nos valores de precipitação entre o período histórico e meio do século, voltando a se tornar mais seco no fim do século.

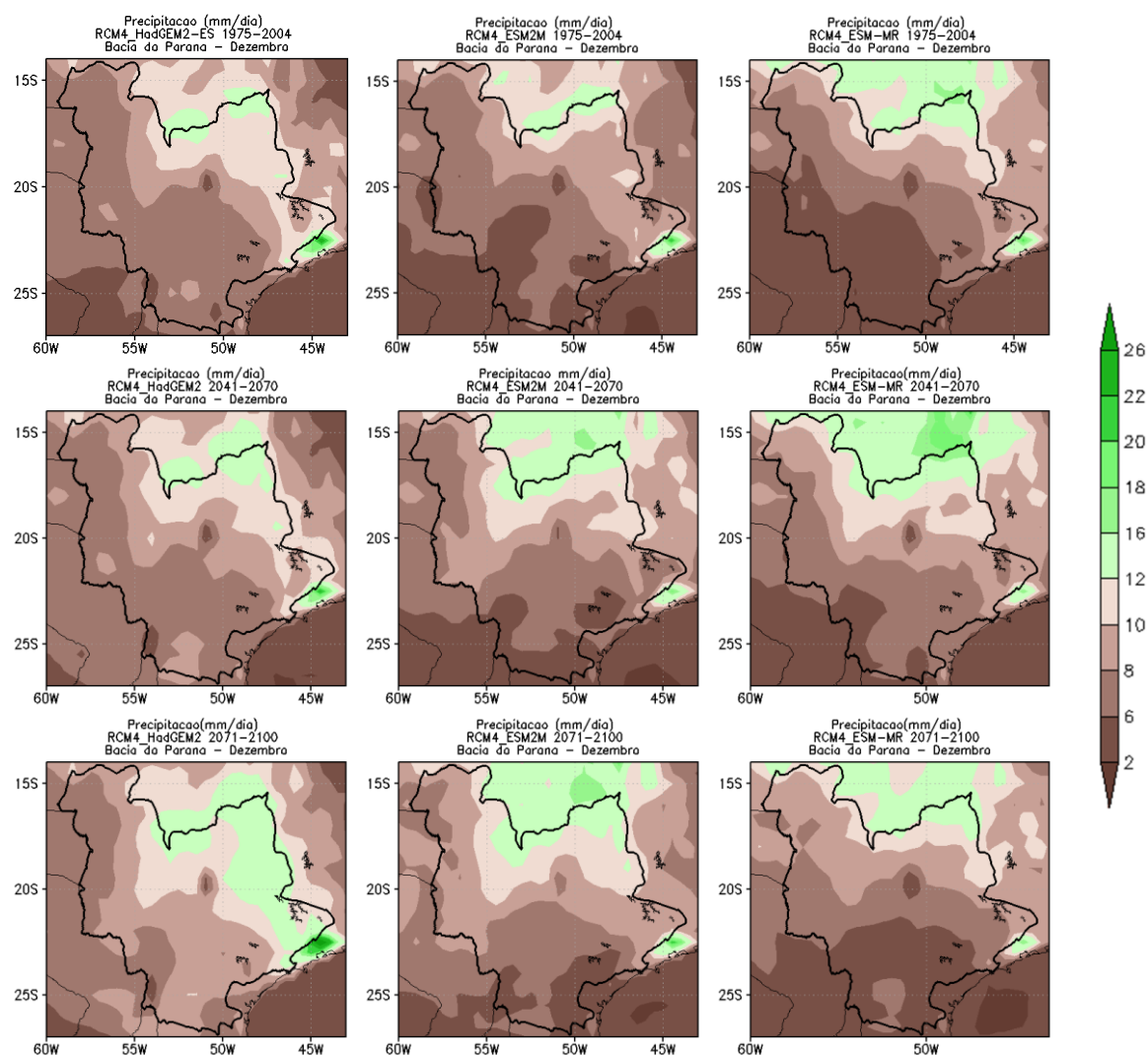


Figura 16: Climatologia mensal da precipitação com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de dezembro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Na figura 17, na análise da climatologia do mês de janeiro, observou-se que a regionalização RCM4_HadGEM2 não apresentou alteração de precipitação considerável na região nordeste da bacia ao longo do século, porém a região sudoeste se tornou mais a partir do meio do século. A regionalização RCM4_ESM2M manteve a heterogeneidade de precipitação entre as regiões nordeste e sudoeste, porém sem apresentar variação nos valores ao longo do século em toda a bacia. A RCM4_ESM-MR apresentou queda de precipitação na região sudoeste entre o período histórico e meio do

século, porém manteve os valores de precipitação na região nordeste em toda a bacia.

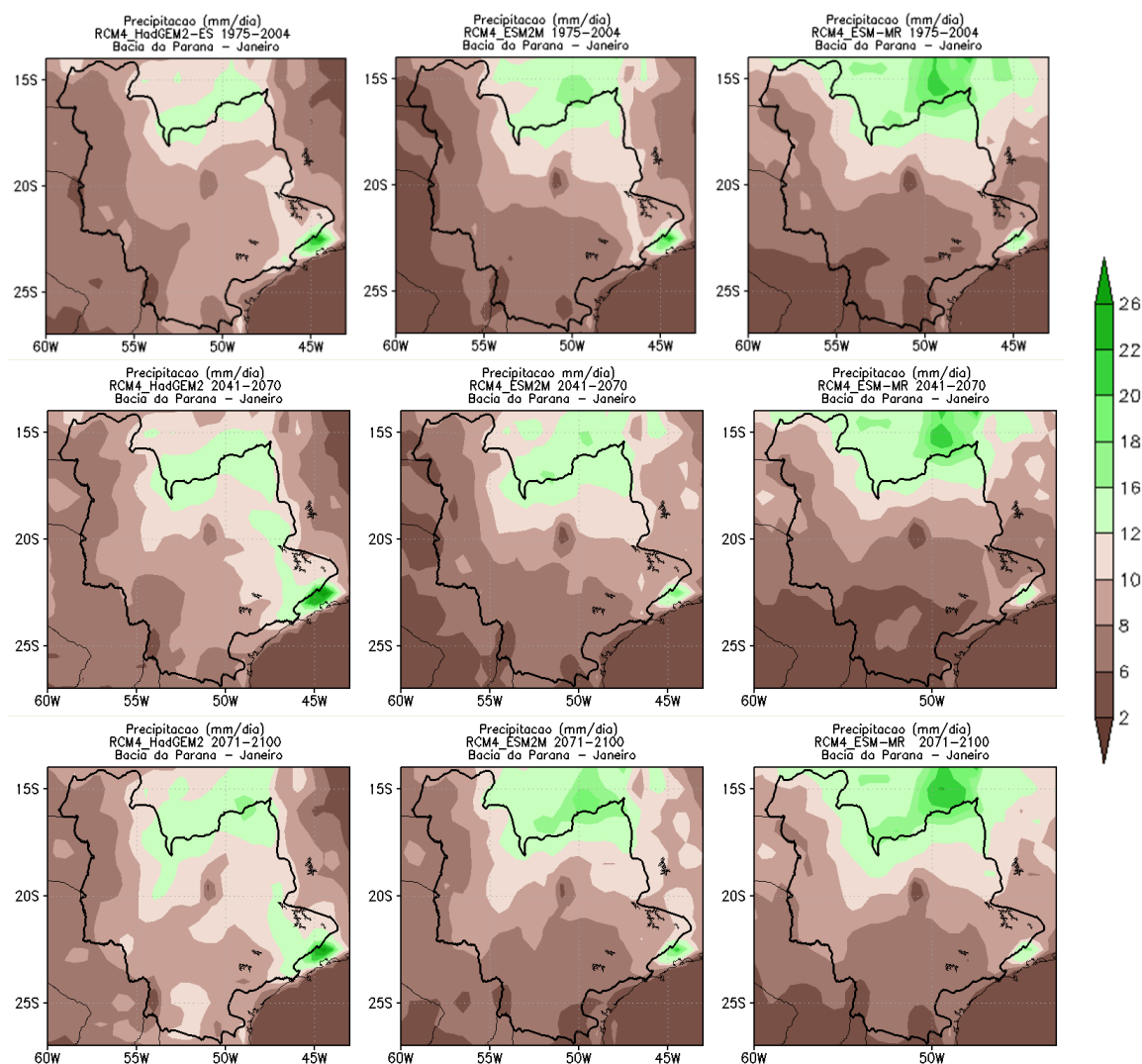


Figura 17: Climatologia mensal da precipitação com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de janeiro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

A usina de Itaipu é localizada próxima a região sudoeste da bacia do Paraná, a qual apresentou nas três regionalizações ao longo de todo o período analisado, os valores mais baixos de precipitação. As regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M mostraram que para o fim do século essa região se tornará mais úmida no mês de dezembro em relação ao período histórico. Por outro lado, no mês de janeiro, a RCM4_HadGEM2 apresentou valores mais baixos na região sudoeste ao longo do século, enquanto a RCM4_ESM-MR simulou queda nos valores de precipitação entre o período histórico e meio do século.

Marengo *et al.* (2011) analisaram as projeções climáticas do downscaling dinâmico do Hadley Centre coupled ocean–atmosphere (HadCM3) através do Eta-CPTEC sobre as bacias Amazônica, São Francisco e Paraná para todo o século XXI com o uso do SRES A1B. Os autores concluíram que a bacia do Paraná é projetada para tornar-se relativamente mais úmida através do século, o que é consistente com os resultados obtidos na bacia nas regionalizações analisadas. No entanto, deve ser considerado que os autores não fizeram a análise setorial sobre a bacia do Paraná, como realizado no presente estudo, podendo os resultados encontrados serem discrepantes.

4.3.2 Temperatura

Nas Figuras 18 e 19 foi possível analisar a temperatura sobre a bacia do Paraná, nos meses de dezembro e janeiro, para o período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100, com o uso da forçante RCP8.5.

Através da distribuição espacial pôde-se observar que a bacia do Paraná apresentou um gradiente de temperatura entre as regiões noroeste (mais quente) e sudeste (mais fria) da bacia, presente em duas regionalizações (RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M) ao longo de todo o período estudado.

Para o mês de dezembro, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM-MR apresentaram maior variação na temperatura, com valores entre os períodos meio do século e fim do século de aproximadamente 1,8°C, na região noroeste e 1,2°C na região sudeste, simulados pela RCM4_HadGEM2; e 1,8°C em toda a bacia simulado pela RCM4_ESM-MR. A regionalização RCM4_ESM2M apresentou menor variação com valor próximo a 1,2°C em toda a bacia.

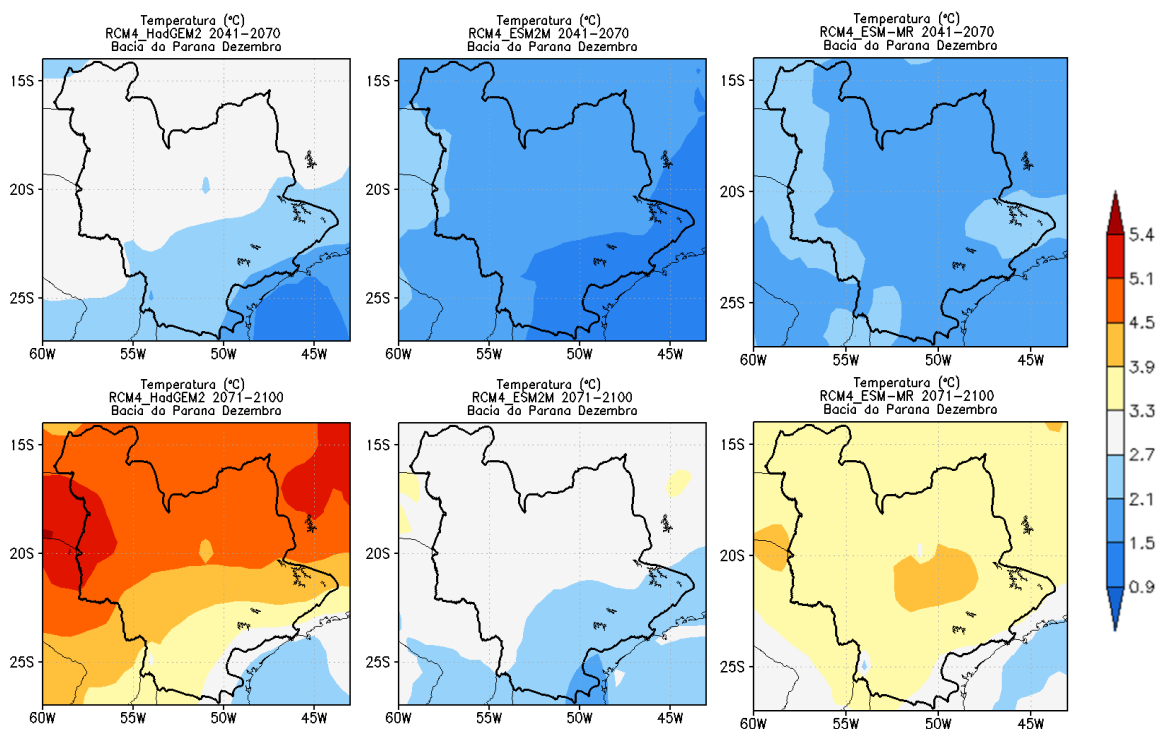


Figura 18: Climatologia mensal da diferença de temperatura entre os períodos meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 e o período histórico 1975-2004 no mês de dezembro sobre a bacia do Paraná. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

No mês de janeiro, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM-MR apresentaram mudanças mais bruscas na temperatura sobre a bacia, com variação do meio do século para o fim do século em relação ao período histórico de 1,8°C simulado pela RCM4_HadGEM2 tanto na região noroeste quanto na região sudeste. Nesse mês, a RCM4_ESM-MR apresentou o gradiente visto nas outras regionalizações, simulando valores de 1,8°C, na região noroeste e 1,2°C na região sudeste. Já a RCM4_ESM2M apresentou menor variação com valores de 0,6°C em toda a bacia.

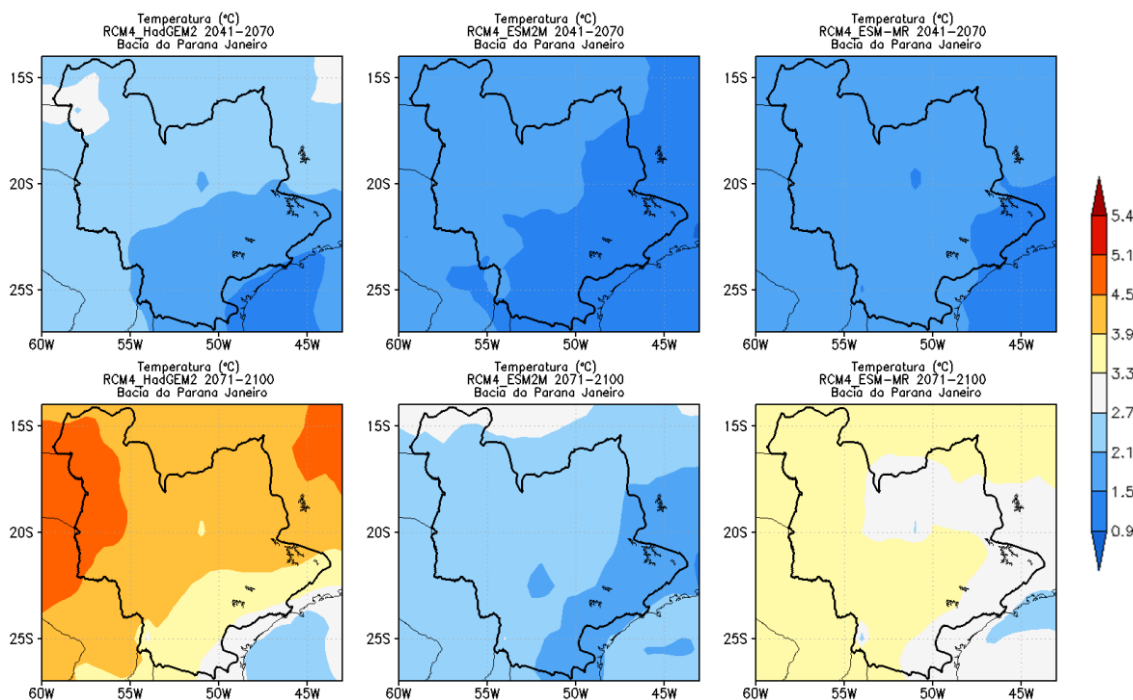


Figura 19: Climatologia mensal da diferença de temperatura entre os períodos meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 e o período histórico 1975-2004 no mês de janeiro sobre a bacia do Paraná. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Marengo *et al.* (2011) ao analisarem as principais bacias da América do Sul através do Eta-CPTEC acoplado ao HadCM3, observaram aumento de temperatura nas bacias Amazônica e do Paraná, com maior aquecimento ocorrendo na primavera. Na bacia do Paraná, a variação de temperatura para o período fim do século foi entre 3,5° e 6°C.

4.3.3 Componentes da equação de conservação de água superficial (P-E)

Nas Figuras 20 e 21 foi possível analisar os termos de conservação de água superficial (P-E) sobre a bacia do Paraná, nos meses de dezembro e janeiro, para o período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100, com o uso da forçante RCP 8.5.

Na análise da relação P-E para os meses de dezembro e janeiro, notou-se predominância da precipitação em relação à evaporação, indicando uma contribuição positiva na conservação de água superficial da bacia, nas três regionalizações analisadas, durante todo o período analisado. Além disso, foi possível observar maior contribuição (maiores valores de P-E) na região nordeste em relação a região sudoeste (menores valores de P-E), padrão este semelhante ao observado na análise da precipitação.

Para o mês de dezembro, a regionalização RCM4_HadGEM2 simulou valores de P-E semelhantes entre o período histórico e meio do século nas duas regiões da bacia, não havendo aumento na contribuição de água superficial sobre a região. Para o fim do século, houve aumento nos valores de P-E na região nordeste, mostrando maior contribuição na conservação de água superficial sobre a bacia. A RCM4_ESM2M não mostrou alteração nos valores de P-E ao longo do século. Já a RCM4_ESM-MR apresentou para o meio do século valores mais altos de P-E nas duas regiões analisadas. No fim do século, a regionalização apresentou menores valores de P-E, simulando menor contribuição na conservação de água superficial em toda a bacia.

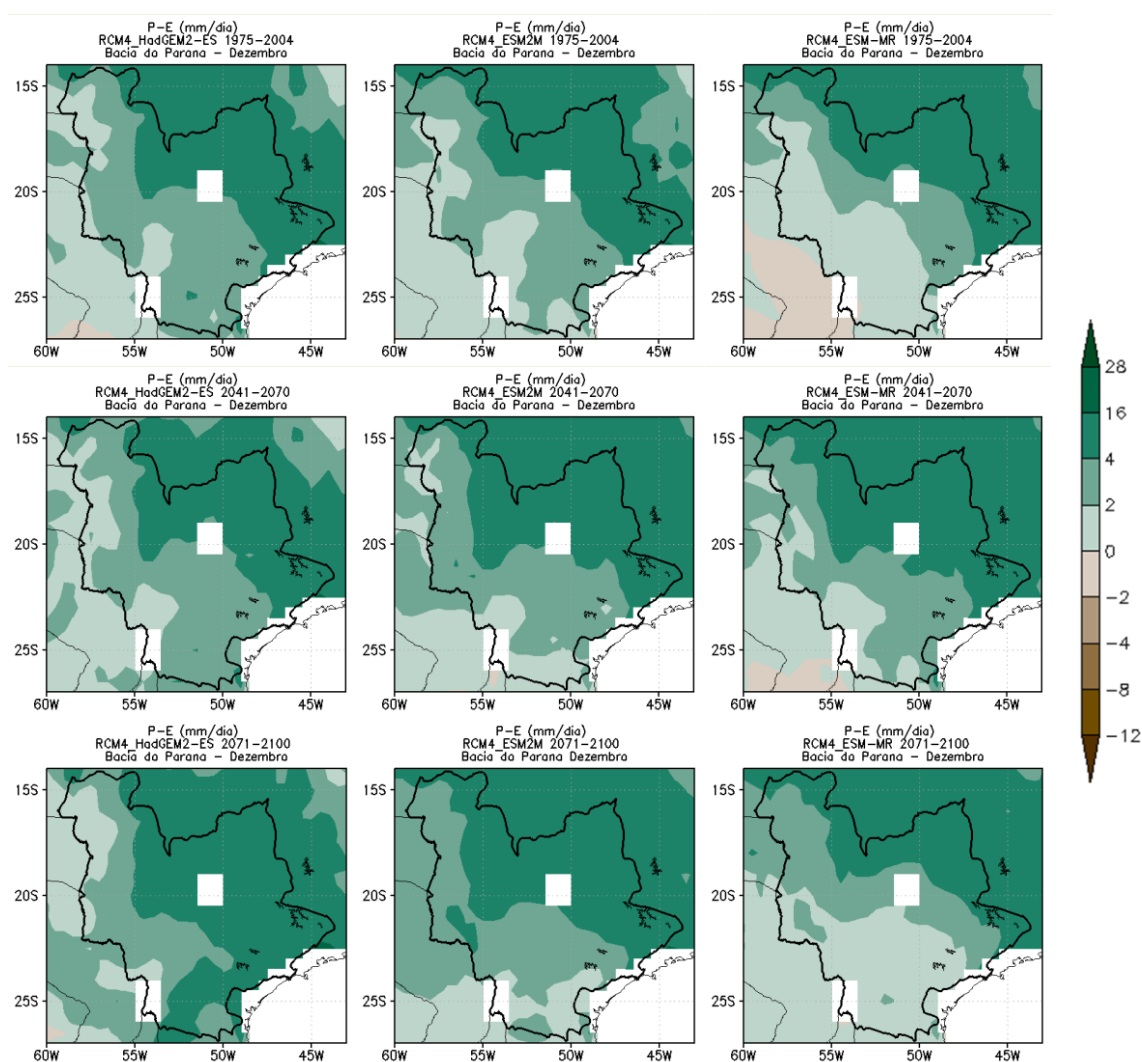


Figura 20: Climatologia mensal dos componentes da equação de conservação de água superficial (P-E), com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de dezembro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

No mês de janeiro, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M não simularam mudanças de P-E em toda a bacia ao longo do período analisado, mostrando que a conservação de água superficial se manteve constante em todo o século. A RCM4_ESM-MR simulou a região sudoeste da bacia com valores mais baixos de P-E no período meio do século, porém, apresentou aumento nos valores de P-E no fim do século, apresentando uma maior contribuição da conservação de água superficial na mesma região.

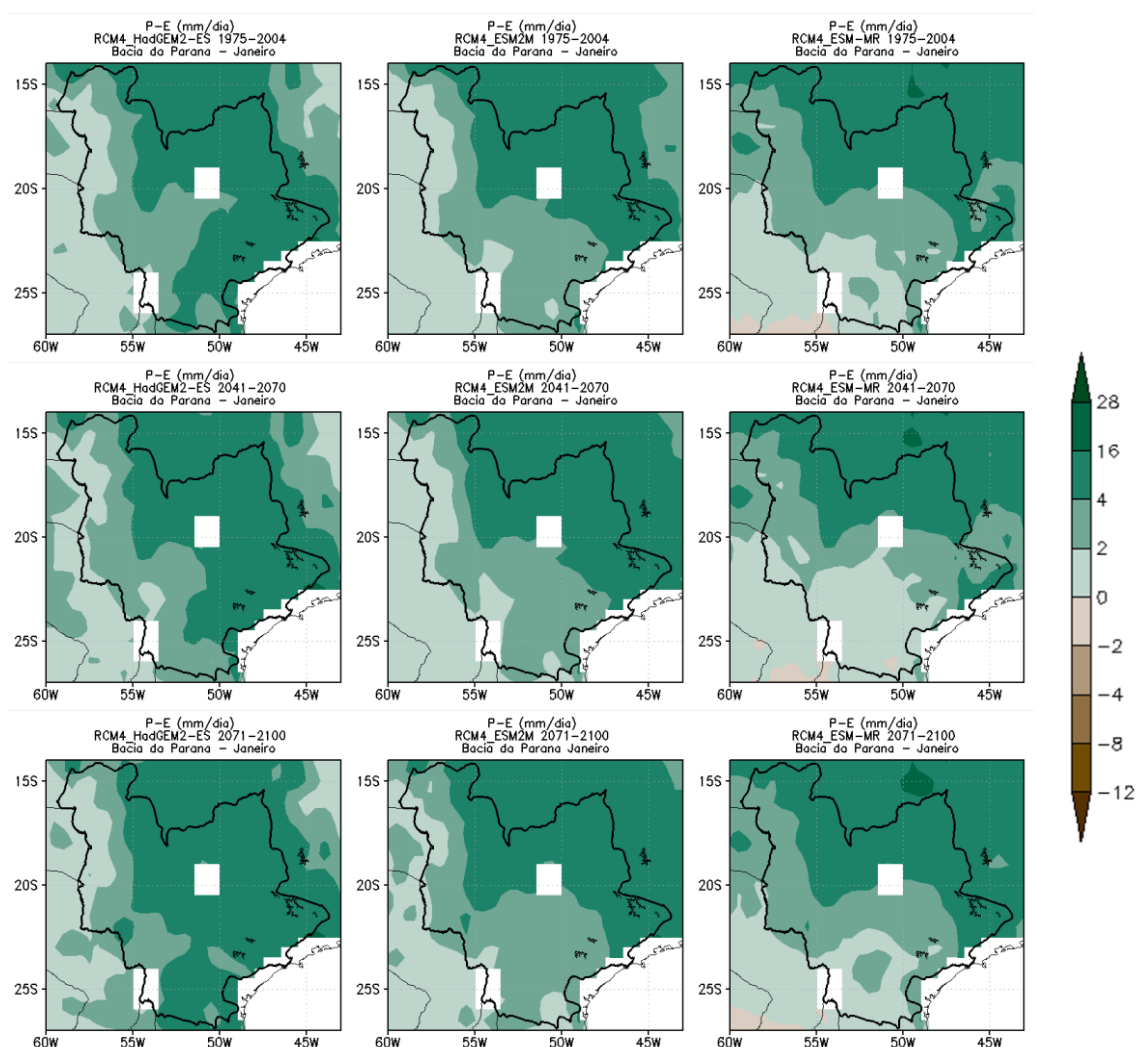


Figura 21: Climatologia mensal dos componentes da equação de conservação de água superficial (P-E), com o uso das regionalizações RCM4_HadGEM2, RCM4_ESM2M e RCM4_ESM-MR para o mês de janeiro do período histórico 1975-2004, meio do século 2041-2070 e fim do século 2071-2100 sobre a bacia do Paraná. A bacia do Paraná apresenta seus limites definidos pela linha preta.

Na análise observada em relação a contribuição de água superficial sobre a bacia do Paraná, concluiu-se que em todas as regionalizações, essa contribuição se apresentou com valores positivos, mostrando maiores valores

de precipitação do que de evaporação. No entanto, essa relação não apresentou alterações consideráveis ao longo do século, apresentando valores similares do período histórico até o fim do século como observado na regionalização RCM4_HadGEM2. Para o fim do século, a regionalização RCM4_ESM-MR simulou para o mês de dezembro menor contribuição para a conservação de água superficial, enquanto no mês de janeiro, a mesma regionalização mostrou maior contribuição para a conservação de água superficial.

Marengo *et al.* (2011) analisaram a relação de P-E para a bacia do Paraná e concluíram que essa diferença através do século se tornaria maior, o que indica que a bacia se tornará mais úmida, havendo uma contribuição positiva para a conservação de água superficial, o que foi consistente com a análise feita da precipitação e da relação P-E.

5. CONCLUSÕES

Na primeira parte do presente estudo, ao analisar o desempenho dos modelos globais na representação de padrões atmosféricos, pode-se observar que o HadGEM2 representa com qualidade a presença de um padrão característico da ZCAS, quando comparado ao GPCC. Os demais modelos subestimam esse padrão, simulando valores mais baixos do que o produto de observação. Na análise das linhas de corrente e da localização da AB, os modelos com melhor desempenho foram o HadGEM2 e o ESM2M, com o ESM-MR superestimando a presença da AB e do Cavado de Nordeste quando comparado a R1. O transporte de umidade foi mais bem representado pelo ESM2M, com o HadGEM2 e ESM-MR apresentando valores mais baixos da umidade e do transporte para a região sudeste.

Na segunda parte, na análise da melhoria da regionalização sobre a representação do padrão atmosférico característico da ZCAS, notou-se que a RCM4_HadGEM2 apresentou no Diagrama de Taylor, bom desempenho em relação ao GPCC, assim como seu respectivo modelo global, de forma que a regionalização não apresentou melhoria satisfatória quando comparado ao GPCC. Além disso, na análise qualitativa, através da distribuição espacial, a

regionalização RCM4_HadGEM2 apresentou melhor desempenho na simulação da precipitação sobre a América do Sul.

Na representação da temperatura, o Diagrama de Taylor mostrou melhor desempenho das regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM-MR quando comparado ao GPCC de alta resolução, e seus respectivos modelos globais HadGEM2 e ESM-MR também apresentaram valores estatísticos satisfatórios em relação a observação. Além disso, pode-se notar uma melhoria na representação da temperatura através das regionalizações em relação aos seus respectivos modelos globais, o que corrobora a importância de realizar uma análise em menor escala. Na análise da distribuição espacial da temperatura sobre a América do Sul, a regionalização RCM4_HadGEM2 apresentou melhor desempenho em relação ao GPCC.

Na avaliação das projeções climáticas para a precipitação no mês de dezembro, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M apresentaram aumento da precipitação na parte nordeste da bacia, e a região sudoeste, apesar de apresentar valores mais baixos, também apresentaram aumento na precipitação ao longo do século. Já a RCM4_ESM-MR apresentou estabilização na região nordeste, e na região sudoeste foi possível observar aumento nos valores da precipitação até o meio do século com queda nos valores para o fim do século.

No mês de janeiro, a regionalização RCM4_HadGEM2 apresentou comportamento similar ao mês de dezembro, com estabilização da precipitação ao longo do século na região nordeste, e queda nos valores de precipitação para a região sudoeste. A RCM4_ESM-MR apresentou aumento da precipitação na parte nordeste e queda na parte sudoeste da bacia até o meio do século.

Em relação à temperatura, todas as regionalizações apresentaram aumento da temperatura ao longo do século. Em ambos os meses analisados, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM-MR apresentaram maior variação de temperatura em relação ao período histórico por toda a bacia, enquanto a regionalização RCM4_ESM2M apresentou aumento, porém, com menor variação dos valores de temperatura sobre a bacia do Paraná.

Na análise da relação P-E sobre a bacia, no mês de dezembro, a RCM4_HadGEM2 simulou uma conservação dos valores entre o período

histórico e meio do século, com aumento na região nordeste da bacia no fim do século. Enquanto isso, a RCM4_ESM-MR apresentou maiores valores de P-E no meio do século, apresentando uma queda no fim do século em toda a bacia. A regionalização RCM4_ESM2M não apresentou variação na relação P-E em toda a bacia para o período analisado.

No mês de janeiro por sua vez, as regionalizações RCM4_HadGEM2 e RCM4_ESM2M não apresentaram variações na relação P-E ao longo do século, enquanto a RCM4_ESM-MR simulou valores mais baixos de P-E na região sudoeste da bacia para o período meio do século e aumento na relação P-E para toda a bacia no fim do século.

Com isso, ao analisar o desempenho das regionalizações na representação dos padrões atmosféricos, além da sua avaliação em relação ao produto de observação, concluiu-se que a regionalização RCM4_HadGEM2 e seu respectivo modelo global HadGEM2 apresentaram melhor simulação da precipitação e da temperatura. Considerando que essas características tenham sido conservadas na realização das projeções climáticas, pode-se afirmar que as projeções realizadas pela regionalização RCM4_HadGEM2 apresentaram informações mais precisas sobre o clima da bacia do Paraná para os períodos analisados.

Sendo assim, a representação do aumento de precipitação sobre a região sudoeste da bacia no mês de dezembro, região esta onde está localizada a usina de Itaipu, e a queda no mês de janeiro, exige medidas mitigatórias para a conservação do fornecimento de energia. Para a contribuição da conservação de água superficial, notou-se que a regionalização em questão não apresentou alteração nos valores de P-E. Tal fato pode estar relacionado com a maior variação de temperatura na região, o que pode gerar maior evaporação sobre a região, de forma a existir um equilíbrio entre a precipitação e a evaporação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ANDERSON, J. L.; BALAJI, V.; BROCCOLI, A. J.; COOKE, W. G.; DELWORTH, T. L.; DIXON, K. W.; DONNER, L. J.; DUNNE, K. A.; FREIDENREICH, S. M.; GARNER, S. T.; GUDGEL, R. G.; GORDON, C. T.; HELD, I. M.; HEMLER, R. S.; HOROWITZ, L. W.; KLEIN, S. A.; KNUTSON, T. R.; KUSHNER, P. J.; LANGENHOST, A. R.; LAU, N.; LIANG, Z.; MALYSHEV, S. L.; MILLY, P. C. D.; NATH, M. J.; PLOSHAY, J. J.; RAMASWAMY, V.; SCHWARZKOPF, M. D.; SHEVLIKOVA, E.; SIRUTIS, J. J.; SODEN, B. J.; STERN, W. F.; THOMPSON, L. A.; WILSON, R. J.; WITTENBERG, A. T.; WYMAN, B. L. **The new GFDL global atmosphere and land model AM2-LM2: evaluation with prescribed SST simulations**. American Meteorological Society, 2004, páginas: 4642-4673, volume 17.

BAETTIG, M.; MARTIN, W.; DIETER, M. **A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century**. Geophysical Research Letters, 2007, páginas: 1-6, volume 34.

BARRELA, W.; Montag, L.; Petrere, M.; Welber, S. S. **As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes**. Matas ciliares: conservação e recuperação, 2001, páginas: 87 - 207, volume 1.

BEVEN, K. J & KIRKBY, M. J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology**. Hydrological Science Bulletin, 1979, páginas: 43-69, volume 24.

JONES, C. & HOREL J. D. **A Circulação da Alta da Bolívia e a atividade convectiva sobre a América Do Sul**. Revista Brasileira de Meteorologia, 1990, páginas: 379-387, volume 5(1).

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. **Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Regionalization Scenarios**. American Journal of Climate Change, 2014, páginas: 512-527, volume 3.

CLARK, D. B & GEDNEY, N. **Representing the effects of subgrid variability of soil moisture on runoff generation in a land surface model**. Journal Geophysical Research, 2008, páginas:1-13, volume 113.

DEMARIA, E.M.C.; MAURER, E.P.; THRASHER, B.; VICUÑA, S.; MEZA, F.J. **Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story?** Journal of Hydrology, 2013, páginas: 128-138, volume 502.

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.; KRADING, J.P.; MALYSHEV, S.L.; MILLY, P.C.D.; PHILLIPPS, P.J.; SENTMAN, L. T.; SAMUELS, B. L.; SPELMAN, M. J.; WINTON, M.; WITTENBERG, A. T.; ZADEH, N. **GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: physical formulation and baseline simulation characteristics.** *Journal Climate*, 2012, páginas: 6646-6665, volume 25(19).

DICKINSON R. E; HENDERSON-SELLERS A. & KENNEDY P. J. **Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model.** National Center for Atmospheric Research Tech Note (NCAR), 1993, páginas: 1 – 72.

ESERY, R. L. H.; Best, M. J.; BETTS, R. A.; Cox, P. M. **Explicit Representation of Subgrid Heterogeneity in a GCM Land Surface Scheme.** *Journal of Hydrometeorology*, 2003, páginas: 530-543, volume 4.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S. & TEBALD, C. **Linking climate change Modelling to impacts studies: recent advances in regionalization techniques for hydrological modeling.** *International Journal of Climatology*, 2007, páginas: 1547-1579, volume 27.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. & ROPELEWSKI, C. F. **The South America Monsoon Circulation and its relationship to rainfall over West-Central Brazil.** *American Meteorological Society*, 2004, páginas: 47-66, volume 17.

GIORGI F.; FRANCISCO R. & PAL J. S. **Effects of a sub-grid scale topography and landuse scheme on surface climate and hydrology. I. Effects of temperature and water vapor disaggregation.** *Journal Hydrometeorological*, 2003, páginas: 317–333, volume 317.

GIORGI, F. **The introduction to the CREMA experiment especial issues.** *Climate Change*, 2014, páginas: 1-5, volume 125.

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.; KORNBLUEH, L.; MATEI, D.; MAURITSEN, T.; MIKOLAJEWICZ, U.; MÜLLER, W.; NOTZ, D.; RADDATZ, T.; RAST, S.; ROECKNER, E.; SALZMANN, M.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SEGSCHEIDER, 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. doi:10.1594/WDCC/CMIP5.MXELr8.

GRIMM, A. M. **Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change.** *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, páginas: 537-554, volume 25.

HERDIES, D. L.; DA SILVA A.; SILVA DIAS M. A. F. & FERREIRA R. N. **The moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America.** Journal of Geophysical Research, 2002, páginas: 1 - 10, volume 107.

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.** Geosci Model Dev Discuss, 2011, páginas: 723-757, volume 4.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 1990: **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment-Report of IPCC Working Group.** Cambridge Univ. Press. 1990.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 1996a: **Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Second Assessment Report.** Cambridge Univ. Press. 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2001b: **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability- Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report.** Cambridge Univ. Press. 2001.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2007: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers.** IPCC Geneva, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2013. **Climate Change 2013: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge Univ. Press, New York, 2013.

JONES, C. & CARVALHO, L. M. V. **Climate Change in the South American Monsoon System: Present Climate and CMIP5 Projections.** Journal of Climate, 2013, páginas: 6660-6678, volume 26.

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. **The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.** Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, páginas: 437–471, volume 77.

KODAMA, Y. **Large-Scale Common Features of subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ and the SACZ).** Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. *Journal Meteorological Society Japan*, 1992a, páginas: 813-836, volume 70.

LENTERS, J. D. & COOK, K. H. **On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, páginas: 656-677, volume 54.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. **Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil.** *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, páginas: 121-135, volume 101.

LLOPART, M.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; ROSMERI, P. R. & CUADRA, S. V. **Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basin.** *Climate change*, 2014, páginas: 111-125, volume 125.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C. & NICOLLINI, M. **Climatology of the low level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability.** *Journal of Climate*, 2004, páginas: 2261-2280, volume 17.

MARENGO, J. A.; Jones R.; Alves, L. M.; Valverde, M. C. **Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system.** *International Journal of Climatology*, 2009, páginas: 2241-2255, volume 29.

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. **Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate Models.** *Climate Dynamics*, 2010a, páginas: 1073-1097, volume 35.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. & RENOM, M. **An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends.** *Climate Change*, 2010b, páginas: 509-529, volume 98.

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. **Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River basins.** *Climate Dynamics*, 2011, páginas: 1829-1848, volume 38.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. & TORRES, R. R. **Regional climate change scenarios in the Brazilian Pantanal watershed.** Climate Research, 2015, páginas: 201-213, volume 68.

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.; MEEHL, G. A., COVEY, C, TAYLOR, K. E., DELWORTH, T., STOUFFER, R. J., LATIF, M., McAVANEY, B., MITCHELL, J. F. B. **The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A New Era in Climate Change Research.** American Meteorological Society, 2007, páginas: 1383-1394, volume 88.

MILLY P. C. D; DUNNEK. A. & VECCHIA A. V. **Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate.** Nature, 2005, páginas: 347–350, 2005, volume 438.

MORAN, J. M. & MORGAN, M. D. Meteorology: the atmosphere and the science of weather. Burgess Publishing, 1986, página: 502.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S.J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. **The next generation of scenarios for climate change research and assessment.** Nature, 2010, páginas: 747-756, volume 463.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRIIBLER, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press: Cambridge, 2000, página: 599.

NUNES, L. H.; KOGA VICENTE, A.; CANDIDO, D. H. **Tempo e Clima no Brasil. Clima da Região Sudeste do Brasil,** capítulo 16, edição 1, Oficina de Textos, 2009, páginas: 245 – 256.

NUNES, A. M. B. & ROADS, J. O. **Influence of Precipitation Assimilation on a Regional Climate Model's Surface Water and Energy Budgets.** Journal of Hydrometeorology, 2007, página: 642-664, volume 8.

PAL J. S.; GIORGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N.; SOLMON, F.; RAUSCHER, S. A.; GAO, X.; FRANCISCO, R.; ZAKAY, A.; WINTER, J.; ASHFAQ, M.; SYED, F. S.; SLOAN, L. C.; BELL, J. L.; DIFFENBAUGH, N. S.; KARMACHARYA, J.;

KONARÉ, A.; MARTINEZ, D.; DA ROCHA, R. P.; STEINER, A. L. **Regional climate modeling for the developing world: the ICTP Reg-CM3 and RegCNET**. Bulletin American Meteorological Society, 2007, páginas: 1395-1409, volume 88.

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, 2015, páginas: 11-23, volume 131.

PUMO, D.; CARACCILO, D.; VIOLA, F. & NOTO, L.V. 2016. **Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins**. Science of the total environmental, 2015, páginas: 76-92, volume 542.

ROADS, J.; LAWFORD, R.; BAINTO, E.; BERBERY, E.; CHEN, S.; FEKETE, B.; GALLO, K.; GRUNDSTEIN, A.; HIGGINS, W.; KANAMITSU, 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, 2003, páginas: 1 - 39, volume 108.

ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; DUTRA, L. M. M.; LIOPART, M. P. & COPPOLA, E. **Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain**. Climate Change, 2014, páginas: 95-109, volume 125.

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. **Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico**. Revista Brasileira de Meteorologia, 2015, páginas 435-456, volume 30.

SARKAR, A. **Impact of climate change on the runoff regime of an eastern Himalayan river basin**. Global Nest Journal, 2015, páginas: 323-333, volume 17.

SHI, W.; HIGGINS, R. W.; YAROSH, E. & KOUSKY, V. E. **The Annual Cycle and Variability of Precipitation in Brazil**. NCEP/Climate Prediction Center Atlas No 9, 2000. Acesso em 27 jun. 2017, páginas: 12-13.

SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; ZIESE, M., RUDOLF, B. **GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle**. Theoretical and Applied Climatology, páginas: 15–40, volume 115.

SIERRA, J. P.; ARIAS, P. A. & VIEIRA, S. C. **Precipitation over Northern South America and Its Seasonal Variability as Simulated by the CMIP5 Models.** *Advances in Meteorology*, 2015, páginas: 1 - 22, volume 2015.

SUTTON R. T.; DONG, B. & GREGORY, J. M. **Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations.** *Geophysical Research Letters*, 2007, páginas 1-5, volume 34.

TAYLOR, K. E. **Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram.** *Journal Geophysical Research*, 2001, páginas: 7183-7192, volume 106.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J. & MEEHL, G. A. **An Overview of CMIP5 and the experiments design.** *American Meteorological Society*, 2012, páginas: 485-498, volume 93.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L. & FULLER, B. B. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local.** *Revista Uniara*, 2007, páginas: 137 – 156, volume 20.

TORRES, R. R.; LAPOLLA D. M.; MARENGO, J. A.; LOMBARDO, M. A.. **Socio-climatic hotspots in Brazil.** *Climate Change*, 2012, páginas: 597-609, volume 115.

TORRES, R. R. & MARENGO, J. A. **Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets.** *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, páginas: 579-587, volume 117.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. **Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models.** *Geophysical Research Letters*, 2006, páginas: 1-4, volume 33.

VERA, C. & SILVESTRI G. **Precipitation interannual variability in South America from the WCRP-CMIP3 multi-model dataset.** *Climate Dynamic*, 2009, páginas: 1003-1014, volume 32.

ZHOU, J. & LAU, K. M. **Does a Monsoon Climate exist over South America?** *Journal of Climate*, 1998, páginas: 1020-1040, volume 11.