





## Modelagem Hidrológica Combinado à Mudança Climática, Uso e Ocupação do Solo

*Hydrological Modeling Combined with Climate Change, Land Use and Occupation*

Hugo Koji Suekame<sup>1</sup> , Luiz Felipe Sant'Anna Commar<sup>2</sup> , Fábio Veríssimo Gonçalves<sup>1</sup> ,  
Glauber Altrão Carvalho<sup>1</sup>  & Rodrigo Bahia Pereira<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, Brasil.

E-mails: hugo.koji@gmail.com; luizcommar@gmail.com; fabio.goncalves@ufms.br; glauber.altrao@gmail.com; rodrigoeamb@gmail.com

### Resumo

Entender o comportamento hidrológico de bacias é algo complexo, em contrapartida, os modelos hidrológicos são ferramentas cujo objetivo é de representar o ciclo hidrológico em grandes áreas. Uma ferramenta que vem auxiliando no desenvolvimento de modelos hidrológicos de larga escala é o uso de Sistemas de Informações Geográficas, em que auxilia na análise de solo, cobertura e relevo, de tal forma que se consiga um entendimento mais completo dos processos das bacias hidrográficas. Neste estudo foi aplicado o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas na bacia do Alto Taquari com objetivo calibrar o modelo hidrológico, e posteriormente, testar combinações de cenários futuros de mudança climática e uso e ocupação do solo, a fim de detectar mudanças em variáveis hidrológicas. Os resultados da calibração foram aceitáveis, com o valor de Nash-Sutcliffe de 0,64 no exutório da bacia e as simulações das projeções indicaram a diminuição da vazão média mensal para grande parte dos cenários, possibilitando traçar tendências para uma melhor tomada de decisão no que tange a gestão da bacia hidrográfica.

**Palavras-chave:** Mudança do uso do solo; MGB-IPH; HadGEM2-ES

### Abstract

Understand the hydrological behavior of basins is complex, however, the hydrological models are tools whose objective is to represent the hydrological cycle in large areas. A tool that has been helping in the development of large-scale hydrological models is the use of Geographic Information Systems, in which it assists in the analysis of soil, cover and relief, aiming at a more complete understanding of the watershed processes. In this study, the Large Basin Model of the Hydraulic Research Institute was applied in the Alto Taquari basin, and aimed to calibrate the hydrological model, and later, to test combinations of future scenarios of climate change and land use and occupation and in order to detect changes in hydrological variables. The result of the calibration was acceptable, with the Nash-Sutcliffe value of 0.64 in the basin outlet and the projection simulations indicated the decrease in the average monthly flow for most of the scenarios, making possible tracing trends for better decision making regarding the management of the hydrographic basin.

**Keywords:** Land use change; MGB-IPH; HadGEM2-ES

## 1 Introdução

O rio Taquari é afluente do alto curso do rio Paraguai e um dos principais rios do Pantanal do Estado do Mato Grosso do Sul. A bacia do Alto Taquari apresenta predisposição natural às perdas de solo por conta da topografia e pedologia, associada com o incremento da agropecuária sem adoção de práticas conservacionistas de solo, e como consequência, a intensificação dos processos erosivos.

Em decorrência do aporte de sedimentos provenientes da parte alta da bacia, o rio Taquari no seu baixo curso encontra-se assoreado, em grande parte devido a sua baixa declividade nessa porção, e por consequência uma planície de inundação com áreas alagadas e nível freático próximo a superfície, mesmo na estação da seca, caracterizando-as em áreas úmidas. A bacia também apresenta baixa sinuosidade e destaca-se morfologicamente pela presença de diques marginais arenosos mais altos que as planícies de inundação adjacentes (Assine *et al.*, 2005).

As ações de manejo de uma bacia hidrográfica e as tomadas de decisões sobre o planejamento de seus recursos hídricos requer respostas quanto a diferentes aspectos do comportamento hidrológico da bacia, porém, a região de estudo esbarra na carência de dados climáticos essenciais para o monitoramento.

Entender os processos hidrológicos pode ser considerado um passo estratégico em bacias de grande dimensão, sendo que, diversos estudos já foram realizados, com auxílio da ferramenta Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na obtenção da descrição espacial, em diferentes regiões como a bacia do rio Araguaia (Pontes *et al.*, 2017), a bacia do Rio Piracicaba (Meller *et al.*, 2012), Bacia do Rio Negro (Getirana *et al.*, 2010). Considerando isto, o uso de modelos hidrológicos pode auxiliar em tais estudos, principalmente, quando ocorre a falta de dados. Destaca-se ainda que, esta condição é recorrente na região hidrográfica da Bacia do Alto Paraguai (BAP), mais especificamente na Bacia do Alto Taquari (BAT).

O ciclo hidrológico é suscetível às modificações procedentes tanto de causas naturais, como das atividades antrópicas. Conforme descreve Tucci (2002), a ação humana sobre o uso e ocupação do solo pode produzir impactos nas respostas hidrológicas, como a redução ou aumento da vazão média, máxima ou mínima. Além disso, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) pesquisa o reflexo na mudança da precipitação e temperatura em nível global, quando sujeitos a diferentes comportamentos da população no que diz respeito à emissão de gases do efeito estufa.

Segundo Silva *et al.* (2006) a integração de modelos climáticos, responsável pela determinação de precipitação e variáveis climáticas futuras, com modelos hidrológicos para a previsão de vazões trazem benefícios, particularmente

no Brasil, devido a matriz energética ser predominante em energia hidráulica.

Yao *et al.* (2009) analisaram os impactos hidrológicos potenciais das mudanças climáticas sobre balanços hídricos de longo período para a bacia hidrográfica do lago Harp. Collichonn (2001) realizou um estudo das séries de precipitação na bacia do rio Paraguai, e concluíram que as mudanças no regime de escoamentos não são derivadas exclusivamente da mudança no uso do solo da bacia e devem ser derivadas também de fenômenos de mudanças climáticas. Mezel & Bürger (2002) estudaram a bacia do rio Mulde, mostrando um aumento na temperatura e uma tendência de decréscimo na precipitação e nos escoamentos.

Diante desta perspectiva, a realização de estudos hidrológicos para a região hidrográfica da BAT, que possui uma vasta extensão territorial e poucos dados de vazão, é de extrema importância a fim de subsidiar os gestores de recursos hídricos nas decisões a serem tomadas de acordo com a dinâmica da bacia hidrográfica no que tange às mudanças climáticas e tendências do uso e ocupação do solo.

O presente estudo teve por objetivo avaliar o desempenho do modelo hidrológico através da sua calibração na bacia hidrográfica do Alto Taquari, e, além disso, avaliar o comportamento hidrológico na bacia através das simulações de cenários.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

A BAT, localiza-se na região do Planalto, como parte integrante da BAP, aproximadamente entre os paralelos 17° e 20° Sul, e os meridianos 53° e 55° Oeste. Com uma área de 27.672,4 km<sup>2</sup>.

A bacia originalmente possuía uma cobertura de florestas e cerrados, mas passou por modificações nas últimas décadas compostas em sua maior parte por pecuária e agricultura (Collischonn & Tucci, 2001).

### 2.2 Modelo MGB-IPH

Foi utilizado o modelo MGB (Modelo Hidrológico de Grandes Bacias) desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), sendo este, um modelo distribuído desenvolvido para simular a transformação de chuva em vazão em grandes bacias (Collischonn *et al.*, 2007). No MGB são utilizadas equações de balanço d'água no solo (Equação 1), geração de escoamento superficial (Equação 2), geração de escoamento subsuperficial (Equação 3), percolação ao aquífero (Equação 4) e o fluxo ascendente (Equação 5), para representar o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica.

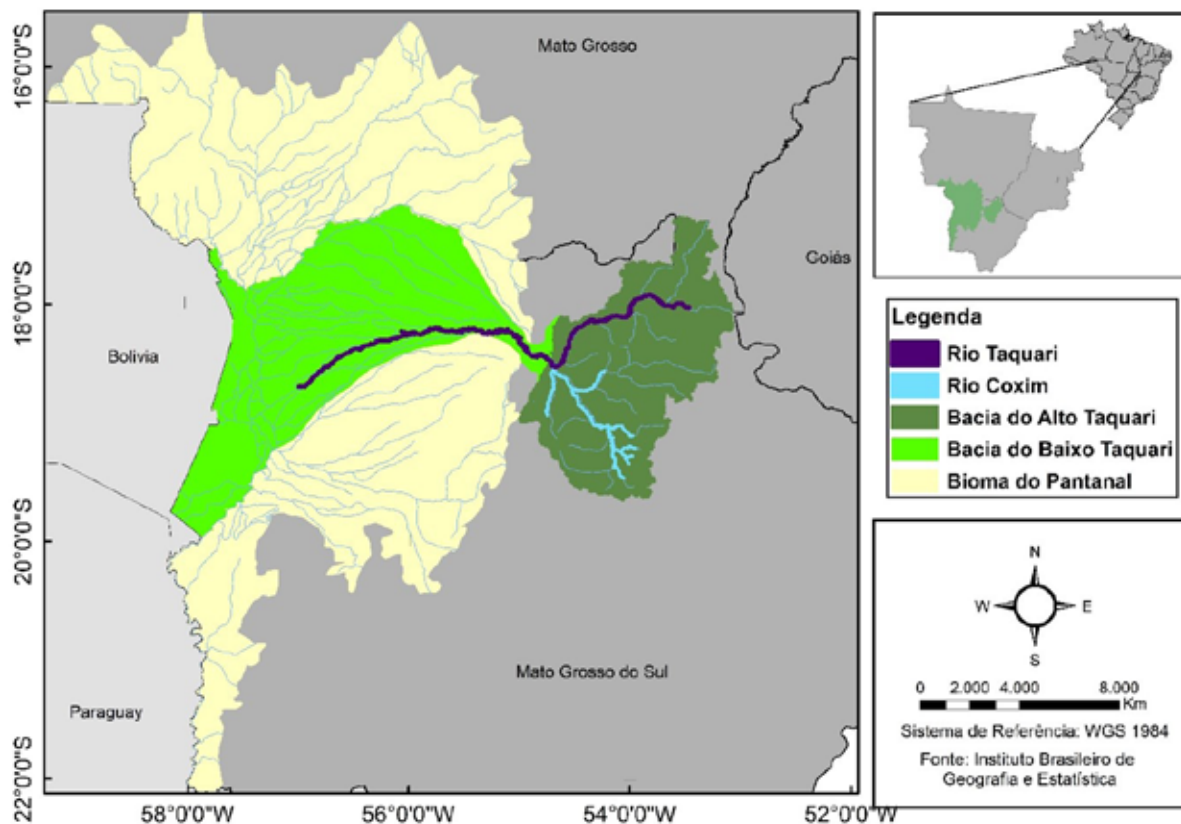


Figura 1 Localização geográfica da Baía do Alto Taquari.

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - ET_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j})\Delta t \quad (1)$$

onde  $k$ ,  $i$  e  $j$  são índices relacionados ao espaço temporal, da célula e Unidade de Resposta Hidrológica (URH), respectivamente;  $\Delta t$  a variação do tempo,  $W_{i,j}^k$  é o armazenamento da água no solo ao final do intervalo de tempo na minibacia  $i$  e URH  $j$  em mm,  $W_{i,j}^{k-1}$  é o volume armazenado ao início do intervalo de tempo (mm),  $P_{i,j}$  é a precipitação que chega ao solo (mm),  $ET_{i,j}$  é a evapotranspiração (mm),  $Dsup_{i,j}$  e  $Dint_{i,j}$  são os escoamentos super e subsuperficial, respectivamente em mm,  $Dbas_{i,j}$  é o volume percolado ao aquífero (mm).

$$X = \left(1 - \frac{W}{W_m}\right)^{\frac{b}{(b-1)}} \quad (2)$$

onde  $X$  é a fração de área que está saturada,  $W$  é o volume armazenado no solo (mm),  $W_m$  é um parâmetro calibrável que representa a máxima capacidade de armazenamento do solo para a URH (mm) e  $b$  é um parâmetro calibrável que define o grau de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo (adimensional).

$$Dint_{i,j} = Kint_j \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - W_{zj}}{W_{mj} - W_{zj}}\right)^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (3)$$

onde  $Dint_{i,j}$  é o escoamento subsuperficial (mm),  $W_{zj}$  é o mínimo volume armazenado no solo para haver geração de escoamento subsuperficial (mm),  $Kint_j$  é o parâmetro de drenagem subsuperficial (mm.dia<sup>-1</sup>),  $\lambda$  é o índice de porosidade do solo (adimensional).

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - W_{cj}}{W_{mj} - W_{cj}}\right)^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (4)$$

onde  $Dbas_{i,j}$  é o volume percolado ao aquífero (mm),  $W_{cj}$  é o limite mínimo a partir do qual não ocorre percolação (mm) e  $Kbas_j$  é o parâmetro que define a percolação máxima quando o solo está saturado (mm.dia<sup>-1</sup>).

$$Dcap_{i,j} = DM_{capj} \left(\frac{W_{cj} - W_{i,j}^{t-1}}{W_{cj}}\right) \quad (5)$$

onde  $Dcap_{i,j}$  é o fluxo ascendente (mm),  $W_{ej}$  é o limite máximo a partir do qual há fluxo ascendente (mm) e  $DM_{capj}$  é o máximo fluxo ascendente (mm).

A versão atual do MGB-IPH divide a bacia hidrográfica em mini bacias (Fan & Collischonn, 2014), além disso, também divide a bacia em Unidades de Resposta Hidrológicas (URH) que é obtida a partir da combinação da pedologia e o uso e ocupação do solo da região.

Esta bacia apresenta dois tipos de solos, sejam eles, solos rasos que representam áreas arenosas, e solos profundos representados por argissolos e latossolos. Em termos de uso e ocupação do solo, considerou-se de acordo com a classificação realizada por Fan *et al.* (2015), a classe “Agricultura” compreende a agricultura intensiva de demais coberturas com características semelhantes, incluindo pastagens. As formações arbustivas, estepes e todos os tipos de cerrado e campo foram agrupadas em uma classe definida “Campo”, e todas as subclasses de florestas foram agrupadas na classe de “Floresta”. A Figura 2 ilustra as URHs

para a área de estudo extraída do mapa de unidades de resposta hidrológica realizada por Fan *et al.* (2015).

Em cada URH definida é possível realizar o cálculo de balanço de massa, que inclui a evapotranspiração estimada pela equação de Penman-Monteith, e a propagação de vazão na rede de drenagem calculadas pelo método de Muskin-Cunge, devido a capacidade de processamento e tempo de simulação, tendo seus detalhamentos descritos em Collischonn *et al.* (2007), Fan *et al.* (2014 e Pontes *et al.* (2015).

O modelo também requer como dados de entrada os dados climáticos (parâmetros de temperatura, vento, umidade relativa, insolação e pressão) e de precipitação. Os dados de vazão também são necessários, mas apenas para calibração do modelo (Fan *et al.*, 2014).

As estações fluviométricas, descritas na Tabela 1, foram obtidas através da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018). A partir da localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica, as sub-bacias foram delimitadas, conforme mostra a Figura 3.

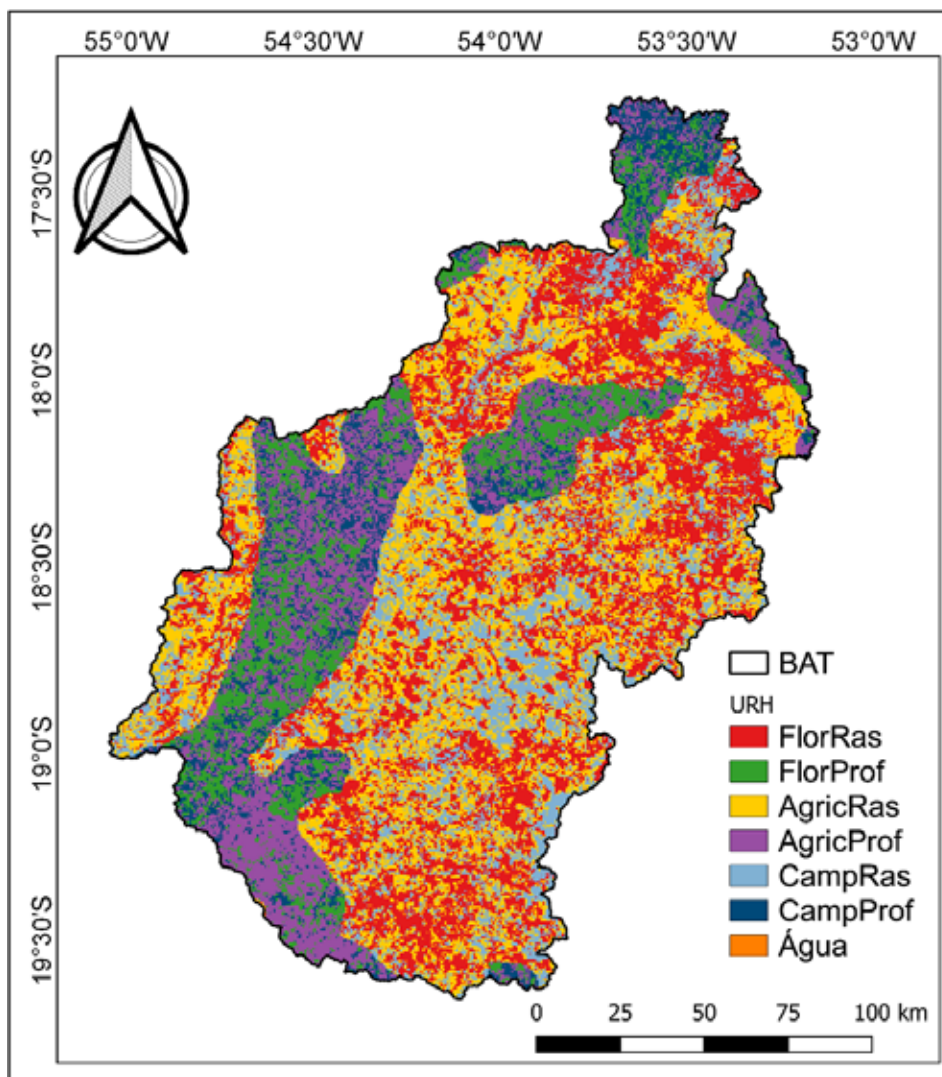


Figura 2 Unidades de Resposta Hidrológica (URH) (Fan; *et al.* 2015; Adaptado: Autor).

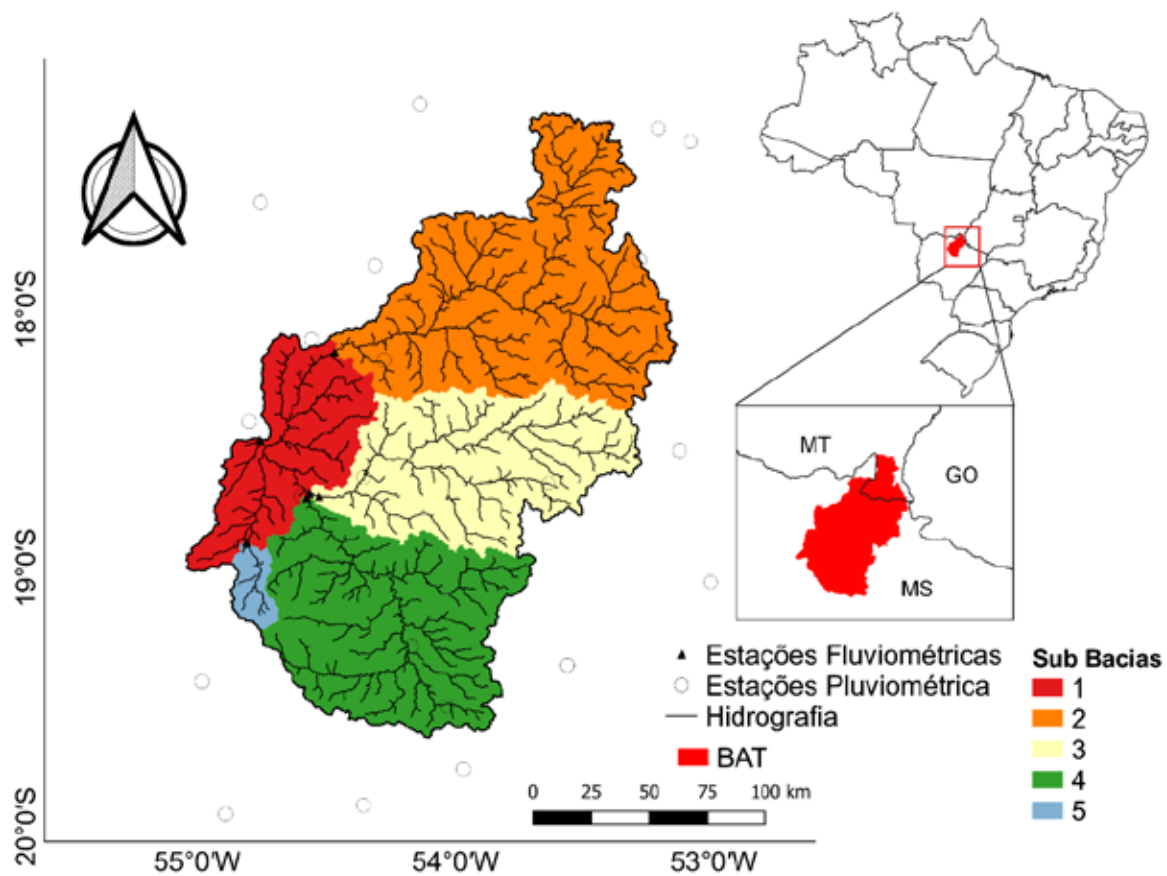


Figura 3 Localização das estações pluviométricas e fluviométricas, e sub-bacias delimitadas.

Tabela 1 Identificação das estações fluviométricas.

| Estação               | ID da Estação | Sub-bacia | Rio          |
|-----------------------|---------------|-----------|--------------|
| Coxim                 | 66870000      | 1         | Taquari      |
| Pedro Gomes           | 66845000      | 2         | Taquari      |
| Garimpagem            | 66855000      | 3         | Jauru        |
| Confluência Rio Jauru | 66849000      | 4         | Coxim        |
| Próximo Rio Verde     | 66865000      | 5         | Taquarizinho |

Os dados de precipitação foram obtidos pelo conjunto de dados PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks*), que se encontra separado em três produtos: PERSIANN, PERSIANN-CDR, PERSIANN-CCS, todos munidos de cobertura variando entre 60°N e 60°S (Nguyen *et al.*, 2019). O PERSIANN-CDR é uma base dados de precipitação (Ullah *et al.*, 2019), que possui uma série histórica desde 1983 até o presente, com resolução espacial de 0,25° (Ashouri *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2019). O produto PERSIANN-CDR já foi utilizado em estudos no Brasil com resultados satisfatórios (Dubreuil *et al.*, 2017).

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado o produto PERSIANN-CDR diário com uma resolução espacial de 0,25°, entre os anos de 1995 e 2015. Pode-se observar na Tabela 2 as estações pluviométricas utilizadas para preenchimento de falhas pontuais no produto PERSIANN-CDR. A Tabela 2 também apresenta o número de anos e meses em que existe sobreposição de dados entre as estações pluviométricas da ANA e os pontos de *grid* do PERSIANN-CDR, a fim de realizar a validação de tais dados através de uma análise ponto-para-pixel (Buarque *et al.*, 2011; Bâ *et al.*, 2018;). Os dados de clima foram obtidos da base de dados do CRU (New *et al.*, 2002).

**Tabela 2** Estações utilizadas na validação e preenchimento do Produto PERSIANN – CDR e sua relação de anos e meses sobrepostos na análise anual e mensal.

| Estações Pluviométricas | Latitude | Longitude | Overlapping (anos) | Overlapping(meses) |
|-------------------------|----------|-----------|--------------------|--------------------|
| 1753000                 | -17,302  | -53,217   | 31                 | 372                |
| 1754002                 | -17,587  | -54,757   | 24                 | 288                |
| 1754004                 | -17,831  | -54,313   | 29                 | 348                |
| 1853000                 | -17,811  | -53,289   | 31                 | 372                |
| 1853002                 | -18,198  | -54,278   | 26                 | 312                |
| 1853005                 | -18,674  | -53,641   | 35                 | 420                |
| 1854001                 | -18,116  | -54,56    | 27                 | 324                |
| 1854004                 | -18,433  | -54,8     | 19                 | 228                |
| 1854006                 | -18,724  | -54,599   | 33                 | 396                |
| 1953001                 | -19,778  | -53,972   | 35                 | 420                |
| 1954004                 | -19,054  | -53,014   | 28                 | 336                |
| 1954006                 | -19,302  | -54,173   | 33                 | 396                |

### 2.3 Ajuste e Calibração do Modelo

O processo de ajuste do modelo foi baseado na técnica descrita por Jardim *et al.* (2017). Em um primeiro momento foram atribuídos valores aos parâmetros fixos, levando em consideração a literatura (Collischonn, 2001; WWF, 2017) e conhecimento dos pesquisadores sobre a área. Após atribuição de parâmetros fixos, o modelo foi submetido ao teste de sensibilidade dos parâmetros calibráveis para ajustes iniciais levando em consideração o valor de Nash-Sutcliffe - NS (Mello *et al.*, 2008). Os valores iniciais dos parâmetros calibráveis foram obtidos em levantamentos realizados por Collischonn (2001), WWF (2017). Após a conclusão do teste de sensibilidade dos parâmetros calibráveis foi realizado o processo de calibração automática.

Com base nos resultados da análise de sensibilidade, nove parâmetros foram utilizados para a calibração, sendo eles:  $Wm$  (mm) a capacidade de armazenamento de água no solo,  $b$  o controle da separação entre o escoamento superficial e a saturação de armazenamento de água,  $Kbas$  (mm/dia) parâmetro de escoamento subterrâneo,  $Kint$  (mm/dia) o parâmetro de drenagem sub-superficial,  $Wc$  (mm) o limite de armazenamento para acontecer o fluxo ascendente ou descendente,  $XL$  o índice de distribuição do tamanho dos poros,  $CS$  e  $CI$  parâmetros da propagação superficial e subsuperficial nas células, respectivamente e  $CB$  (dias) o parâmetro do retardo do reservatório subterrâneo.

### 2.4 Análise Estatística

Os resultados de vazões simuladas pelo modelo foram comparados aos dados de vazões observadas através de técnicas estáticas usadas em estudos hidrológicos. O Coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) descrito na Equação 6,

permite verificar a eficiência do modelo hidrológico, e, é mais sensível para vazões máximas. O coeficiente NS pode variar do negativo infinito até 1, sendo que, o valor 1 indica ajuste perfeito, valores acima de 0,75 o ajuste é considerado adequado, enquanto que, variando de 0,36 até 0,75 é considerado aceitável (Gottschalk *et al.*, 2001). O coeficiente de Nash-Sutcliffe dos valores logaritmos (Equação 7) de descarga (Nash & Sutcliffe, 1970) é mais influenciado pelas vazões mínimas e, quando se aproxima no valor limite 1, representa o modelo mais adequado (Collischonn, 2001).

As estatísticas quantitativas para validação do PERSIANN-CDR e entre os valores observados e calculados foram baseadas pelas equações de *Bias* (Equação 8), que representa a diferença relativa, e pelo erro relativo da raiz média quadrada (RMSE relativo) que avalia a porcentagem do erro, através da equação 9.

A equação 10 calcula o coeficiente do erro relativo do volume total ( $\Delta V$ ) que verifica a variabilidade do volume de água, sendo os valores ideais igual a zero para esses indicadores.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{om})^2} \quad (6)$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{ci}) - \log(Q_{oi}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{om}))^2} \quad (7)$$

$$Bias = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \quad (8)$$

$$RMSE\ Relativo = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{n}} / Q_{om} \tag{9}$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ci} - \sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \tag{10}$$

onde  $Q_{ci}$  é a vazão calculada,  $Q_{oi}$  é a vazão observada e  $Q_{om}$  é a vazão média observada, todos os valores dentro do tempo observado e com número de intervalos indicados por  $n$ .

### 2.5 Mudança Climática e Uso e Ocupação do Solo

Para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, quinto relatório do IPCC, foram criados os RCPs (*Representative Concentration Pathways*), níveis forçantes radioativas de estabilização, que servem de entrada para modelagem climática e química atmosférica

nos experimentos numéricos CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). (Silveira et al., 2016).

Para testar os efeitos de mudanças de uso e ocupação do solo e composição atmosférica, o modelo calibrado foi perturbado com dados do CMIP5, com o cenário de emissões extremas (RCP8.5), em que os valores da concentração de CO<sub>2</sub> mudam de 387 para 541 entre os anos de 2011 e 2015 (Pires et al., 2016), sendo este o cenário mais pessimista do AR5. Conforme a Figura 4, foram utilizados dados do modelo climático *Hadley Centre Global Environmental Model Version 2* (HadGEM2-ES), uma vez que sua capacidade de representação das variáveis para a região já foi demonstrada em estudos prévios (Abrahão & Costa., 2018; Pires et al., 2016).

Foram realizadas simulações para os anos de 2030, 2040 e 2050, para estimar as mudanças do uso e ocupação do solo que se baseiam na contribuição de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na agricultura, silvicultura e outras atividades de uso da terra (AFOLU) descrito por Soares-Filho et al. (2018). Tais cenários de baixo carbono inclui medidas tecnicamente possíveis de mitigações a serem implementadas, que consideram a transição para práticas de menor intensidade de carbono para as atividades.

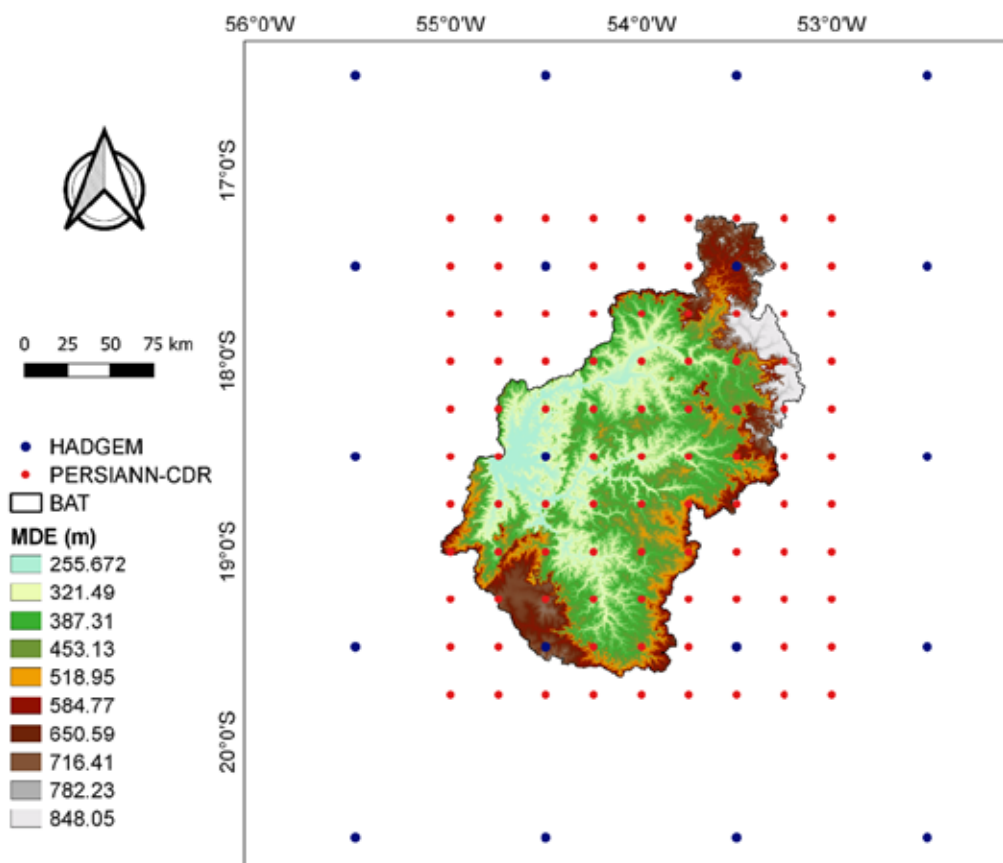


Figura 4 Distribuição da posição do centroide dos grids do PERSIANN-CDR e HADGEM2.

As projeções climáticas foram feitas para o período de 2030 a 2050, com intuito de manter o período de tempo que a calibração (20 anos), de tal forma que fosse realizada uma comparação adequada. A partir das projeções, foram

construídos sete cenários de perturbação em relação ao controle (Tabela 3), e, tais perturbações são referentes ao uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas.

**Tabela 3** Denominação dos cenários de mudanças do uso e ocupação do solo e climáticas.

| Sigla | Cenários   |
|-------|--|
| C_30  | Clima de controle e projeção do uso do solo 2030 (AFOLU) |
| C_40  | Clima de controle e projeção do uso do solo 2040 (AFOLU) |
| C_50  | Clima de controle e projeção do uso do solo 2050 (AFOLU) |
| MP_UC | Clima CMIP5 RCP8.5 e uso do solo atual                   |
| MP_30 | Clima CMIP5 RCP8.5 e projeção do uso do solo 2030        |
| MP_40 | Clima CMIP5 RCP8.5 e projeção do uso do solo 2040        |
| MP_50 | Clima CMIP5 RCP8.5 e projeção do uso do solo 2050        |

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Validação do PERSIANN – CDR

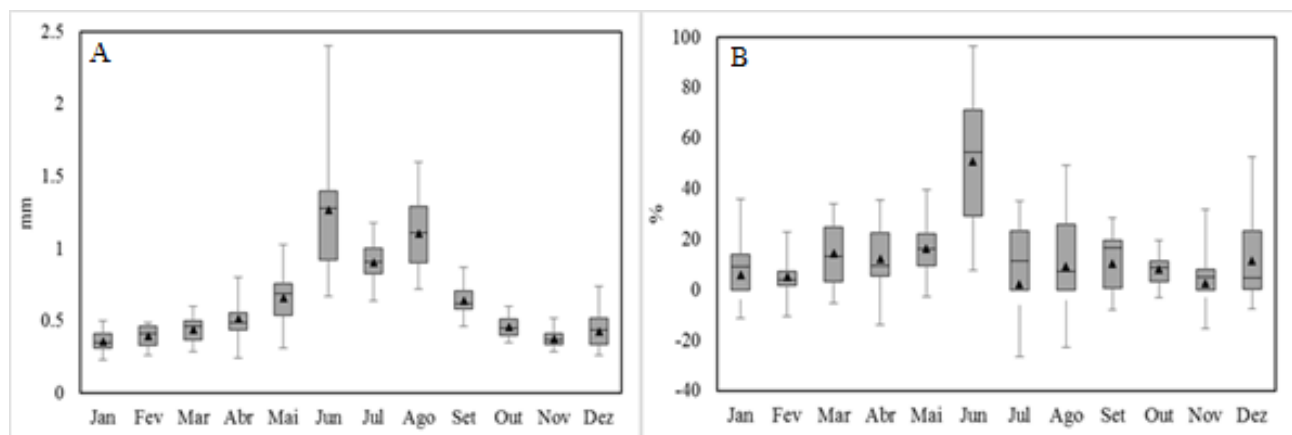
De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 5, 6 e 7, o PERSIANN mostrou-se adequado para representar a precipitação na região, em escalas mensais, anuais e diárias, o que possibilitou o seu uso no processo de modelagem para a região. Também foi verificado que, a variação do RMSE entre o observado e o estimado ficou abaixo de 1,5 mm no acumulado mensal, bem como a porcentagem do Bias ficou próximo ao zero. Além disso, verificou-se que as regiões de maior inconsistência se apresentam no período de seca (junho, julho e agosto).

Assim como Michot *et al.* (2018) e Buarque *et al.* (2011) foram usados os pontos de grid do PERSIANN-CDR próximos às estações pluviométricas indicadas na Tabela 2 (“ponto-para-pixel”), uma vez que a diferença encontrada

entre uma análise especializada ou de ponto-para-pixel apresentaram pouca diferença (Michot *et al.*, 2018).

Os valores encontrados na análise diária (Figura 6) também se mostraram bastante adequados, uma vez que seu valor máximo foi de 3,54 mm, e a maior parte dos pontos analisados foram inferiores a 2,6 mm (Figura 6a). O valor diário de RMSE, de modo geral, foi maior que os acumulados mensais pois em análises mensais o erro é atenuado pelo conjunto de dados (Figura 5a). Esse valor adequado foi mantido para o Bias, com a maior parte dos valores se concentrando entre 17% e 26,4% (Figura 6b), assim como a média mensal.

Para a validação em escala anual tanto RMSE quanto Bias foram consideravelmente inferiores as escalas diárias e mensais. Esse valor mais baixo, que indica uma boa adequação para a região, ocorre pois o volume de dados atenuou as possíveis discrepâncias entre dados do PERSIANN – CDR e os dados de estação pluviométricas.



**Figura 5** RMSE relativo em mm (A) e Bias em % (B), para os acumulados mensais (triângulos são as médias).



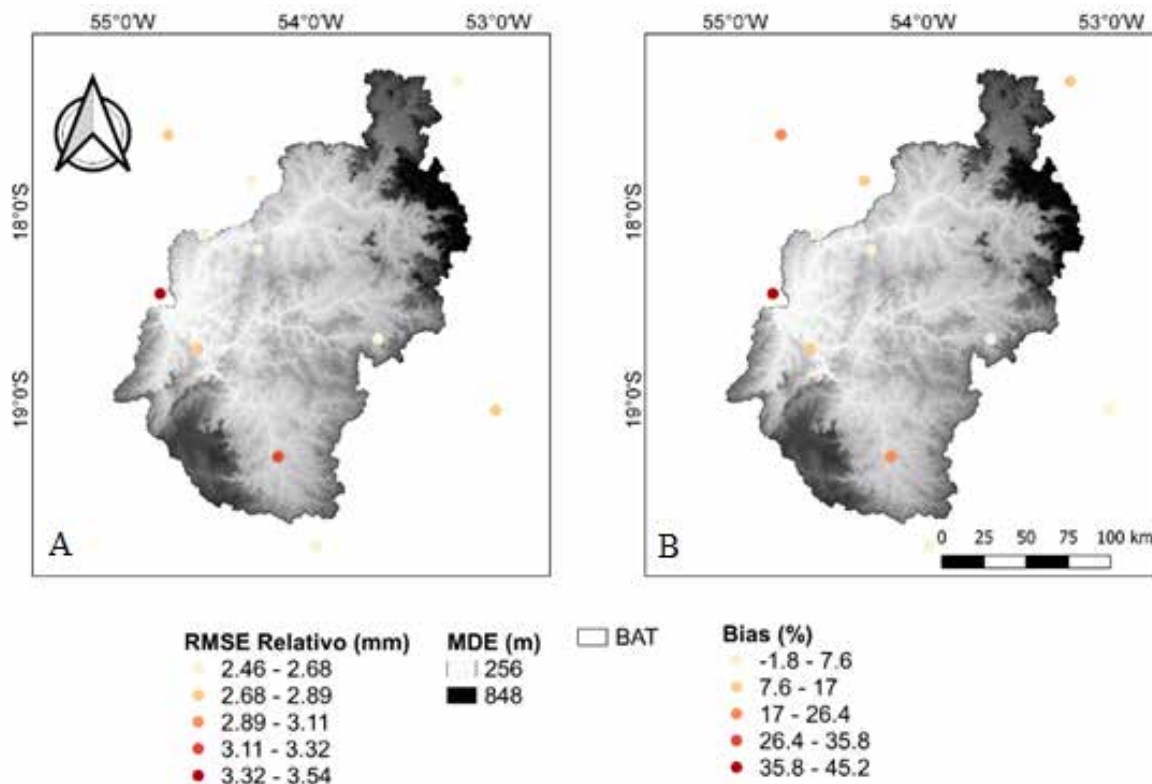


Figura 6 RMSE relativo em mm (A) e Bias em % (B) para os valores diários.

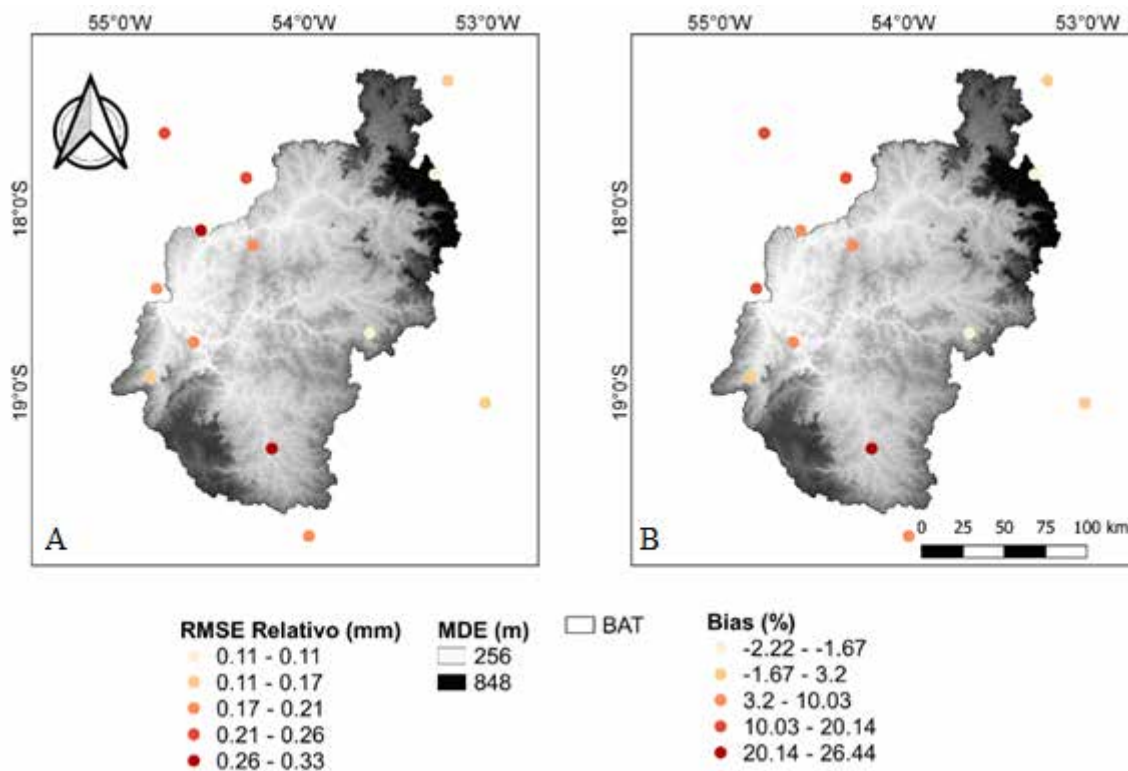


Figura 7 RMSE relativo em mm (A), Bias em % (B) para o acumulado anual.

Esta relação de melhorias em escalas mensais e anuais também foi observada para estudos envolvendo o PERSIANN-CDR para a Amazônia (Arvor *et al.*, 2017).

Conforme o estudo de Liu *et al.* (2019), foram observados resultados ligeiramente melhores na parte baixa da bacia hidrográfica, com a exceção ao exutório da bacia, quando analisado na escala temporal diária (Figura 6 A, B). Para o acumulado anual foi observada uma queda significativa na diferença entre o estimado e observado (Figura 7 A, B), como abordado anteriormente escalas anuais tendem a atenuar erros. Além da redução de erros, ciclos anuais são mais fáceis de ser representados, do que uma escala diária.

### 3.2 Calibração do Modelo Hidrológico

O período de calibração, para o exutório da bacia, denominado de sub-bacia 1, foram encontrados os melhores resultados estatísticos em relação a eficiência do modelo hidrológico para área em estudo, com o NS e NSlog igual a 0,64 e 0,68, respectivamente, reproduzindo aceitavelmente o comportamento do hidrograma na sazonalidade das vazões e do instante de tempo de subida e descida dos hidrogramas.

Os valores de NSlog na calibração, demonstram também que o modelo teve um melhor ajuste sobre os períodos de recessão e estiagem, do que os períodos de cheias, que são expressos pelo NS.

Além disto a região, por ser o ponto jusante da bacia e uma área de elevação menor, pode sofrer com maiores inundações, o que pode explicar os valores de calibração encontrados para a região (Pontes *et al.*, 2017).

Destaca-se ainda que, a calibração foi realizada individualmente para cada sub-bacia, e, neste processo também foi usada a calibração solidária, em que os parâmetros com o mesmo tipo de solo possuem relação no processo de calibração, aumentando a coesão entre seus parâmetros (Jardim *et al.*, 2017).

Os valores encontrados de NS e NSlog para as demais sub-bacias (Tabela 4) na calibração são considerados aceitáveis e a variação de volume atingiu resultados

considerados ótimos (entre -10 e 10%) (Moriassi *et al.*, 2007). A única exceção foi para estação Prox. R. Verde-66865000, que se encontra na sub-bacia 5, isso poderia significar que os parâmetros que controlam as vazões máximas não estão adequadamente calibrados fazendo com que o modelo não descreva satisfatoriamente a geração do escoamento em condições de chuva de alta intensidade. Ao mesmo tempo, o MGB tende a melhorar seu desempenho quanto maior o tamanho da bacia (Collischonn *et al.*, 2007) e a sub-bacia 5 apresentou-se como a menor para a área de estudo, concomitante ao fato de tratar-se de uma bacia de cabeceira, o que resulta em piores valores calibrados (Pontes *et al.*, 2017).

A Figura 8 ilustra as vazões observadas e calculadas nas estações de Garimpagem, Confluência Jauru, Pedro Gomes e Coxim. Os hidrogramas mostram que o modelo conseguiu representar bem o ciclo hidrológico, seja no período chuvoso ou no período seco.

O modelo tende a subestimar as vazões de pico, e isto pode ser explicado por que as curvas-chave não foram bem definidas para as vazões máximas, devido à pouca medição de vazão disponível em estágios mais elevados do rio (Collischonn & Tucci, 2001).

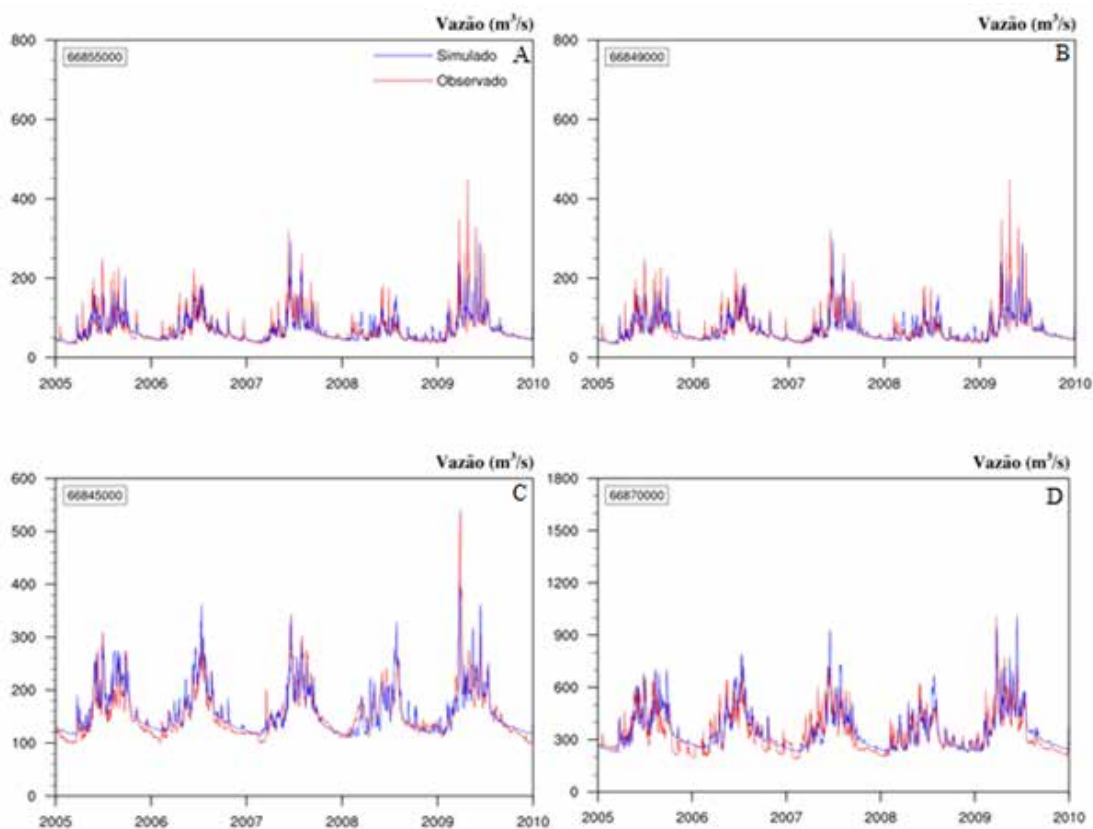
Os resultados da calibração foram considerados satisfatórios, de tal forma que, foram utilizados como o cenário de controle para comparação com os cenários de projeções climáticas e uso e cobertura de solo.

### 3.3 Cenários

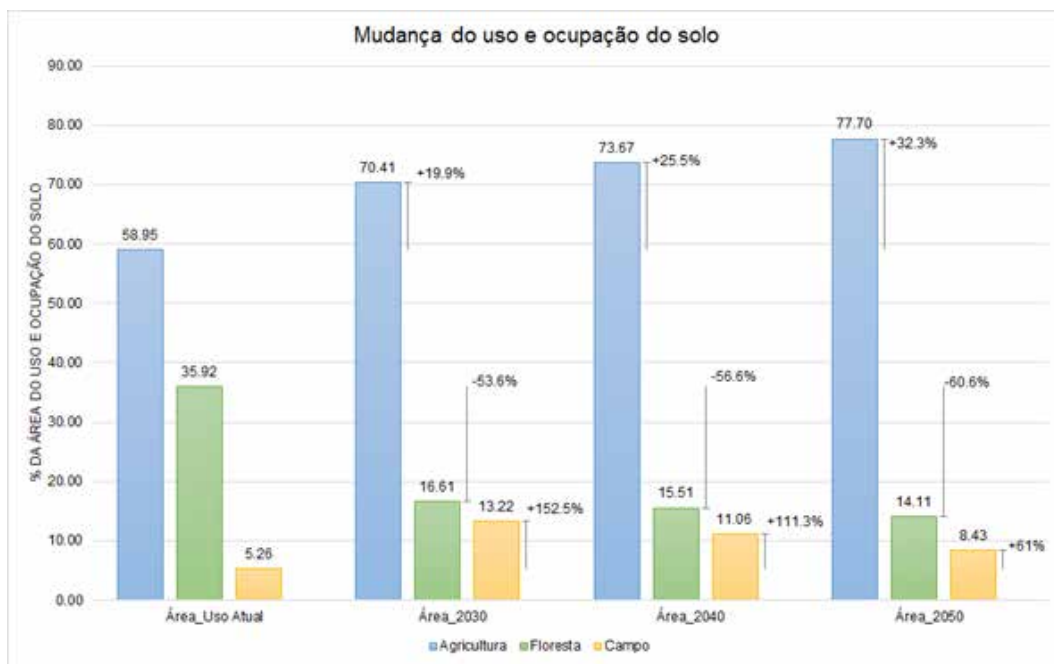
A Figura 9 apresenta o gráfico da tendência de mudança do uso e cobertura do solo até 2050, resultados estes obtidos pelo trabalho de Soares Filho *et al.* (2018), na qual foi otimizado para apenas três classificações, sejam elas, agricultura (agricultura e pastagem), floresta e campo. Foi verificado um aumento significativo nas áreas de produção, sendo que, em 2050 tenderá a uma elevação de aproximadamente 32,3%, e conseqüentemente, uma diminuição de área de floresta.

**Tabela 4** Análise estatística dos parâmetros NS, NSlog e  $\Delta V$ .

| Estações                 | Sub-bacia | Parâmetros estatísticos |       |                |
|--------------------------|-----------|-------------------------|-------|----------------|
|                          |           | NS                      | NSLog | $\Delta V(\%)$ |
| Coxim-66870000           | 1         | 0,644                   | 0,688 | 7,413          |
| Pedro Gomes -66845000    | 2         | 0,651                   | 0,7   | 2,017          |
| Garimpagem-66855000      | 3         | 0,571                   | 0,448 | 1,846          |
| Conflu. Jauru - 66849000 | 4         | 0,6                     | 0,588 | 6,206          |
| Prox. R. Verde-66865000  | 5         | 0,063                   | -0,22 | 30,765         |



**Figura 8** Hidrogramas observados e calculados em  $m^3 \cdot s^{-1}$  pelo tempo em anos. A. Estação Garimpagem; B. Estação Confluência Rio Jauru; C. Estação Pedro Gomes; D. Estação Coxim.



**Figura 9** Mudança do uso e ocupação do solo com projeção até 2050.

Em relação às mudanças climáticas, observou-se entre as precipitações atuais e futuras, uma tendência de redução, conforme mostra a Figura 10, em que ilustra as precipitações médias atuais e da projeção futura de 2030 até 2050 em diversos pontos da região. Calculando a diferença entre o cenário e o observado obteve-se a anomalia (Figura 11C), na qual apresentou uma tendência de redução da quantidade de precipitação de 16,9 a 176 mm em grande parte das sub-bacias 2, 3, 4 e 5, e, principalmente em locais com topografia mais elevada. Em uma pequena porção da sub-bacia 1 verificou-se um aumento de 23 a 103 mm da precipitação nos locais com menor declive.

A precipitação média na bacia hidrográfica variou de 1283 a 1782 mm no período atual, enquanto no cenário até 2050 apresentou uma variação de 1283 a 1562 mm, que corresponde a uma redução de aproximadamente 12%, e este resultado pode impactar diretamente na vazão na calha do rio Taquari. Esta redução na precipitação dada pelo RCP8.5 do CMIP5 também já foi encontrada para estudos conduzidos no Brasil em outras regiões. Sorribas *et al.*

(2016) encontraram até 35% de redução para a Amazônia, enquanto Marengo *et al.* (2017) encontraram até 90% de redução para o Nordeste. Isso torna o resultado de 12% condizente com as características climáticas médias da região, quando comparada ao extremo chuvoso da Amazônia e ao semiárido do Nordeste.

Quando aplicado as mudanças tanto do uso do solo quanto as climáticas no modelo hidrológico, verificou-se a alteração da vazão no exutório da bacia hidrográfica, para as combinações propostas, conforme mostra a Figura 11. Percebe-se a diminuição da vazão média mensal em relação a vazão de controle para a maior parte dos cenários propostos e para quase todos os meses. Uma redução semelhante foi encontrada por Sorribas *et al.* (2016) para a porção leste da Amazônia, que também apresentou uma redução nas chuvas para as projeções climáticas. Destaca-se ainda que, o Bias atingiu aproximadamente - 25% para o cenário MP\_50 (Tabela 3), enquanto para o cenário C\_50, em que há apenas mudança do uso do solo, obteve-se uma variação de Bias até -14% para 2050.

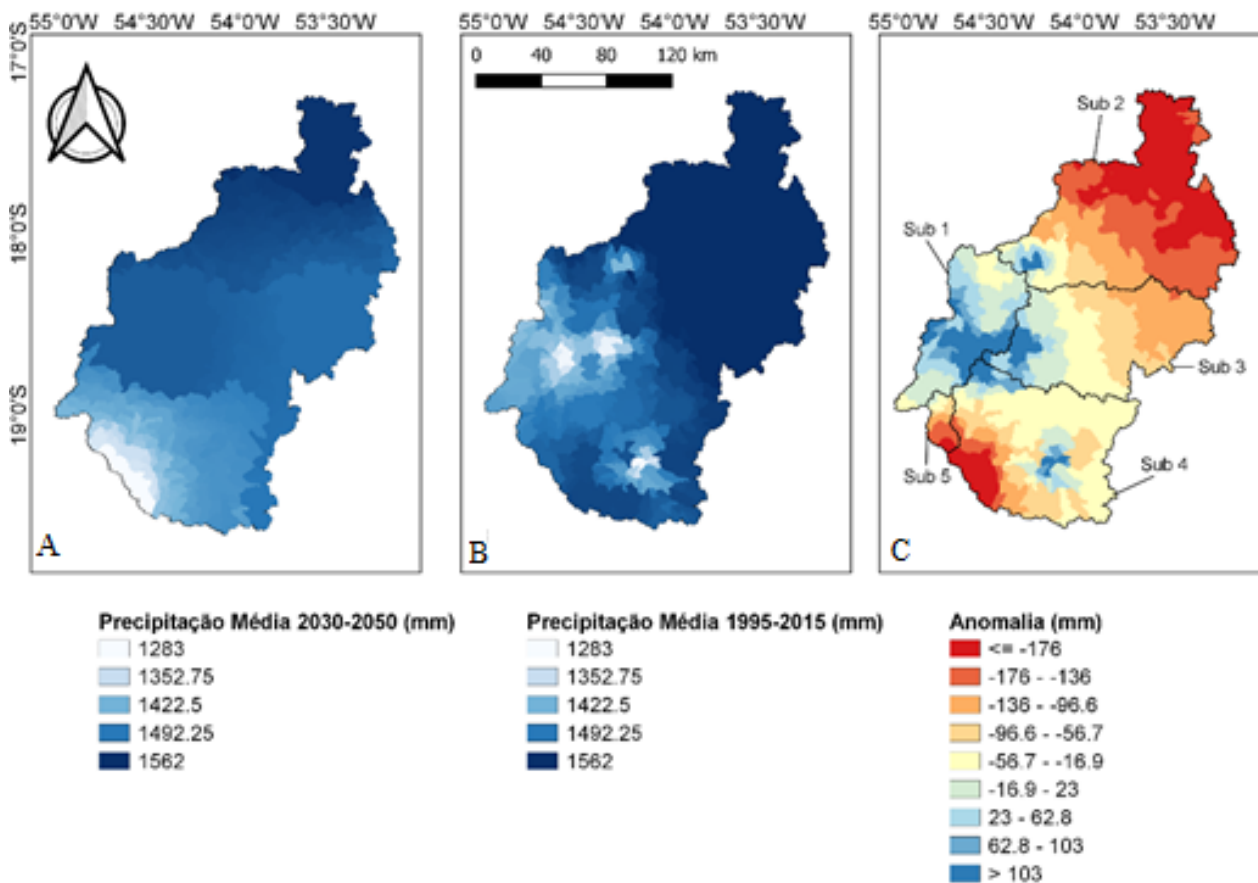


Figura 10 Cenário para precipitação média de 2030 a 2050. A. Precipitação média de 1995 a 2015; B. Anomalia entre as precipitações médias entre A e B (C).

No período chuvoso, de janeiro a março, para os cenários MP\_UC, MP\_30, MP\_40 e MP\_50, a vazão foi superior em relação a vazão de controle, fato esse devido a diminuição da taxa de infiltração por conta do solo saturado, e por consequência, aumentando o escoamento superficial. Posteriormente, no período seco, entre abril a outubro houve um incremento na vazão de base e a diminuição do escoamento superficial.

Em contrapartida, na grande maioria dos cenários verificou-se um aumento da vazão de base (Figura 12 A

,B) e da evapotranspiração (Figura 13 A, B), devido as alterações do uso do solo, propiciando assim, aumento da infiltração de água no solo e o aumento da temperatura e da insolação.

Exceto para os cenários com combinação de mudança climática e o uso atual do solo, pois apresentou tendência de aumento de vazão média mensal no período de cheia, e, para o mesmo período, foi verificado o incremento da vazão de base, entretanto, a evapotranspiração diminuiu em média 4,5%.

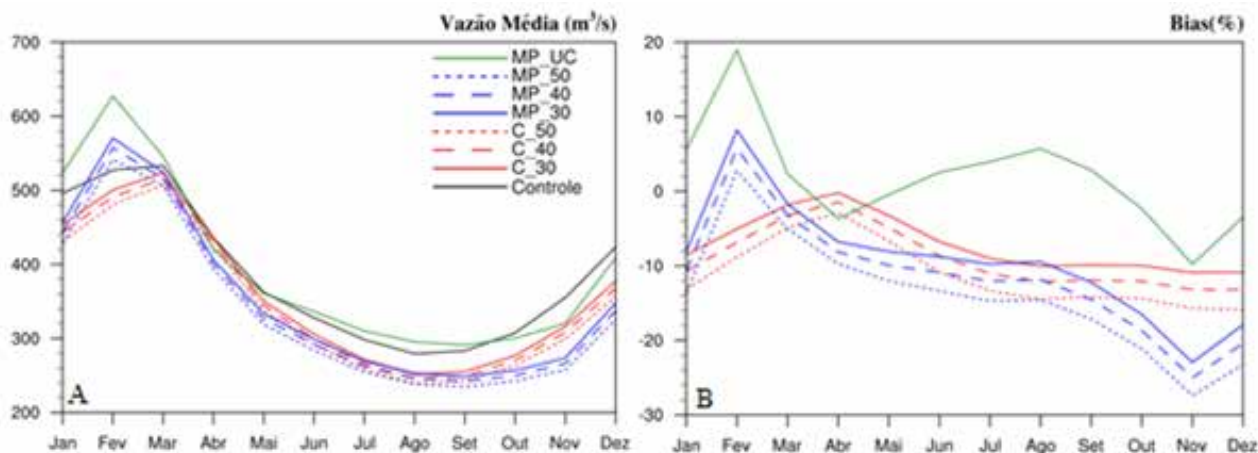


Figura 11 Variação da vazão média mensal entre os cenários e o controle em  $m^3.s^{-1}$  (A) e o Bias em % (B).

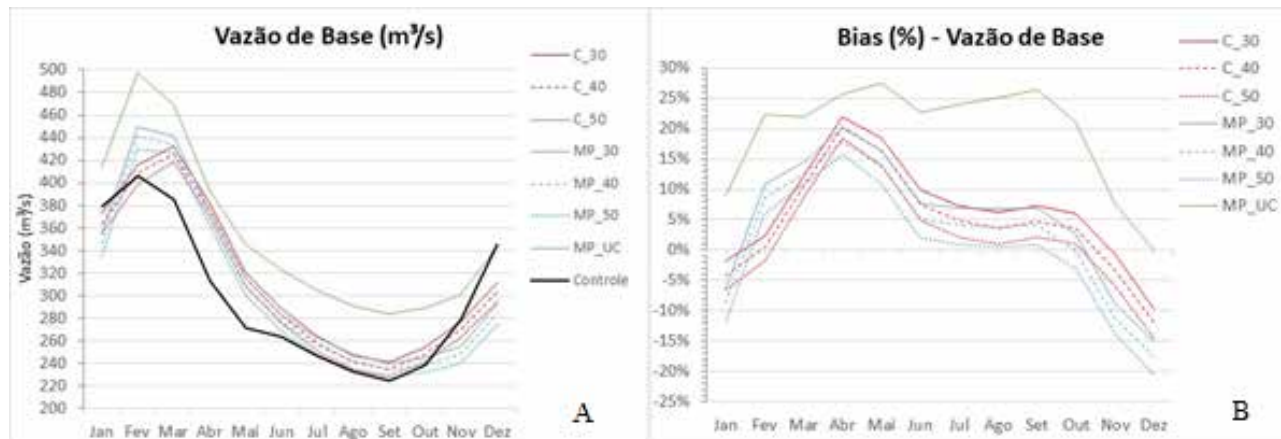


Figura 12 Vazão média mensal de base entre os cenários e o controle em  $m^3.s^{-1}$  (A) e o Bias em % (B).

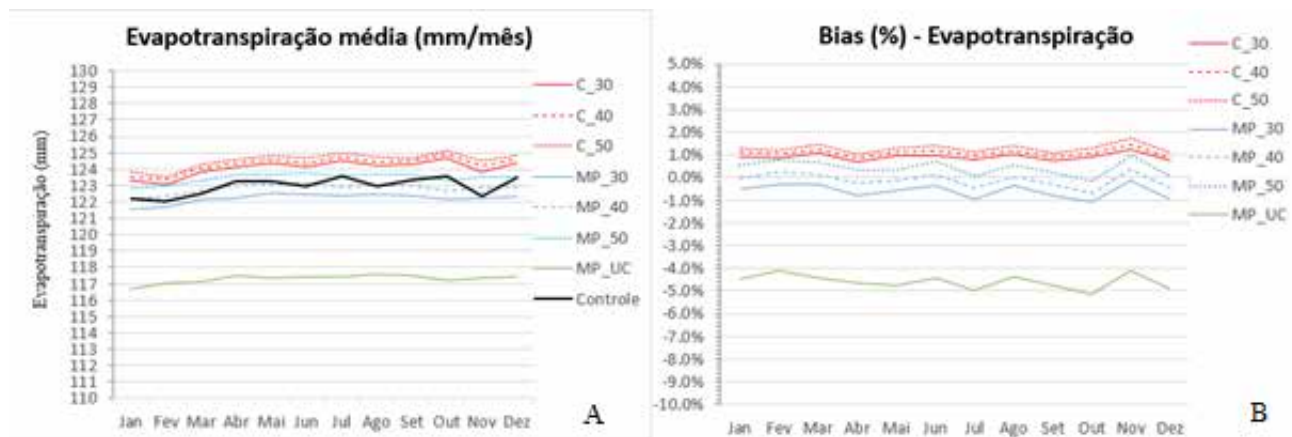


Figura 13 Evapotranspiração média mensal entre os cenários e o controle em  $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$  (A) e o Bias em % (B).

## 4 Conclusões

Pode-se considerar o modelo como representativo para a área da BAT, visto que os hidrogramas da simulação e dos dados observados são bastante similares para o período da calibração, e, os cálculos estatísticos foram considerados aceitáveis. Isso permite concluir que a utilização do modelo em futuros estudos na região podem ser promissora.

É importante salientar que a região é escassa de dados de vazão, o que gera problemas na avaliação do modelo, sendo assim, caso obtenha-se uma maior base de dados com mais qualidade e/ou a construção da curva-chave do rio Taquari, é provável que se apresentem melhores resultados.

O modelo também foi capaz de detectar mudanças da vazão média mensal em função das mudanças climáticas e de uso do solo propostas nos cenários. Os resultados desta aplicação alertam que há uma tendência de diminuição da vazão média mensal na bacia de estudo, diante das projeções futuras, ratificando a importância do uso de técnicas de mitigação na emissão do gás carbônico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se testar uma combinação dos resultados obtidos com dados sedimentológicos, uma vez que, esta área de estudo tem grande contribuição na descarga sólida na região do Pantanal.

## 5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do projeto de pesquisa MORHIS (01.13.0455.00), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia.

## 6 Referências

- Abrahão, G.M. & Costa, M.H. 2018. Agricultural and Forest Meteorology Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257: 32–45.
- ANA. 2018. Agência Nacional de Águas – Hidroweb. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- Arvor, D.; Funatsu, B.M.; Michot, V. & Dubreui, V. 2017. Monitoring rainfall patterns in the southern amazon with PERSIANN-CDR data: Long-term characteristics and trends. *Remote Sensing*, 9: 889 - 919. <https://doi.org/10.3390/rs9090889>
- Ashouri, H.; Hsu, K.; Sorooshian, S.; Braithwaite, D.K.; Knapp, K.R.; Cecil, L.D.; Nelson, B. R. & Pratt, O.P. 2015: PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *American Meteorological Society*, 96: 69–83
- Assine, M.L.; Padovani, C.R.; Zacharias, A.A.; Ângulo, R.J. & De Souza, M.C. 2005 Compartimentação geomorfológica, processos de avulsão fluvial e mudanças do curso do Rio Taquari, Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6: 97 – 108.
- Bâ, K.; Balcázar, L.; Diaz, V.; Ortiz, F.; Gómez-Albores, M. & Díaz-Delgado, C. 2018. Hydrological Evaluation of PERSIANN-CDR Rainfall over Upper Senegal River and Bani River Basins. *Remote Sensing*, 10(12): 1884-1903.
- Buarque, D.C.; De Paiva, R.C.D.; Clarke, R.T. & Mendes, C.A.B. 2011. A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(19): 1–12.
- Collischon, W.; Allasia, D.; Silva, B.C. & Tucci, C.E.M. 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5): 878-895.

- Collischonn, W. 2001. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Tese de Doutorado, 270p.
- Dubreuil, V.; Funatsu, B.M.; Michot, V.; Nasuti, S.; Debortoli, N.; de Mello-Thery, N.A.; Le Tourneau, F.M. 2017. Local rainfall trends and their perceptions by Amazonian communities. *Climatic Change*, 143: 461–472
- Fan, F.M.; Buarque, D.C.; Pontes, P.R.M. & Collischonn, W. 2015. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília –DF, 8p.
- Fan, F.M.; Pontes, P.R.M. & Paiva, R.C.D. 2014. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19: 137- 147.
- Getirana, A.C.V.; Bonnet, M.P.; Rotunno Filho, O.C.; Collischonn, W.; Guyot, J.L.; Seyler, F. & Mansur, W.J. 2010. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on *in situ* and spatial altimetry data. *Hydrological Process*, 24: 3219-3236.
- Gottschalk, L.; Beldring, S.; Engeland, K.; Tallaksen, L.; Saelthun, N.R.; Kolberg, S. & Motovilov, Y. 2001. Regional/Macro-scale hydrological modelling – a Scandinavian experience. *Hydrological Sciences Journal*, 46(6): 963-982.
- Jardim, P.F.; Fleischmann, A.S.; Pelinson, D.; Oliveira, A.M.; Siqueira, V.A.; Fan, F.M. & Collischonn, W. *Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB-IPH 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas: 90p.
- Liu, J.; Xia, J.; She, D.; Li, L.; Wang, Q. & Zou, L. 2019. evaluation os six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over climate transition area in china. *Remote Sensing*, 11: 1477-1498.
- Marengo, J.A.; Torres, R.R. & Alves, L.M., 2017. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129: 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Meller, A.; Bravo, J.M. & Collischonn, W. 2012. Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17: 209 – 224.
- Mello, C.R.; Viola, M.R.; Norton, L.D.; Silva, A.M. & Weimar, F.A. 2008. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian head water basin. *Catena*, 75: 235-247.
- Menzel, L. & Bürger, G. 2002. Climate change and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 267: 53-64.
- Michot, V.; Vila, D.; Arvor, D.; Corpetti, T.; Ronchail, J.; Funatsu, B.M.; & Dubreuil, V. 2018. Performance of TRMM TMPA 3B42 V7 in replicating daily rainfall and regional rainfall regimes in the Amazon basin (1998-2013). *Remote Sensing*, 10(12):1879-1899.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R. L.; Harmel, R.D. & Veith, T.L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50: 885–900.
- Nash J.E & Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282–290.
- New, M.; Lister, D.; Hulme, M. & Makin, I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21: 1–25.
- Nguyen, P.; Shearer, E.J.; Tran, H.; Ombadi, M.; Hayatbini, N.; Palacios, T.; Huynh, P.; Braithwaite, D.; Updegraff, G.; Hsu, K.; Kuligowski, B. & Sorooshian, S. 2019. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data*, 6: 1–10.
- Pires, G.F.; Abrahão, G.M.; Brumatti, L.M.; Oliveira, L.J.C.; Costa, M.H.; Liddicoat, S. & Ladle, R.J. 2016. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229: 286–298.
- Pontes, P.R.M.; Fan, F.M.; Fleischmann, A.S.; Paiva, R.C.D.; Buarque, D.C.; Siqueira, V.A.; Jardim, P.F.; Sorribas, M.V. & Collischonn, W. 2017. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 94: 1-20.
- Pontes, P.R.M.; Collischonn, W.; Fan, F.M. Paiva, R.C.D. & Buarque, D.C. 2015. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4): 888 – 904.
- Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. & Collischonn, W. 2006. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. *Revisão Brasileira de Recursos Hídricos*, 11(4): 15-29.
- Silveira, C.S.; Souza Filho, F.A.; Martins, E.S.P.R.; Oliveira, J.L.; Costa, A.C.; Nobrega, M. T.; Souza, S. A. & Silva, R.F.V. 2016. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2): 416 – 428.
- Soares-Filho, B.S; Campos, A.; Koberle, A.C.; Ribeiro, A.; Barbosa, F.A.; Davis, J.L.; Rajão, R.; Maia, S. & Leles, W. 2018. Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU). 1. Ed. Brasília: *Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente*, 1: 400p.
- Sorribas, M.V.; Paiva, R.C.D.; Melack, J.M.; Bravo, J.M.; Jones, C.; Carvalho, L.; Beighley, E.; Forsberg, B. & Costa, M.H. 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136: 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

- Tucci, C.E.M. 2002. Regionalização de vazões. *Editora da Universidade/UFRGS*. Porto Alegre. 256p.
- Ullah, W.; Wang, G.; Ali, G.; Tawia, D.H.; Bhatti, A. & Lou, D. 2019. Comparing Multiple Precipitation Products against In-Situ Observations over Different Climate Regions of Pakistan. *Remote Sensing*, 11: 628.
- WWF-Brasil; Universidade Católica Dom Bosco; Fundação Tuiuiú. 2017. Monitoramento da Cobertura Vegetal e Uso do Solo da Bacia do Alto do Paraguai – 2016. Brasília, Brasil, 39p.
- Yao, H.; Scott, L.; Guay, C; & Dillon, P. 2009. Hydrological impacts of climate change predicted for an inland lake catchment in Ontario by using monthly water balance analyses. *Hydrological Process*, 23: 2368-2382.

Recebido em: 09/06/2020

Aprovado em: 17/11/2020

**How to cite:**

Suekame, H.K.; Commar, L.F.S.; Gonçalves, F.V.; Carvalho, G.A.; & Pereira, R.B. 2021. Modelagem Hidrológica Combinado à Mudança Climática, Uso e Ocupação do Solo. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 35407. DOI 1982-3908\_2021\_44\_35407