

# ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA PARA OS PERÍODOS ATUAL (1961-1990) E FUTURO (2011-2100) NA BACIA DO RIO TAQUARI-ANTAS, RS

EXTREME PRECIPITATION RATES FOR PRESENT (1961-1990) AND FUTURE PERIODS (2011-2100) IN THE TAQUARI-ANTAS RIVER BASIN, RS

## *Carina Krüger Bork*

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

## *Andréa Souza Castro*

Professora adjunta no Centro de Engenharias da UFPel.

## *Diuliana Leandro*

Professora adjunta no Centro de Engenharias da UFPel.

## *Luciara Bilhalva Corrêa*

Professora adjunta no Centro de Engenharias da UFPel.

## *Tirzah Moreira Siqueira*

Professora adjunta no Centro de Engenharias da UFPel.

### **Endereço para correspondência:**

Tirzah Moreira Siqueira – Rua Benjamin Constant, 989, Centro – 96010-020 – Pelotas (RS), Brasil – E-mail: tirzahmelo@hotmail.com

**Recebido:** 08/02/2017

**Aceito:** 25/08/2017

## **RESUMO**

A região da Bacia do Rio Taquari-Antas eventualmente sofre com extremos climáticos como estiagens e precipitações extremas. Este trabalho objetivou comparar índices de precipitação extrema entre o período atual (1961-1990) e os futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) por meio de projeções de precipitação anual para três pontos na bacia, obtidas de modelos de circulação global (MCGs) e regional (MCR), referentes ao cenário climático A1B do Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Para cada ponto foram consideradas dez projeções climáticas diferentes geradas pelos modelos. Tendências mais expressivas nos índices analisados foram identificadas nos MCRs. Segundo os índices obtidos, a região poderá ser afetada com o aumento de eventos extremos de precipitação, principalmente pelo acréscimo de precipitação total anual, que pode ser verificado pelo aumento de dias no índice R30mm e pela maior concentração nos índices R95p e R99p. Tais alterações podem influenciar os setores econômico, ambiental e social da região.

**Palavras-chave:** projeções de precipitação; eventos extremos; modelos climáticos.

## **ABSTRACT**

The Taquari-Antas River basin region eventually suffers from climatic extremes such as droughts and intense precipitation. This study aimed to compare extreme precipitation rates between the current period (1961-1990) and future ones (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100) using annual precipitation projections for three points located in this basin, obtained from Global (MCG) and Regional Circulation Models (MCR), referring to the A1B climatic scenario of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. For each point, ten different climatic projections generated by these models were considered. More expressive trends in the analyzed rates were detected for MCRs. Based on the rates obtained in this study, the region may be affected by the increase in extreme events of precipitation, mainly by the increasing of annual total precipitation, which can be verified by the higher number of days of R30mm index and higher cumulative precipitation in the R95p and R99p indices. Such changes may influence the economic, environmental and social sectors of the region.

**Keywords:** precipitation projections; extreme events; climate models.

## INTRODUÇÃO

Os principais fatores responsáveis pela mudança climática e que contribuem para o efeito estufa, entre outras atividades antrópicas, são o desmatamento, a alteração do uso do solo e o aumento da concentração de gases do efeito estufa, derivados do consumo de combustíveis fósseis (IPCC, 2014). Tais fatores contribuem para o surgimento de eventos extremos. Shim *et al.* (2017) ressaltam que o conhecimento desses eventos para o clima futuro são necessários para o desenvolvimento de planos de adaptação e mitigação de impactos.

Atualmente, o nível de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera é de 430 ppm, conforme Stern (2014), com projeções de alcançar 700 ppm em diferentes cenários futuros de mudanças climáticas (JALOTA *et al.*, 2013). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura da superfície da Terra poderá aumentar de 1,1 para 6,4°C durante o século XXI (IPCC, 2014). Além disso, acredita-se que poderá haver consequências adversas sobre o sistema hidrológico, tais como eventos extremos de secas e/ou enchentes, podendo resultar em significativas alterações nos regimes de vazão dos rios (PATTNAYAK *et al.*, 2017).

No Brasil, alterações sobre o clima também estão sendo sentidas com relação às mudanças nos regimes de precipitação. No ano de 2012, a Região Norte sofreu uma das piores cheias registradas nos últimos 15 anos (CAMPOS *et al.*, 2013), enquanto o Sudeste enfrentou com dificuldade uma crise hídrica em 2015. Murumkar e Arya (2014) destacam que a precipitação é um dos principais indicadores nos estudos de impacto de mudanças climáticas, salientando sua importância para a gestão dos recursos hídricos.

Eventos extremos do clima, como falta ou excesso de precipitação, também podem causar prejuízos econômicos de larga escala. Nesse contexto, o Brasil é responsável por 27% da produção global de soja, sendo que o Estado do Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor dessa cultura no país (MELO *et al.*, 2015).

Apesar da importância do Rio Grande do Sul, principalmente no setor agrícola, para a economia brasileira, existem poucos estudos em nível regional sobre as consequências de eventos como precipitações extremas. Tal fato pode acarretar significativas perdas na produção agrícola, influenciando também os demais setores da economia. Além disso, populações de cidades

localizadas no entorno de rios sofrem danos materiais causados pelas enchentes.

Eventos climáticos extremos são acontecimentos raros que ocorrem em determinado local e época do ano. Quando isolados, não devem ser atribuídos diretamente à mudança climática antropogênica, pois podem ter ocorrido naturalmente. Quando esse padrão meteorológico persiste por algum tempo, como, por exemplo, ao longo de uma estação do ano, pode então ser classificado como evento climático extremo (secas ou chuvas intensas durante a estação) (IPCC, 2007).

Eles também podem ser analisados como anomalias da climatologia, em escalas de tempo que podem variar de dias a milênios. Contudo, é difícil atribuí-los ao tempo e ao clima, pois há diferentes considerações espaciais e temporais. Recentemente, eventos extremos de curta duração passaram a ser considerados os mais importantes pelos climatologistas, pois alguns modelos climáticos e estudos de projeções do clima para o futuro apontam maiores frequências e intensidades de chuvas, ondas de calor e frio, períodos secos, temporais e furacões quando considerados em cenários de aquecimento global (MARENGO *et al.*, 2007).

A importância dos estudos sobre eventos climáticos extremos cresceu nos últimos anos e, com ela, a necessidade de dados de boa qualidade (ANGÉLIL *et al.*, 2017). Nesse sentido, os modelos climáticos estão sendo constantemente melhorados para fornecer dados e informações sobre o clima necessários a tais pesquisas. Nessa perspectiva, o IPCC publica regularmente Relatórios de Avaliação (ARs), aumentando o seu nível de confiança sobre os resultados neles apresentados. Até o momento, foram publicados cinco relatórios: AR1 (1990), AR2 (1995), AR3 (2001), AR4, em 2007, e, o mais recente, AR5, em 2014, com o propósito de contribuir para o planejamento e a tomada de decisões pelos governantes.

De acordo com o IPCC (2014), uma das principais melhorias da nova geração de modelos, em relação ao último relatório, refere-se à inclusão da física do oceano melhorada e de um acoplamento fisicamente consistente entre a atmosfera e o oceano, tornando desnecessárias as correções de fluxo conhecidas como processos *ad hoc*. O modelo global HADCM3, aplicado neste trabalho — individualmente ou para derivar

os dados do modelo regional ETA —, já não utiliza tal processo de correção (GORDON *et al.*, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Atualmente, os estudos sobre eventos extremos vêm consolidando o uso de índices estatísticos de temperatura e precipitação para detectar alterações nos padrões climáticos dessas variáveis (ARAÚJO & BRITO, 2011; DEREZYNSKI *et al.*, 2013; DONAT *et al.*, 2013; KIKTEV *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2009; 2013; VALVERDE & MARENGO, 2014; VINCENT *et al.*, 2005). A principal função desses índices é avaliar as mudanças na intensidade, frequência e duração dos eventos de precipitação e temperatura (PANDA *et al.*, 2014; DWYER & GORMAN, 2017). Os índices climáticos são calculados a partir de dados observados ou projeções de variáveis meteorológicas individuais, tais como precipitação e temperaturas máxima e mínima. O uso desses índices tem por objetivo sintetizar informações sobre as mudanças climáticas (ZWIERS *et al.*, 2013). Contudo, o mais importante é contabilizar os eventos extremos de curto e/ou longo prazo devido a seu potencial para causar impactos significativos (MARENGO *et al.*, 2009).

Um exemplo da aplicação desses índices pode ser encontrado no trabalho de Donat *et al.* (2013), que utilizaram 17 índices de temperatura e 12 de precipitação, com base em temperaturas diárias máximas e mínimas, além de observações de precipitação. Os dados foram obtidos por meio de 7 mil estações meteorológicas de temperatura e 11 mil de precipitação ao redor do mundo, para o período de 1901 a 2010. Os resultados mostraram mudanças significativas para os índices derivados da temperatura mínima diária ao longo dos 110 anos de registro, mas com tendências mais fortes para as últimas décadas. Observou-se aquecimento em todas as estações, sendo mais relevante nos meses mais frios. Os índices de precipitação também mostraram tendências importantes, porém com mudanças espacialmente mais heterogêneas em comparação às mudanças de temperatura. No entanto, os resultados indicaram mais áreas com tendências significativas de aumento na quantidade, intensidade e frequência de precipitação extrema do que áreas com tendências decrescentes.

Dias frios, noites frias e geadas têm se tornado menos frequentes, enquanto a ocorrência de dias quentes, noites quentes e ondas de calor têm aumentado na América do Sul (MARENGO *et al.*, 2009; VINCENT

*et al.*, 2005). O mesmo foi observado por Panda *et al.* (2014) na Índia. Tais ocorrências podem indicar o início de um período de alterações climáticas em longo prazo, configurando uma mudança no clima.

Zilli *et al.* (2017), em análise na costa sudeste do Brasil entre 1938 e 2012, identificaram uma tendência positiva na intensidade da precipitação diária extrema e negativa no número de dias de chuva leve (menos de 5 mm/dia), principalmente em grandes áreas urbanas da cidade de São Paulo. Pedron *et al.* (2017) estudaram a série histórica de precipitação diária de Curitiba (PR), de 1889 a 2013, e notaram tendência no aumento de épocas de chuvas intensas, com quantidades maiores que 10, 20 e 40 mm sendo observadas com mais frequência, e redução do número de dias chuvosos com pluviosidade abaixo de 10 mm.

Dereczynski *et al.* (2013), em estudo feito para duas estações na cidade do Rio de Janeiro, utilizaram as projeções do modelo climático MCG-HadCM3 acoplado com o MCR-Eta 40, considerando o cenário A1B, para obter índices de eventos extremos no período futuro (2011-2100), comparando-os com dados observados entre 1961 e 1990. Os autores verificaram que cerca de 40 a 70% dos dias do ano ficaram mais quentes, semelhante ao observado para as noites quentes (55 a 85% mais frequentes), e destacaram o aumento da ocorrência de chuvas intensas por ano.

Santos *et al.* (2009) analisaram 18 postos no Estado do Ceará, obtendo valores significativos de aumento para os índices de dias consecutivos secos e os úmidos e mudanças positivas para a precipitação total, o que corrobora com os achados de Marengo *et al.* (2007), que também encontraram aumento de pluviosidade para o Nordeste brasileiro. Melo *et al.* (2015) investigaram sete localizações no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, para o cenário climático A1B. Os autores verificaram um aumento expressivo de precipitação para quatro localizações e, mais ao sul, redução em curto prazo, revelando que as mudanças podem atingir de forma desigual uma mesma região.

É possível perceber que a maioria desses estudos apresentados em algumas localizações brasileiras revela uma tendência de aumento de eventos extremos ao longo deste século, quando comparado ao clima do século passado. Tal constatação permite projetar severos problemas de estiagem ou chuva

intensa no futuro. Dentro dessa problemática ambiental, o objetivo foi comparar diversos índices de precipitação extrema obtidos para o clima no período atual (1961-1990) com os obtidos para o período futuro (2011-2100). Para tanto, foram utilizadas projeções de precipitação geradas por diferentes modelos climáticos para três pontos da bacia do rio Taquari-Antas, com base no cenário climático A1B

do AR4. Essa bacia foi escolhida por enfrentar extremos de estiagem e chuva intensa em um mesmo ano. Adicionalmente, esta pesquisa buscou verificar as tendências crescente ou decrescente nas séries anuais desses índices por meio do teste de hipóteses de Mann-Kendall, bem como determinar se diferentes eventos extremos podem ocorrer com maior relevância ao longo do século XXI.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização da área

A bacia do rio Taquari-Antas (Figura 1) se localiza no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul e compreende as províncias geomorfológicas do Planalto Meridional e da Depressão Central, totalizando uma área de aproximadamente 26.406 km<sup>2</sup> (SEMA, 2012).

As nascentes do rio Taquari-Antas localizam-se no extremo leste da bacia, com a denominação de rio das Antas até a confluência com o rio Guaporé, quando passa a se chamar rio Taquari, desembocando no rio Jacuí. Possui extensão de 530 km desde as nascentes

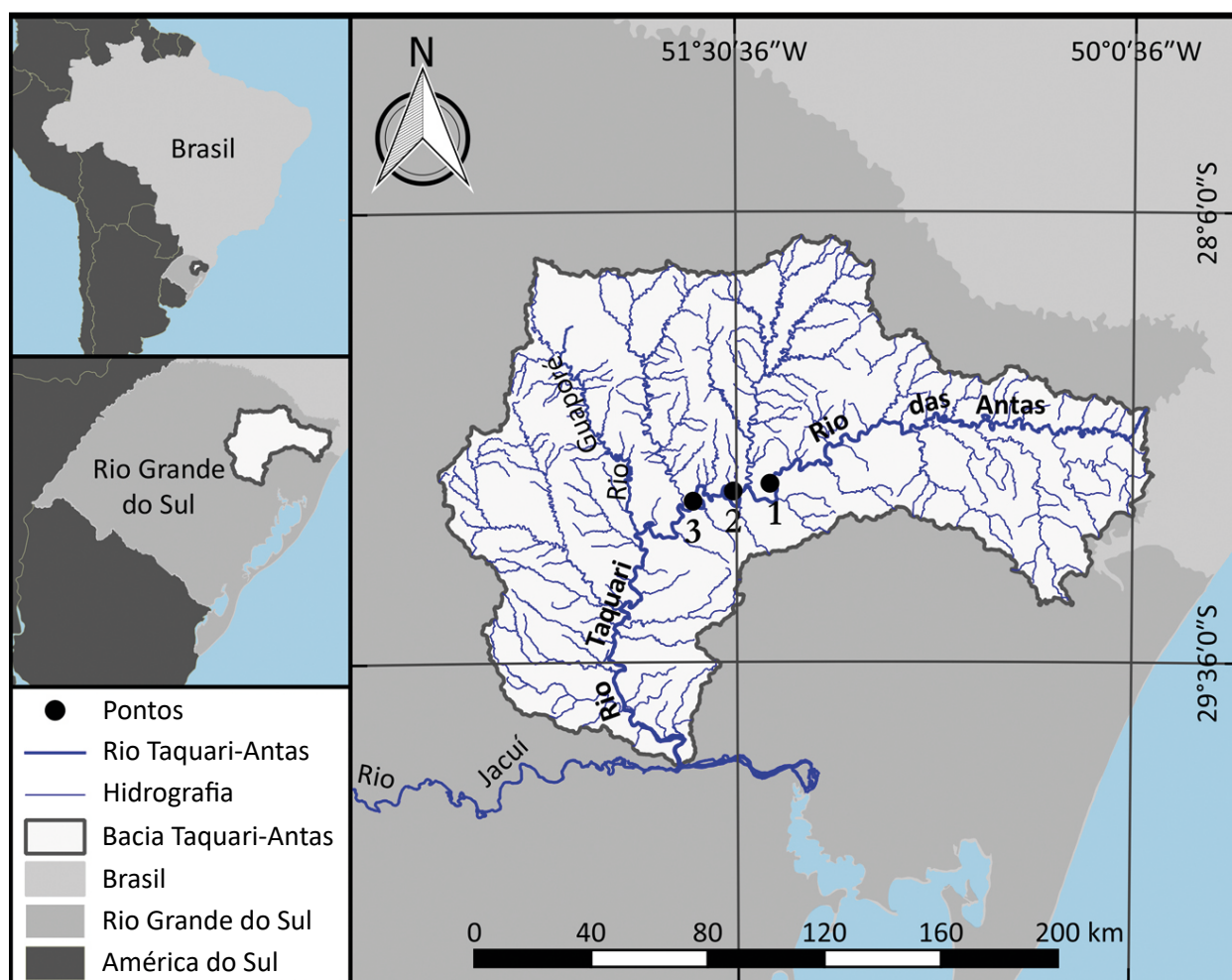


Figura 1 – Mapa da bacia do rio Taquari-Antas.



até a foz, sendo que em 390 km denomina-se rio das Antas e em 140 km, rio Taquari (LARENTIS *et al.*, 2008).

Larentis (2004), em estudo sobre a bacia do rio Taquari-Antas, observa que os regimes de precipitação ao longo do ano são bem distribuídos, com gradiente decrescente dos valores médios anuais no sentido da montante para a jusante, apresentando média acumulada anual em torno de 1.700 mm.

O tipo climático predominante é o subtropical úmido, com duas variedades principais, segundo a classificação de Köppen: Cfa, que se refere ao clima temperado, com verão mais ameno, não atingindo 22°C de temperatura no mês mais quente em regiões com altitudes inferiores a 600 m; e Cfb, definindo clima subtropical, com verão mais quente, alcançando temperaturas

maiores que 22°C em altitudes superiores a 600 m (ALVARES *et al.*, 2013).

A bacia possui características físicas e antrópicas diferenciadas, tais como: áreas com alto índice de industrialização; áreas com predomínio de produção primária; e zonas intensamente urbanizadas e com riscos de inundação. Os municípios integrantes dessa bacia concentram 20% do Produto Interno Bruto (PIB) estadual, caracterizando-se pela base econômica voltada a um setor industrial em crescimento. Quanto ao uso agrícola, a área ocupada é maior que um milhão de hectares, com predomínio das culturas de milho, soja e arroz nas partes mais planas, ao sul da bacia. Alguns dos problemas enfrentados na região, como o aumento dos riscos de erosão, levando ao assoreamento dos corpos hídricos, se devem às limitações do relevo e da drenagem (FEPAM, 2015).

## Dados meteorológicos e modelos climáticos

As séries temporais de precipitação foram obtidas a partir de modelos climáticos globais e regionais para um cenário futuro A1B utilizados no Projeto de P&D Estratégico da Chamada 010/2008 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), intitulado “Efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias hidrográficas e na energia assegurada de aproveitamentos hidrelétricos”, e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instituição participante do projeto, dentre outras unidades de ensino, como o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS).

Na Figura 1 estão indicadas as localizações na bacia para as quais estavam disponíveis séries temporais diárias de precipitação geradas para os períodos de 2011-2100 e 1961-1990, este aqui denominado período atual. Na Tabela 1 são apresentadas as localizações desses pontos.

Os dados climáticos associados a cada ponto na Tabela 1 são referentes ao ponto da grade do modelo climático mais próximo ao centroide da sub-bacia que drena para cada um dos três pontos no rio. Os pontos foram definidos como exutórios de sub-bacias que correspondem às localizações das usinas hidrelétricas existentes na bacia do rio Taquari-Antas. Isso porque esses mesmos dados foram utilizados em outras pesquisas com modelagem e simulação hidrológica do mesmo projeto mencionado, conforme técnicas e metodologias apresentadas por Collischonn *et al.* (2014).

Os modelos de circulação global (MCGs), que originaram os dados meteorológicos utilizados neste trabalho, foram selecionados de acordo com a metodologia proposta por Cavalcanti (2011), a qual leva em consideração a capacidade do modelo em simular corretamente os padrões de chuva observados na América do Sul, adotando os seguintes critérios:

**Tabela 1 – Informações geográficas dos pontos de estudo.**

Ponto	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
1	-51.3831	-29.0054	221
2	-51.5223	-29.0307	175
3	-51.6746	-29.0640	102

- aderência da simulação 1980-2000 com a climatologia de chuvas do Brasil;
- uso de soluções numéricas diferentes, como volumes finitos e grades ajustáveis;
- uso de alta resolução espacial nos submodelos oceânicos e atmosféricos.

Resultados semelhantes que demonstram a eficiência desses modelos para a Região Sul do Brasil podem ser encontrados em Vera *et al.* (2006), Marengo & Valverde (2007) e Cavalcanti *et al.* (2015).

Os modelos utilizados nesta pesquisa são apresentados a seguir, com uma breve descrição de cada um:

- NRCCCSM: O *Community Climate System Model* (CCSM) é um modelo climático global integrado por quatro modelos geofísicos que simulam, simultaneamente, os sistemas superfície (*Community Land Model* — CLM), atmosfera (*Community Atmosphere Model* — CAM), mar-gelo (*Community Sea Ice Model* — CSIM) e oceano (*Parallel Ocean Program* — POP), que estão interligados por um acoplador central (VERTEINSTEIN *et al.*, 2004);
- MPEH5: O modelo climático ECHAM (caracterizando a primeira parte do seu nome EC e a outra refere-se a um pacote de parametrização abrangente desenvolvido em Hamburgo, portanto, a abreviatura HAM) foi desenvolvido a partir do modelo atmosférico ECMWF, que permite que o modelo seja usado para simulações climáticas. A quinta versão desse modelo, se comparada à sua predecessora, ECHAM4, é mais flexível e, devido às modificações realizadas em seu código, produz simulações climáticas significativamente diferentes das versões anteriores. O modelo é composto de: núcleo dinâmico espectral; esquema de transporte advectivo de traços para os componentes da água (sólido, líquido e vapor) e substâncias químicas; e sistema de parametrização física que envolve esquemas de radiação de ondas curta e longa, estratificação de nuvens, difusão horizontal e vertical, processos na superfície da Terra, entre outros (ROECKNER *et al.*, 2003; 2004);
- GFCM21: *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model*, versão 2.1. Este modelo foi desenvolvido para simular mais realisticamente uma faixa de

fenômenos de flutuações de escala diurna e temporais (eventos extremos) em escala sinótica para o clima ao longo de séculos. Da mesma forma, é composto de outros modelos (atmosfera, superfície, oceano e mar-gelo) interligados por um acoplador central. O modelo CM2.1 incorpora várias mudanças em relação à versão anterior, CM2.0, que visam reduzir o viés das simulações. Por exemplo, na componente da superfície terrestre, a evaporação é suprimida quando o solo está congelado a uma profundidade maior que 30 cm (DELWORTH *et al.*, 2006);

- MRCGCM: *Meteorological Research Institute Coupled Global Circulation Model*, versão 2.3.2. Este modelo foi desenvolvido para examinar mudanças climáticas transientes associadas às forçantes antropogênicas, como a emissão de gases do efeito estufa e de aerossóis de sulfato. O modelo já apresentou bons desempenhos para simulações dos fenômenos ENSO (*El Niño e Southern Oscillation*), das monções asiáticas de verão, entre outros. É também um exemplo de modelo global acoplado (YUKIMOTO *et al.*, 2001);
- HADCM3: *Hadley Centre Coupled Model*, versão 3. Este é um dos modelos mais utilizados nas previsões e análises emitidas pelo AR3 e pelo AR4 do IPCC. Foi o primeiro modelo a não necessitar de ajustes artificiais de fluxos de calor e água para obtenção de boas simulações. Desenvolvido para produzir simulações por períodos de mil anos, tem dois componentes: modelo atmosférico (HadCM3) e modelo oceânico (que inclui o modelo mar-gelo). As simulações são feitas para anos de 360 dias, com 30 dias por mês (GORDON *et al.*, 2000).

Além desses MCGs, foram utilizadas as projeções realizadas pelo ETA — modelo de ponto de grade cujo nome se refere à letra grega  $\eta$  (eta), usada para definir sua coordenada vertical —, disponibilizadas pelo INPE. Buscando verificar a necessidade de maior detalhamento dos estudos, foram obtidas não somente as projeções em resolução horizontal de 40 km, mas também as do ETA de 20 km, referentes a uma versão mais nova do modelo que apresenta aprimoramentos na representação matemática de processos dinâmicos.

O ETA é descendente do modelo *Hydrometeorological Institute and Belgrade University* (HIBU), previamente

desenvolvido por Mesinger & Janjic (1974). Trata-se de um modelo de circulação regional (MCR) que acopla o MCG HADCM3 como condição de contorno lateral para simulações em mesoescala (BLACK, 1994; CHOU *et al.*, 2014). O acoplamento do modelo global ao regional resultou em simulações de quatro membros que foram considerados neste trabalho — *Ctrl, Low, Mid e High* —, representando a sensibilidade climática, ou seja, as variações de controle, baixa, média e alta alteração aos parâmetros utilizados por esse modelo até o final do século XXI.

As resoluções horizontais consideradas pelo modelo ETA foram de 40 e 20 km, gerando cinco projeções de mesoescala (regional) a serem utilizadas: 6. ETA 40 – CTRL; 7. ETA 40 – LOW; 8. ETA 40 – MID; 9. ETA 40 – HIGH; 10; ETA 20 – CTRL.

Assim, para cada um dos três pontos apresentados na Tabela 1 existem dez conjuntos de dados meteorológicos derivados desses diferentes modelos no cenário A1B, os quais serviram de base para a análise de

### Método de remoção de vieses nas projeções climáticas

Os modelos climáticos não conseguem representar perfeitamente o clima do presente e do futuro, ou seja, seus resultados apresentam erros. Esses erros, ou vieses, são sistemáticos e causados por uma conceitualização imperfeita dos fenômenos e processos que governam o clima e pela influência da discretização espacial dos modelos (TEUTSCHBEIN & SEIBERT, 2012). Nesse sentido, técnicas de remoção de vieses são empregadas para corrigir as variáveis climatológicas, evitando a propagação dos erros às demais etapas de análise.

Para isso foram aplicadas duas metodologias diferentes, as quais são descritas brevemente na sequência. Maiores detalhes podem ser encontrados em Collischonn *et al.* (2014).

No caso dos dados de precipitação do modelo ETA, para ambas as resoluções foi utilizada a metodologia de mapeamento quantil-quantil (BÁRDOSSY & PEGRAM, 2011). Essa técnica se baseia na comparação das funções cumulativas de probabilidade (curvas que mostram a probabilidade de a variável ser menor ou igual a determinado valor) da variável observada com

incertezas da variável precipitação. Esse cenário refere-se ainda ao AR4 do IPCC (IPCC, 2007), embora já tenha sido publicado o AR5 (IPCC, 2014). No entanto, para a área de estudo, não havia dados de projeções regionais disponíveis durante o período de realização desta pesquisa.

Segundo Marengo *et al.* (2014), os modelos do AR4 continuam sendo usados intensivamente para previsões climáticas sazonais e decadais nas quais os *feedbacks* biogeoquímicos não são cruciais. Além disso, os autores revelam que podem ser notadas semelhanças entre as projeções dos modelos do AR4 e do AR5, e que somente em meados de 2100 os cenários do AR5 parecem indicar um aquecimento mais intenso.

Com relação à escolha do cenário climático, como havia somente projeções do modelo ETA para o cenário A1B, apenas este foi considerado para todos os outros modelos, o qual é similar ao cenário climático RCP 4.5, de emissão média, do AR5.

as da variável estimada por um modelo climático nos períodos atual e futuro.

Já a metodologia denominada taxa de câmbio (*Delta Change*) (GELLENS & ROULIN, 1998; OLIVEIRA *et al.*, 2015) é baseada no cálculo das anomalias entre os valores estimados pelos modelos climáticos no período atual e futuro. O valor da anomalia é posteriormente utilizado para perturbar a série observada da variável no período atual, gerando a série corrigida a ser utilizada nos períodos futuros. Essa metodologia foi aplicada no caso dos dados dos modelos globais.

O método seguiu o seguinte procedimento (COLLISCHONN *et al.*, 2014):

- cálculo dos valores das normais climatológicas a partir da série temporal estimada pelo modelo climático no período atual;
- cálculo dos valores das normais climatológicas a partir da série temporal estimada pelo modelo climático nos períodos futuros;
- estimativa da taxa de câmbio: quociente entre os valores das normais climáticas nos períodos futuros

e os valores das normais climatológicas no período atual para todas as variáveis, exceto a temperatura, sendo realizada a operação de subtração. Isso resultou em uma taxa de câmbio para cada mês do ano;

- obtenção da série temporal das variáveis climatológicas nos períodos futuros: multiplicação dos valores diários da série de dados (ETA 40 CTRL) no período atual pelas taxas de câmbio estimadas no item anterior e somente adição para a variável temperatura. Isto é, todos os valores diários de janeiro são multiplicados pela taxa de câmbio de janeiro; todos os valores diários de fevereiro são multiplicados pela taxa de câmbio de fevereiro, e assim por diante. Esse procedimento é repetido até que todos os dados observados sejam perturbados pelas taxas de câmbio de cada mês;

- verificação dos valores diários da série temporal corrigida de modo a não superarem limites físicos, como, por exemplo, umidade relativa do ar superior a 100%. Caso os limites físicos sejam superados, o valor da variável naquele dia será limitado ao valor do limite físico.

Em função da limitação de séries longas de dados observados na bacia analisada, neste trabalho as séries temporais perturbadas foram obtidas após a remoção do viés no membro controle (CTRL) do modelo ETA-40. O procedimento foi aplicado de forma independente aos valores das variáveis climatológicas estimados pelos diferentes modelos globais para a precipitação.

## Índices de precipitação extrema

Na Tabela 2 são descritos os principais índices para precipitação encontrados na literatura, recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Por convenção, um dia úmido ou chuvoso tem precipitação diária maior ou igual a 1 mm e um dia seco ou não chuvoso tem precipitação diária menor que 1 mm.

Para cada ponto na Figura 1 são relacionados dados diários de precipitação referentes ao período atual (1961-1990) e aos períodos futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100), gerados pelos modelos descritos anteriormente. Todos os índices foram calculados em planilhas para os dados de precipitação de cada modelo (MCG e MCR), em cada localização e para cada ano dos

**Tabela 2 – Índices de precipitação encontrados na literatura e aplicados na bacia do rio Taquari-Antas/RS.**

Índice	Definição (unidade)
R95p <sup>2,3,5,6,8,10</sup>	Precipitação total anual dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 95 (mm)
R99p <sup>2,3,5</sup>	Precipitação total anual dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 99 (mm)
PRCPTOT <sup>2,3,5,6,8,9</sup>	Precipitação total anual de dias úmidos (mm)
R30mm <sup>2,5</sup>	Número de dias em um ano em que a precipitação diária é maior que 30 mm (dias)
RX1 <sup>2,3,5,8</sup>	Máximo de precipitação em um dia no ano (mm)
RX5 <sup>2,3,4,5,6,8</sup>	Máximo de cinco dias consecutivos de precipitação no ano (mm)
CDD <sup>2,3,4,5,6,8</sup>	Número máximo de dias consecutivos secos no ano com RR <1 mm (dias)
CWD <sup>2,3,5,6</sup>	Número máximo de dias consecutivos úmidos no ano com RR >1 mm (dias)
SDII <sup>1,3,4,7</sup>	Precipitação total anual dividida pelo número de dias úmidos (mm/dia)

Fonte: ARAÚJO & BRITO, 2011<sup>1</sup>; DEREZYNSKI *et al.*, 2013<sup>2</sup>; DONAT *et al.*, 2013<sup>3</sup>; KIKTEV *et al.*, 2003<sup>4</sup>; MELO *et al.*, 2014<sup>5</sup>; SANTOS *et al.*, 2009<sup>6</sup>; SANTOS *et al.*, 2013<sup>7</sup>; VALVERDE & MAREGO, 2014<sup>8</sup>; VINCENT *et al.*, 2005<sup>9</sup>; Zilli *et al.*, 2017.



períodos atual (1961-1990) e futuros (2011-2100). Porém, os resultados são apresentados para cada período

### Teste de Mann-Kendall

De acordo com Zilli *et al.* (2017) e Pedron *et al.* (2017), o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945) é o método mais adequado para analisar mudanças climáticas em séries meteorológicas. Esse teste considera que, na hipótese de estabilidade de uma série, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer a mesma (série aleatória simples) (BACK, 2001).

Back (2001) e Moraes *et al.* (1995) descrevem o método considerando uma série temporal de  $X_i$  de  $N$  termos ( $1 \leq i \leq N$ ). O teste consiste na soma  $t_n$  (Equação 1) do número de termos  $m_i$  da série, relativo ao valor  $X_i$  cujos termos precedentes ( $j < i$ ) são inferiores ao mesmo ( $X_j > X_i$ ), isto é:

$$t_n = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

Para séries com grande número de termos ( $N$ ), sob a hipótese nula ( $H_0$ ) de ausência de tendência,  $t_n$  apresentará uma distribuição normal com média  $E(t_n)$  (Equação 2) e variância  $\text{Var}(t_n)$  (Equação 3):

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (2)$$

$$\text{Var}(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (3)$$

(atual, 2025s, 2055s e 2085s), tomando-se a média de 30 anos de cada índice.

Testando a significância estatística de  $t_n$  para a hipótese  $H_0$  usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística  $u(t)$ , pela Equação 4:

$$u(t) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{\text{Var}(t_n)}} \quad (4)$$

O valor da probabilidade  $\alpha_1$  (Equação 5) é calculado por meio de uma tabela da normal reduzida, tal que:

$$\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(t)|) \quad (5)$$

A hipótese nula é ou não é rejeitada, a um nível de significância  $\alpha_1$ , se  $\alpha_1 < \alpha_0$  ou  $\alpha_1 > \alpha_0$ , respectivamente. Em geral, considera-se o nível de significância do teste  $\alpha_0 = 0,05$ . A hipótese nula é rejeitada quando existe uma tendência significativa na série temporal. O sinal da estatística  $u(t)$  indica se a tendência é crescente ( $u(t) > 0$ ) ou decrescente ( $u(t) < 0$ ). Esse teste foi realizado por meio de programação no *software* MATLAB (MATrix LABoratory), versão R2010a.

Dessa forma, o teste de Mann-Kendall foi utilizado para analisar tendências de aumento ou diminuição nos valores dos índices calculados (nível de significância  $\alpha=0,05$ ), uma vez que cada índice foi obtido anualmente para os 30 anos do período atual e para os 90 anos do período futuro. A partir disso, resultam séries temporais para cada um dos índices, as quais foram testadas com relação à tendência de aumento ou diminuição ao longo do século.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de analisar e alertar a região sobre a ocorrência de eventos extremos no futuro, foram calculados os índices de precipitação extrema. Para melhor observação dos resultados, apenas os valores médios de cada período dos índices projetados pelos MCGs e MCRs são dispostos na Tabela 3. Uma das mais importantes questões relacionadas a eventos extremos, em curto prazo, é se sua ocorrência está aumentando ou diminuindo com o tempo, isto é, se há tendência de cenários propícios ao acontecimento desses eventos. Com esse objetivo, foi realizado o teste de Mann-Kendall para a detecção

de tendência para cada série anual dos índices analisados, em cada ponto da Tabela 3 e para todos os modelos.

O primeiro índice considerado, R95p, refere-se ao total da precipitação anual nos dias úmidos maior que o percentil 95. Assim, um eventual aumento na tendência desse índice pode significar que a alta na precipitação anual acumulada esteja concentrada em 5% do total precipitado em dias úmidos. Esse índice apresentou maiores valores no MCR do que nos MCGs, e tornam-se maiores quanto mais se distancia do período atual (Tabela 3). O teste de hipótese revelou tendências

**Tabela 3 – Médias anuais dos índices de precipitação extrema para os postos de estudo na bacia do rio Taquari-Antas nos períodos atual (1961-1990) e futuro (2011-2100).**

Índice	Ponto 1							
	Modelos regionais				Modelos globais			
	Atual	2025s	2055s	2085s	Atual	2025s	2055s	2085s
R95p (mm)	729	812	880	911	723	762	799	807
R99p (mm)	248	263	284	295	244	260	272	276
PRCPTOT (mm)	1.673	1.987	2.205	2.337	1.673	1.749	1.829	1.835
R30 (d)	14	19	23	24	14	15	17	17
RX1 (mm)	80	81	88	91	78	84	87	89
RX5 (mm)	149	167	180	191	151	161	169	170
CDD (d)	18	16	18	17	17	17	17	17
CWD (d)	8	8	9	9	8	8	8	8
SDII (mm/d)	10	13	14	14	10	11	11	11
Índice	Ponto 2							
	Modelos regionais				Modelos globais			
	Atual	2025s	2055s	2085s	Atual	2025s	2055s	2085s
R95p (mm)	732	826	895	930	724	763	800	813
R99p (mm)	250	274	292	304	246	262	275	279
PRCPTOT (mm)	1.700	2.010	2.220	2.362	1.701	1.771	1.850	1.870
R30 (d)	14	19	22	24	14	15	16	17
RX1 (mm)	81	85	90	94	79	85	89	90
RX5 (mm)	148	168	183	192	156	165	173	176
CDD (d)	17	16	18	18	17	17	17	17
CWD (d)	8	9	9	9	9	9	9	9
SDII (mm/d)	11	13	14	15	11	11	12	12
Índice	Ponto 3							
	Modelos regionais				Modelos globais			
	Atual	2025s	2055s	2085s	Atual	2025s	2055s	2085s
R95p (mm)	748	822	889	918	739	779	817	834
R99p (mm)	257	273	290	298	254	272	284	289
PRCPTOT (mm)	1.673	1.952	2.150	2.277	1.674	1.746	1.825	1.848
R30 (d)	15	18	22	24	15	16	17	18
RX1 (mm)	84	86	90	92	82	89	93	95
RX5 (mm)	151	166	176	187	153	162	170	175
CDD (d)	18	17	18	18	18	18	17	17
CWD (d)	8	8	8	8	9	9	8	8
SDII (mm/d)	12	14	15	15	12	12	13	13

crescentes nas projeções de ETA 40 LOW, ETA 40 MID e HADCM3 e decrescentes do GFCM21 para os três pontos. Os demais modelos não apresentaram tendências para esse índice no nível de significância considerado.

A análise do índice R99p segue o mesmo raciocínio do anterior, mas considera o acumulado de precipitação em dias de chuvas mais intensas, ou seja, acima do percentil 99 nos dias úmidos. O ponto 1 apresentou tendências em 6 modelos, mas apenas uma decrescente: para o modelo GFCM21.

Os índices R95p e R99p também representam o quanto da precipitação total anual corresponde aos eventos mais intensos ou extremos. No caso do modelo ETA 20, por exemplo, no ponto 1, a precipitação total anual projetada para o ano de 2060 (não mostrada) é de 2.149 mm, sendo que, desse total, espera-se que 857 mm (aproximadamente 40%) cairão em dias com chuva acima do percentil 95 e 306 mm (aproximadamente 14%), em dias com pluviosidade acima do percentil 99. Mais de 50% da precipitação total anual será caracterizada como extrema, implicando consequências para toda a bacia. A maioria dos sistemas de drenagem, por exemplo, não está preparada para eventos desse porte.

Para os modelos que registram tendências positivas dos índices R95p ou R99p, essas podem ser associadas tanto à ocorrência de chuvas fortes (grande intensidade) quanto à maior frequência de eventos de chuva extrema.

O índice PRCPTOT corresponde à precipitação total anual em dias chuvosos. Os maiores valores para esse índice foram fornecidos pelos MCRs, os quais preveem, para o fim do século (2085s), no ponto 1, uma anomalia de 664 mm em relação ao período atual. Já os MCGs projetam 162 mm para o mesmo local. O teste de Mann-Kendall para esse índice detecta tendência positiva para os modelos ETA 20, ETA 40 LOW, ETA 40 MID e HADCM3, no ponto 1; ETA 40 CTRL, ETA 40 LOW, ETA 40 MID e HADCM3, no ponto 2; e ETA 40 LOW, ETA 40 MID e HADCM3, no ponto 3.

O índice R30mm caracteriza-se pelo número de dias em que a precipitação diária é maior ou igual a 30 mm. Esse índice colabora na detecção de eventos extremos, pois pode ser relacionado com os índices anteriores. Embora não seja possível apresentar neste trabalho os resultados anuais de cada índice, o exemplo a seguir

para dois anos em particular é interessante sobre a associação de diferentes índices. Ao associar os índices R95p e R30mm das projeções do ETA 20, no ponto 3, para os anos de 2019 e 2051 (não mostrados), é possível identificar quantos dias são necessários para acumular certa quantidade de precipitação. Neste exemplo, em 2019, 11 dias (valor correspondente a R30mm de 2019) serão responsáveis por 504 mm (valor correspondente a R95p de 2019). Já no ano de 2051, 20 dias (R30mm) corresponderão a uma precipitação de 904 mm (R95p). Esses dois anos foram tomados como exemplo porque os percentis 95 correspondem a 30 mm e, portanto, pode-se fazer uma associação direta com o índice R30mm. Dessa forma, o número de dias com precipitação acima de 30 mm será maior para todos os pontos, o que corrobora a elevação observada na precipitação total anual.

Para os MCRs, o índice R30mm apresenta maior anomalia em comparação aos MCGs, revelando até 10 dias de precipitação superior a 30 mm do que no passado, o que corresponde, pelo menos, a 300 mm a mais no ano. Somente os modelos ETA 40 LOW e ETA 40 MID apresentaram tendências positivas em todos os pontos, segundo o teste de Mann-Kendall.

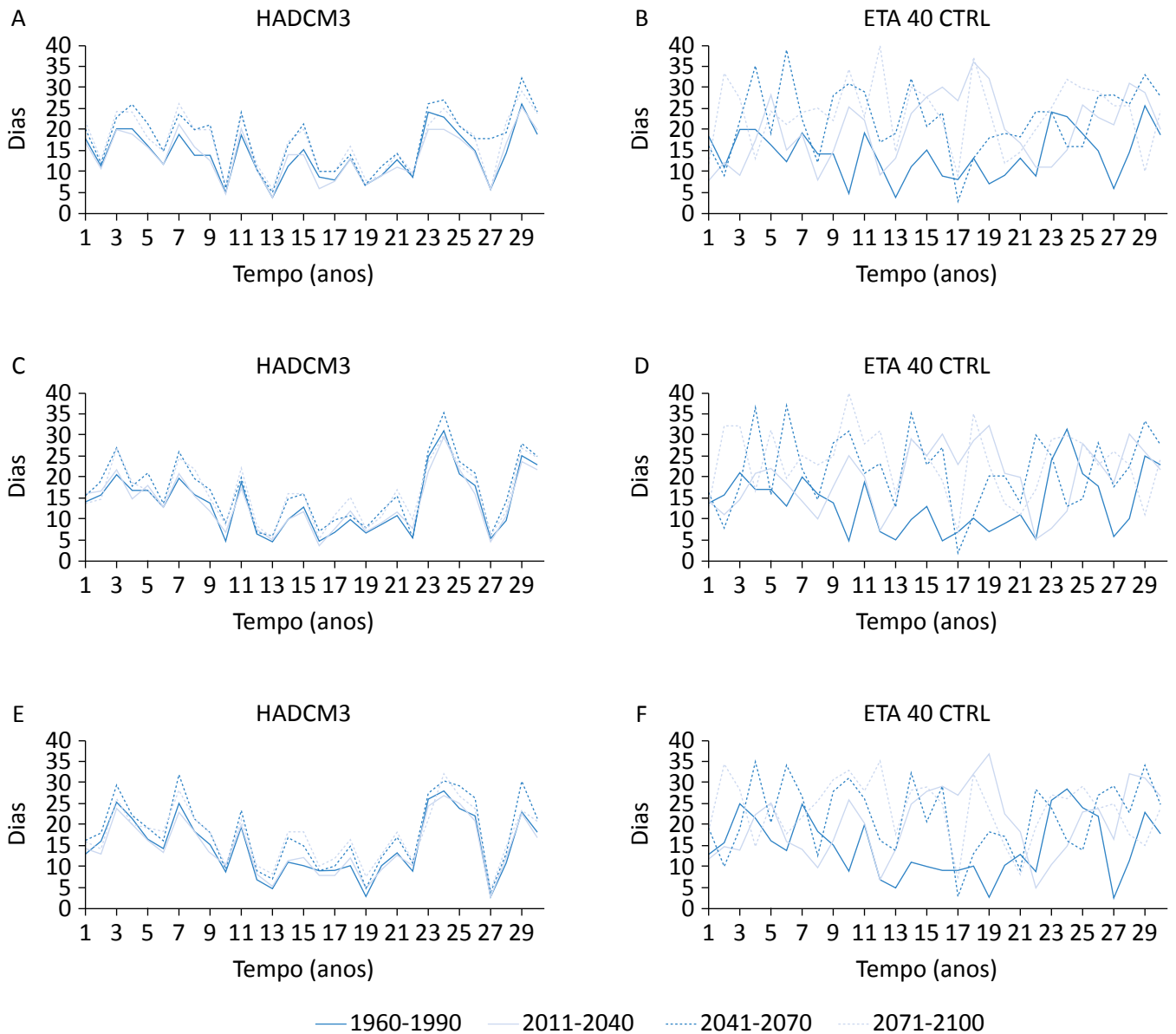
A precipitação máxima em um dia (RX1), comparada com a de cinco dias consecutivos no ano (RX5), é proporcionalmente muito mais extrema. Por exemplo, os valores médios de RX1 e RX5, no ponto 1, para as projeções do modelo regional no período 2025s foram de 81 e 167 mm, respectivamente. Isso significa que, comparativamente, em apenas um dia ocorre aproximadamente 50% do volume de precipitação de cinco dias consecutivos. Ou seja, RX1 é mais extremo, pois a precipitação dada por esse índice é mais concentrada no tempo do que aquela apresentada por RX5. O índice RX1 apresentou tendência somente no modelo HADCM3 para os pontos 1 e 2. Observa-se a possibilidade de anomalia para esse mesmo índice, no geral, de 10 mm em todos os pontos até o final do século.

O índice CDD representa o número máximo de dias consecutivos secos no ano em que a precipitação diária é menor que 1 mm, e o CWD refere-se ao número máximo de dias consecutivos úmidos anuais com precipitação diária maior do que 1 mm. Esses índices não apresentam tendências significativas. Autores como Marengo *et al.* (2009) e Santos *et al.* (2009) explicam que o aumento da precipitação total anual e a

ocorrência de eventos extremos analisados em suas pesquisas podem estar associados à diminuição do índice CDD e ao acréscimo ou redução do índice CWD. Tal fato não é observado neste trabalho, no qual o aumento da precipitação se manifesta por meio dos índices R95p, R99p e R30mm. O mesmo foi observado por Dereczynski *et al.* (2013), que argumentam que o aumento dos eventos extremos de precipitação para o Rio de Janeiro pode ser identificado por meio desses mesmos índices.

A precipitação total anual dividida pelo número de dias úmidos (SDII) mostrou aumento apenas no modelo regional ETA, sugerindo que, nos dias em que houver chuva, ela terá caráter mais intenso. Tendências positivas foram observadas para as projeções do ETA 40 MID e do ETA 40 LOW. Os MCGs apresentam aumento de 1 mm/dia nos dias em que ocorre precipitação.

Para auxiliar na visualização dos resultados apresentados na Tabela 3, a Figura 2 mostra a variação anual apenas do índice R30mm para o período atual e os



**Figura 2 – Variação anual do índice R30mm para os modelos HADCM3 e ETA 40 CTRL: (A) e (B) no ponto 1, (C) e (D) no ponto 2, (E) e (F) no ponto 3.**

três períodos futuros em todos os pontos analisados. No eixo horizontal estão representados os 30 anos de cada período para comparação e, no eixo vertical, o número de dias referente ao valor do índice R30mm. Observa-se que o modelo regional ETA 40 CTRL revelou maiores diferenças dos períodos futuros em relação ao período atual do que o modelo global HADCM3.

Tomando-se as projeções do modelo ETA como de maior precisão, por incorporarem aspectos mais detalhados da região, tais como a topografia, pode-se concluir, a partir da Figura 2, que há grandes diferenças entre as projeções futuras e o período atual. Dessa forma, em todos os gráficos do modelo ETA 40 CTRL observam-se valores de R30mm futuros projetados acima da tendência anual (1960-1990), indicando que o número de dias com chuva acima de 30 mm poderá aumentar na bacia. Esse resultado está de acordo com o aumento do índice PRCPTOT no futuro.

Marengo *et al.* (2014) supõem que mudanças de precipitação extrema sejam mais pronunciadas nas projeções do AR5, uma vez que a forçante radiativa mais intensa entre os novos cenários climáticos causaria diferenças nos resultados. Ainda assim, os autores afirmam que essas pequenas melhorias dos modelos do AR5 em relação aos do AR4 não causariam mudanças drásticas na utilização de um ou outro modelo, mas apenas pequenos aperfeiçoamentos do modelo com aplicação na região amazônica.

Por fim, o aumento dos valores futuros dos índices analisados poderá ocasionar diversos problemas ambientais na bacia do rio Taquari-Antas, tais como a

intensificação dos deslizamentos de terra (ZILLI *et al.*, 2017) em regiões com características serranas. Fenômenos de movimentação de massa como esse podem acontecer mesmo em locais com cobertura vegetal preservada, visto que o solo encharcado não consegue manter-se estruturado, principalmente em relevos acentuados. Dessa forma, eventos de precipitação extrema associados a altos valores de PRCPTOT, entre outros índices analisados neste trabalho, poderão causar nessa bacia desastres ambientais ainda mais severos do que os registrados no passado, principalmente por apresentar regiões de serra ou alta declividade do relevo.

Eventos de chuva intensa como os de Santa Catarina, em 2008, e Rio de Janeiro, em 2011, causaram grandes mudanças no relevo e impactos negativos no meio ambiente, alertando regiões de topografia semelhante para eventuais desastres. Outros impactos associados a eventos de movimentação de massa são o bloqueio de estradas, a interrupção do fornecimento de água, alimentos e eletricidade e moradores desabrigados.

O que se pode inferir é que quanto maiores forem as anomalias dos períodos futuros em relação ao atual (ou passado), mais severas podem ser as consequências para a sociedade e o meio ambiente em zonas consideradas vulneráveis, ou seja, de relevo acidentado, como a bacia do rio Taquari-Antas. Além disso, os custos econômicos e sociais do aumento de eventos extremos de precipitação podem ser mais altos, e os impactos serão substanciais nas áreas e nos setores mais diretamente afetados, como agricultura, centros urbanos e biodiversidade (MARENGO *et al.*, 2009).

## CONCLUSÕES

A grande variabilidade observada entre as projeções dos MCRs e MCGs neste estudo pode ser confirmada pela análise das tendências nos índices de precipitação extrema, os quais mostram que a maioria das tendências crescentes foi detectada nas projeções do modelo ETA.

Os MCRs são construídos para escalas menores com maior resolução, e suas projeções estão mais próximas da realidade do que as dos MCGs. Com base nessa constatação, pode-se assumir que o clima futuro na região de estudo sofrerá com o aumento de eventos extremos de precipitação, principalmente pelo seu acréscimo no total anual, o que pode ser verificado pelo aumento de

dias no índice R30mm e a maior precipitação acumulada nos índices R95p e R99p.

Uma proposta de estudo mais detalhada poderia ser realizada utilizando os mesmos índices de precipitação extrema, mas em uma análise mensal, para verificar se tais eventos serão pontuais ou difusos ao longo do ano, visto que a análise sazonal pode ser de grande valia para a agricultura.

Além disso, devido às limitações dos dados do AR4, sugere-se que esta pesquisa seja estendida à utilização dos dados do AR5, com a inclusão de maior número de



modelos e cenários climáticos, uma vez que as forçantes radiativas podem fornecer índices ainda mais extremos de precipitação no final do século.

Ainda que com muitas limitações, cada pesquisa realizada é um passo na tentativa de mitigar os impactos de possíveis mudanças climáticas no futuro. No entanto, muito ainda é preciso ser investigado a fim de reduzir as incertezas associadas às projeções.

As informações levantadas neste trabalho são um estímulo inicial para que os municípios integrantes da bacia busquem ações de planejamento e ferramentas para a melhor adaptação e mitigação dos impactos gerados pelas mudanças climáticas. Contudo, a diminuição de emissões de gases do efeito estufa nos próximos anos poderá ajudar a reduzir os custos e desafios a serem enfrentados, colaborando para um desenvolvimento mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANGÉLIL, O.; STONE, D.; WEHNER, M.; PACIOREK, C. J.; KRISHNAN, H.; COLLINS, W. An independent assessment of anthropogenic attribution statements for recent extreme temperature and rainfall events. *Journal of Climate*, v. 30, p. 12, 2017.

ARAÚJO, W. S.; BRITO, J. I. B. Índices de tendências de mudanças climáticas para os Estados da Bahia e Sergipe por meio de índices pluviométricos diários e sua relação com TSM do Pacífico e Atlântico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 4, p. 541-554, 2011.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BÁRDOSSY, A., PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, v. 47, 2011.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples. *Weather Forecasting*, v. 9, p. 265-278, 1994.

CAMPOS, C. R. P.; BARBOSA, F. A. R.; SOUSA, I. L. Cheias históricas dos principais rios Acreanos como subsídio ao projeto de sistema de alerta de cheias no Acre. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. *Anais...* 2013. p. 17-22.

CAVALCANTI, I. F. A. Seasonal precipitation simulated by global and regional models and projected climate changes in Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 2011, João Pessoa. *Anais...* 2011.

CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C.; GRIMM, A. M.; MENÉNDEZ, C. G.; SANCHEZ, E.; CHERCHI, A.; SÖRENSSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J.; PÁNTANO, V.; BETTOLLI, L. M.; ZANINELLI, P.; ZAMBONI, L.; TEDESCHI, R. G.; DOMINGUEZ, M.; RUSCICA, R.; FLACH, R. Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 211-230, 2015.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, 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 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-527, 2014.

COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; SILVA, B. C.; RODRIGUES, D. A. Modelagem Hidrológica. In: LIMA, J. W. M.; COLISCHONN, W.; MARENGO J. A. (Orgs.). *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 95-143.

DELWORTH, T. L. et al. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. *Journal of Climate, Special Section*, v. 19, p. 643-674, 2006.

DERECZYNSKI, C.; SILVA, W. L.; MARENGO, J. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 2, p. 25-33, 2013.

DONAT, M. G. et al. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, p. 2098-2118, 2013.

DWYER, J. G.; GORMAN, P. A. Changing duration and spatial extent of midlatitude precipitation extremes across different climates. *Geophysical Research Letters*, v. 44, p. 5863-5871, 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM). *Qualidade das águas da bacia hidrográfica do Rio das Antas e Rio Taquari*. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade\\_taquari\\_antas/taquariantas.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_taquari_antas/taquariantas.asp)>. Acesso em: 26 jan. 2015.

GELLENS, D.; ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 210 (1-4), p. 242-258, 1998.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JOHNS, T. C.; MITCHELL, J. F. B.; WOOD, R. A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, v. 16, p. 147-168, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2007. 104 p.

\_\_\_\_\_. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2014. 132 p.

JALOTA, S. L.; KAUR, H.; KAUR, S.; VASHISHT, B. B. Impact of climate change scenarios on yield, water and nitrogen-balance and use efficiency of rice-wheat cropping system. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 29-38, 2013.

KENDALL, M. G. *Rank Correlation Methods*. 4ª ed. London: Charles Griffin, 1975.

KIKTEV, D.; SEXTON, D. M. H.; ALEXANDER, L.; FOLLAND, C. K. Comparison of Modeled and Observed Trends in Indices of Daily Climate Extremes. *American Journal of Climate*, v. 16, p. 3560-3571, 2003.

LARENTIS, D. G. *Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: Sistema Taquari-Antas - RS*. 177f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LARENTIS, D. L.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação da qualidade de água em grandes bacias: Rio Taquari-Antas, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 3, p. 5-22, 2008.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R.; LYRA, A. Bases para modelagem de mudanças climáticas. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (Orgs.). *Efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 23-63.

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R.; LABORBE, R. *Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: projeções de clima futuro usando três modelos regionais*. Relatório 5, mudanças do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBR, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – CDBio, 2007. 77p.

- MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. *Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil*. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. 76 p.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Multiciência*, n. 8, p. 5-28, 2007.
- MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. S.; PEDROLLO, O. C. Impacts of climate change on soybean irrigation water requirements in northwest region of Rio Grande do Sul, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, v. 3, p. 1-13, 2014.
- MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. S.; PEDROLLO, O. C. Trends in extreme precipitation indices and seasonal analysis of precipitation and temperature for detecting climate change in the Northwest Region of Rio Grande do Sul, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 4, p. 184-202, 2015.
- MESINGER, F.; JANJIC, Z. I. *Noise due to time-dependent boundary conditions in limited area models*. The GARP Programme on Numerical Experimentation. Rep. n° 4. Geneva: WMO, 1974. p. 31-32.
- MORAES, J. M.; PELLEGRINO, G.; BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Estudo preliminar da evolução temporal dos componentes do ciclo Hidrológico da bacia do Rio Piracicaba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2., 1995, Recife. *Anais...* Recife: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 27-32.
- MURUMKAR, A. R.; ARYA, D. S. Trend and periodicity analysis in rainfall pattern of Nira Basin, Central India. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 60-70, 2014.
- OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, p. 101-121, 2015.
- PANDA, D. K.; MISHRA, A.; KUMAR, A.; MANDAL, K. G.; THAKUR, A. K.; SRIVASTAVA, R. C. Spatiotemporal patterns in the mean and extreme temperature indices of India, 1971–2005. *International Journal of Climatology*, v. 34, p. 3585-3603, 2014.
- PATTNAYAK, K. C.; KAR, S. C.; DALAL, M.; PATNAYAK, R. K. Projections of annual rainfall and surface temperature from CMIP5 models over the BIMSTEC countries. *Global and Planetary Change*, v. 152, p. 152-166, 2017.
- PEDRON, I. T.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, S. P.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 3, p. 1250-1264, 2017.
- ROECKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U.; TOMPKINS, A. *The atmospheric general circulation model ECHAM5*. Part I: Model Description. Report n° 349. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology, 2003. 140 p.
- ROECKNER, E.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. *The atmospheric general circulation model ECHAM5*. Part II: Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution. Report n° 354. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology, 2004. 64 p.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos Índices de Precipitação no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.
- SANTOS, D. C.; MEDEIROS, R. M.; CORREIA, D. S.; OLIVEIRA, V. G.; BRITO, J. I. B. Variabilidade de índices de precipitação e temperatura na Amazônia ocidental. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS, 1.; COMISSÃO NACIONAL DA BIODIVERSIDADE, 2.; SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS, 6., 2013, Recife, PE. *Anais...* p. 12, 2013. v. 2.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE (SEMA). *Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: SEMA, 2012. 169 p.

SHIM, C.; SEO, J.; HAN, J.; HA, J.; RO, T. H.; HWANG, Y. S.; OH, J. J. Projection of future hot weather events and potential population exposure to this in South Korea. *Climate Research*, v. 72, p. 29-38, 2017.

STERN, N. *Economics of Climate Change. A Review*. 2014. Disponível em: <[http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview\\_report\\_complete.pdf](http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview_report_complete.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2017.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456-457, p. 12-29, 2012.

VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 4, p. 10-26, 2014.

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

VERTEINSTEIN, M.; CRAIG, T.; HENDERSON, T.; MURPHY, S.; CARR JR, G. R.; NORTON, N. *CCSM3.0 User's Guide*. Community Climate System Model National. Boulder, CO: Center for Atmospheric Research, 2004. 70 p.

VINCENT, L. A.; PETERSON, T. C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

YUKIMOTO, S.; NODA, A.; KITO, A.; SUGI, M.; KITAMURA, Y.; HOSAKA, M.; SHIBATA, K.; MAEDA, S.; UCHIYAMA, T. The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2): Model Climate and Variability. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 2001.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LEIEBMANN, B.; DIAS, M. A. S. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 5, p. 2269-2279, 2017.

ZWIERS, F. W.; ALEXANDER, L. V.; HEGERL, G. C.; KNUTSON, T. R.; KOSSIN, J. P.; NAVEAU, P.; NICHOLLS, N.; SCHÄR, C.; SENEVIRATNE, S. I.; ZHANG, X. Climate Extremes: Challenges in Estimating and Understanding Recent Changes in the Frequency and Intensity of Extreme Climate and Weather Events. *Climate Science for Serving Society*, p. 339-389, 2013.