

## Dinâmica do desmatamento na Amazônia e seus impactos na hidrologia: bacia do Rio Machadinho – Rondônia / Brasil

Dynamics of deforestation in Amazonia and its impacts in hydrology: Machadinho River basin – Rondônia / Brazil

Vinicius Alexandre Sikora de Souza<sup>I</sup>, Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>II</sup>, Daniel Medeiros Moreira<sup>III</sup>, Anderson Paulo Rudke<sup>IV</sup>, Marcela Rocha Tortureli de Sá<sup>V</sup>

### Resumo

A bacia hidrográfica do rio Machadinho é um exemplo de ocupação desordenada presente na região amazônica, na qual foram desmatadas grandes áreas com consequente conversão da floresta em pastagens e em núcleos urbanos. O presente trabalho tem o objetivo de analisar os impactos na hidrologia (vazão, precipitação e evapotranspiração) da bacia do rio Machadinho diante de sua dinâmica de ocupação antrópica. Primeiramente, analisaram-se mudanças na cobertura da terra usando imagens do sensor Landsat 5-TM para os anos 1984, 1997 e 2011. A variável vazão foi avaliada quanto a sua sensibilidade mediante o emprego do modelo SWAT para determinar a descarga líquida fixando-se os padrões climáticos e variando-se os cenários históricos de cobertura da terra. A precipitação, obtida por meio de dados do CHIRPS para o período de 1981 a 2017, e a evapotranspiração, estimada via dados do SSEBop entre os anos de 2002 a 2017, foram tratadas como variáveis geoespaciais distribuídas na bacia, com tendências de comportamento de suas séries históricas aferidas por meio do teste Mann-Kendal. Os resultados obtidos mostraram que a ocupação da bacia deu-se de maneira desordenada, cuja área com pastagem passou de 2,6% no ano de 1984 para 45,9% no ano de 2011, sendo a maior conversão observada na nascente do corpo hídrico principal, o que evidenciou uma maior produção de vazão pelo modelo SWAT, que adequadamente captou a variação dessa variável. Adicionalmente, observou-se tendência de redução pluviométrica nos meses mais chuvosos, enquanto detectou-se elevação da evapotranspiração nos meses mais quentes. Nesse sentido, é importante ressaltar que o desmatamento da região tende a reduzir a disponibilidade hídrica para a bacia.

**Palavras-chave:** Impactos antrópicos; Região Amazônica; Hidrologia; Modelagem hidrológica

### Abstract

The Machadinho river basin is an example of disorderly occupation present in the Amazon region, where large areas were deforested and consequently the forest was converted into pastures and urban centers. The present work has the objective of analyzing the impacts in hydrology (streamflows, precipitation and evapotranspiration) of the Machadinho river basin due to its dynamics of anthropic occupation. First, the land cover change was analyzed using Landsat 5-TM images for the years 1984, 1997 and 2011. The streamflow variable was evaluated for its sensitivity by using the SWAT model to determine net discharge by setting the weather patterns and by varying the historical land cover scenarios. The precipitation, obtained by data from the CHIRPS for the period from 1981 to 2017, and evapotranspiration, estimated by the SSEBop data between 2002 and 2017, were treated as distributed geospatial variables in the basin, with behavioral trends of their corresponding historical series measured by means of the Mann-Kendal test. The results showed that the occupation of the basin occurred in a disorderly way, where the pasture area increased from 2.6% in 1984 to 45.9% in 2011, with the highest conversion observed at the spring of the main water body, which accounted for a higher flow production by the SWAT model that adequately described the variable. In addition, trends of rainfall reduction were observed in wetter months, while trends of evapotranspiration elevation were detected in warmer months. Therefore, it is noteworthy to register that deforestation in the region tends to reduce water availability to the basin.

**Keywords:** Anthropogenic impacts; Amazon region; Hydrology; Hydrological modeling

<sup>I</sup> Engenheiro Ambiental, Doutorando, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão – Cidade Universitária, Caixa Postal 68540, CEP 21945-970, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. [vass1000@gmail.com](mailto:vass1000@gmail.com) (ORCID: 0000-0002-5902-6139)

<sup>II</sup> Engenheiro Civil, Dr., Professor do Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão – Cidade Universitária, Caixa Postal 68540, CEP 21945-970, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. [otto@coc.ufjf.br](mailto:otto@coc.ufjf.br) (ORCID: 0000-0003-2763-4401)

<sup>III</sup> Engenheiro Cartógrafo, Dr., Engenheiro do Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Divisão de Hidrologia Aplicada, Av. Pasteur, 404, CEP 22290-240, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. [daniel.moreira@cprm.gov.br](mailto:daniel.moreira@cprm.gov.br) (ORCID: 0000-0002-8915-094X)

<sup>IV</sup> Engenheiro Ambiental, Doutorando, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte (MG), Brasil. [rudke@alunos.ufpr.edu.br](mailto:rudke@alunos.ufpr.edu.br) (ORCID: 0000-0003-2970-5453)

<sup>V</sup> Engenheira Civil, Doutoranda, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Caixa Postal 68540, CEP 21945-970, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. [marcela.tortureli@engenharia.ufjf.br](mailto:marcela.tortureli@engenharia.ufjf.br) (ORCID: 0000-0002-8587-0245)



## Introdução

A bacia hidrográfica do rio Machadinho, localizada no estado de Rondônia, Amazônia Ocidental, representa as principais transformações observadas nas últimas décadas na região. A ocupação dessa bacia ocorreu em dois processos de colonização distintos, que não respeitaram as diretrizes da legislação ambiental do Brasil quanto à manutenção de áreas ripárias (GOMES, 2009). O primeiro processo foi incentivado por meio de projetos de colonização implantados pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), enquanto o segundo foi precedido por estudos prévios de pedologia, topografia e delimitação de lotes agrícolas acompanhando a topografia do terreno.

As ações de intensa antropização ocorridas nas últimas décadas na bacia do rio Machadinho resultaram na conversão de extensas áreas de florestas em campos destinados às atividades agropastoris, que ocasionaram consideráveis impactos nos corpos hídricos, visto que tais ações desconstruíram áreas de grande importância como as regiões ripárias (PEDLOWSKI *et al.*, 1997; ROBERTS *et al.*, 2002; SOLER e VERBURG, 2010), que são consideradas áreas de proteção permanente na legislação ambiental do Brasil. Os principais passivos ambientais são notados com a intensificação dos processos erosivos, assoreamento de cursos de água e degradação da qualidade dos solos e das águas (ROBERTS *et al.*, 2002).

Contudo, em tal área, são poucos os estudos que tentam tratar essas modificações quantitativamente no que concerne ao ciclo hidrológico nessa região. Na literatura, um dos poucos exemplos são os estudos de Gomes (2009) e Souza (2015). O primeiro concentrou-se em relacionar a ocupação de forma qualitativa com processos geomorfológicos da bacia. Já o segundo estudo debruçou-se sobre a quantificação hidrossedimentológica perfazendo um paralelo histórico desta.

Assim, observa-se uma lacuna na literatura que demonstre os efeitos do desmatamento da região no ciclo hidrológico de uma forma mais integrada, correlacionando com as modificações na precipitação, na evapotranspiração e na vazão. Nesses termos, o uso de modelos hidrológicos aliados aos dados de sensoriamento remoto permite avaliar os impactos e prever como diferentes formas de manejo de uma bacia agrícola influenciam a qualidade da água, a produção de sedimentos e o carreamento de cargas de poluentes.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar mudanças na cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Machadinho – RO e analisar a interferência dessas mudanças sobre a dinâmica local do ciclo hidrológico (vazão, chuva e evapotranspiração). Os objetivos específicos do estudo são: (1) desenvolver produtos de cobertura da terra com base em imagens do satélite Landsat, usando o classificador por máxima verossimilhança (MAXVER); (2) utilizar o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT para gerar dados de vazão; e (3) examinar padrões de fluxo de mudanças no ciclo hidrológico com o objetivo de avaliar os efeitos da dinâmica de mudanças na cobertura da terra.

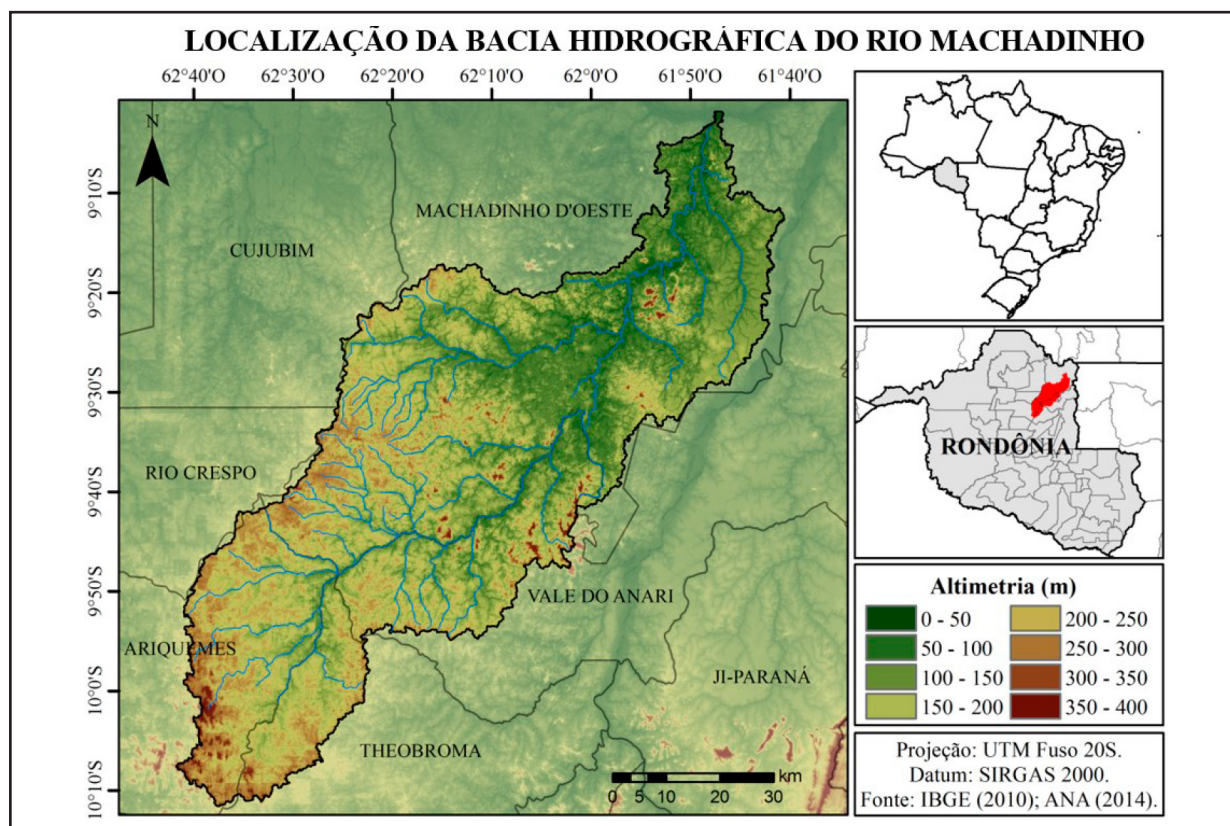
## Material e métodos

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Machadinho (Figura 1) encontra-se inserida totalmente no estado de Rondônia e integra o grupo das principais bacias do estado. Essa bacia localiza-se na Amazônia Ocidental, entre os paralelos de 09° 01' e 10° 12' de latitude sul e meridianos de 61° 39' e 62° 49' de longitude oeste. Ela se encontra na porção centro-leste de Rondônia, abrangendo uma área com extensão de 5.485,41 km<sup>2</sup>, a qual está inserida no domínio de quatro municípios, sendo eles Machadinho d'Oeste, Vale do Anari, Ariquemes e Theobroma.

**Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Machadoinho.**

Figure 1 – Map of location of the Machadoinho river basin.



Fonte: Autores (2019)

## Sistema de cobertura da terra da bacia

O histórico da cobertura da terra foi desenvolvido com base em imagens do sensor Landsat5-TM que apresentavam baixa presença de nuvens. A escolha desse sensor deu-se pela boa escala de resolução espacial (*pixel* de 30 m) e pelo extenso período histórico de aquisição de imagens (1984 a 2011). Assim, selecionaram-se três (3) períodos de tempo, sendo esses os anos de 1984, 1997 e 2011. O critério de escolha foi em função de 1984 e 2011 corresponderem aos anos em que houve a primeira e a última coleta de imagens, respectivamente, mediante o referido sensor. A opção pelo emprego do ano de 1997 ocorreu por abranger um período intermediário entre esses extremos temporais que continham imagens utilizáveis para análise. Na Tabela 1, exibem-se algumas informações adicionais das imagens utilizadas.

As imagens foram previamente georreferenciadas, sendo utilizada, para essa etapa, a malha de estradas da região no código computacional ArcGIS. Após essa ação, as imagens precisaram passar por um processo de construção de mosaico, utilizando, para tanto, o processo de equalização do ArcGIS, que permite articular as imagens por um processo automático via correspondência de histograma.

Posteriormente, as imagens foram submetidas a um processo de classificação supervisionada por *pixel* no programa computacional ENVI, em que foram indicadas amostras dos tipos de coberturas/usos existentes na bacia, a partir das quais o código computacional detectou, através de algoritmos estatísticos, *pixels* com assinaturas espectrais semelhantes aos *pixels* das amostras. Foi utilizado, nesse processo, o classificador por máxima verossimilhança

(MAXVER), com limiar de aceitação de 99%.

**Tabela 1 – Informações das imagens Landsat 5-TM utilizadas.**

Table 1 – Information on Landsat 5-TM images used.

Órbita	Ponto	Data	Ano amostrado
232	67	30/07/2011	2011
	66		
	67	08/08/1997	1997
	66		
	67	04/08/1984	1984

As classes de cobertura utilizadas foram as seguintes: (1) área urbana; (2) água; (3) pastagem; (4) floresta de terra firme; e (5) floresta propensa à inundação. As classes 4 e 5 foram separadas utilizando as informações de suas devidas localizações evidenciadas no zoneamento do estado. Menciona-se, ainda, que a avaliação da classificação se deu por meio do índice Kappa, sendo este aferido no próprio código computacional ENVI na opção pós-classificação. Cabe destacar que, para auxiliar nesse processo, utilizaram-se imagens em alta resolução do Google Earth e de conhecimento de campo sobre a área.

## Comportamento da vazão

A vazão foi tratada como uma resposta pontual no exutório da bacia, visto que, em tal bacia, não existem pluviômetros suficientes para tratar a modelagem hidrológica de forma distribuída. Assim, para determinar como a ocupação antrópica influenciou o comportamento da vazão, utilizou-se o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT. A sensibilidade dessa variável foi aferida para um período de 5 anos em cada cenário histórico de cobertura da terra da bacia empregado no estudo.

O modelo teve como entrada: modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC); solos; uso/manejo do solo; delimitação da bacia hidrográfica; e dados climáticos.

O modelo digital da bacia hidrográfica do rio Machadinho foi gerado através de imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) com resolução de 30 m na versão 2, disponíveis no sítio da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), sendo que as imagens são do ano de 2011.

O SWAT requer uma série de dados acerca das características físicas dos solos e cobertura da terra para poder realizar as simulações hidrológicas. Dessa forma, parâmetros que descrevem o solo da região foram obtidos nos estudos de ZSEE (2007) e Baldissera (2005). Já a descrição da cobertura terrestre utilizou as mesmas imagens construídas para verificar a cobertura da terra da bacia.

O delineamento da área na bacia do rio Machadinho foi realizado mediante o correspondente MDEHC para a divisão das suas sub-bacias. Procedeu-se automaticamente pelo acionamento do modelo SWAT nos pontos de confluência de linha de água, que delimitam, então, as sub-bacias a partir do MDEHC e da malha hidrográfica. Esse procedimento gerou um total de 31 unidades de resposta hidrológica (*hydrologic response units* - HRU).

Segundo a mesma diretriz, os dados climatológicos foram obtidos para o período temporal analisado. Para aplicação do modelo SWAT, como expresso anteriormente, são necessários dados climatológicos diários e mensais. As séries históricas diárias necessárias são para precipitação



(mm), temperatura máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Tais séries diárias foram obtidas por meio de base de dados semelhantes em termos de sua formação e por meio da mesma metodologia utilizada por Vu, Raghava e Liong (2011) na região do Vietnã, por Lu *et al.* (2010) na América do Norte e por Souza (2015) na porção da região amazônica brasileira. Tal metodologia consiste na criação de estações climatológicas virtuais para os dados do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP).

As influências dos sistemas climáticos na vazão produzida face aos cenários de cobertura da terra analisados foram suprimidas, assumindo-se que o comportamento climático seguiu, de forma similar, o padrão de comportamento climático utilizado no procedimento de simulação mediante o qual se calibrou e validou o modelo. Em outras palavras, as condições climáticas impostas nessas simulações foram as mesmas do ano de 1997, sendo tal ano selecionado também por possuir a maior quantidade de dados sem falhas na série histórica da vazão.

Para determinar os parâmetros com vistas à simulação dos cenários, simularam-se, primeiramente, os anos de 1995 a 2000, sendo utilizado, como período de aquecimento do modelo, o ano de 1995, excluindo-o, então, dos passos seguintes de calibração e validação da vazão, que foram executados, respectivamente, para os intervalos de 1996 a 1998 e 1999 a 2000. A série histórica de vazão empregada nesses processos correspondeu à estação de código de cadastro 15575000, operada pela CPRM, com coordenadas de localização  $09^{\circ}20'50''\text{S}$  e  $61^{\circ}56'5''\text{O}$ .

Na calibração e na validação, utilizou-se o código computacional SWAT-CU, utilizando-se, como métricas de avaliação do desempenho, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE). A metodologia de calibração utilizada foi baseada na teoria de otimização por enxame de partículas (PSO) (KENNEDY e EBERHART, 1995). Os parâmetros de busca empregados no procedimento foram de 10.000 simulações com 10 interações cada, sendo de 0,1 o limiar comportamental no qual as soluções são coletadas para construir a incerteza do modelo e de 0,5 o peso no cálculo da velocidade.

## Tendências de precipitação e evapotranspiração

As informações de precipitação e de evapotranspiração foram tratadas como dados contínuos espacialmente distribuídos da bacia hidrográfica. Dessa forma, essas informações tiveram a quantificação da influência nos processos relacionados às mudanças na cobertura da terra da bacia determinada pelas tendências de evolução que essas variáveis sofreram ao longo de suas séries históricas, sendo analisadas por meio do emprego de valores acumulados mensais e agrupados em meses.

Os dados de precipitação utilizados na aplicação dessa metodologia foram obtidos por meio de imagens do produto *Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS), disponibilizado pelo *Climate Hazards Group* (CHG, <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>), e validados para uso na região amazônica pelo trabalho de Correa *et al.* (2017). Tal conjunto de dados abrange uma cobertura espacial quase global, latitudes entre  $50^{\circ}\text{S}$  e  $50^{\circ}\text{N}$ , em formato de acumulado diário e por um período superior a 30 anos (iniciando em 1981), com resolução espacial variando de  $0,25$  a  $0,05^{\circ}$ . O produto utiliza-se de informações do *Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis version 7* (TMPA 3B42 v7) para calibrar estimativas de precipitação obtidos pela técnica *Cold Cloud Duration* (CCD) combinados aos dados de superfície, na escala diária (FUNK *et al.*, 2015; DINKU, 2018). Complementarmente, o CHIRPS incorpora, em sua formulação, uma abordagem inteligente de interpolação de dados com informações de estações pluviométricas in situ para criar séries temporais.

Além disso, outro fator que viabilizou o uso do CHIRPS em vez de outras fontes de geoprocessamento, como imagens *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), ou informações providas do radar meteorológico instalado no estado e operado pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) foi devido ao fato de conter dados de períodos mais antigos do que essas outras fontes citadas. Por exemplo, as imagens TRMM encontram-se disponíveis após o ano de 1999, enquanto os

radares do SIPAM foram instalados em 2003 no estado de Rondônia, cobrindo uma área máxima de varredura de até 400 km de raio, o que não compreende todo o território do estado.

Os dados de evapotranspiração foram obtidos pelo *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop), desenvolvido por Senay *et al.* (2013). Essa série de dados geoespaciais, que comporta o período de 2002 a 2017, apresentou boa precisão na determinação da evapotranspiração real nos locais testados globalmente (SENAY *et al.*, 2007) e especificamente para a região amazônica, em que o estudo de Senay *et al.* (2014) encontrou uma boa relação com dados medidos.

As alterações estatisticamente significativas nas tendências temporais nas séries históricas de chuvas e evapotranspiração na bacia foram determinadas utilizando-se o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), o qual é um método robusto, sequencial e não paramétrico, não requerendo, assim, a distribuição normal dos dados. Tal método é pouco influenciado por mudanças abruptas ou séries não homogêneas, mas exige que os dados sejam independentes e aleatórios (NEETI e EASTMAN, 2011).

Na aplicação do teste Mann-Kendall, primeiramente, estabeleceu-se a hipótese nula (H0), de que não existia tendência nas séries de dados, adotando-se um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05. Assim, a variável estatística S (Equação 1), para uma série de n dados do teste de Mann-Kendall foi calculada a partir da somatória dos sinais (sn) (Equação 2) da diferença, par a par, de todos valores da série (xi) em relação aos valores que a eles são futuros (xj).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sn(x_j - x_i) \tag{1}$$

$$sn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & se \ x_j > x_i \\ 0; & se \ x_j = x_i \\ -1; & se \ x_j < x_i \end{cases} \tag{2}$$

Se  $n \geq 10$ , a variável S tende a normalidade. Assim, sua variância, Var(S), pode ser obtida através da Equação 3

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \tag{3}$$

Em que:  $t_i$  representa a quantidade de repetições de uma extensão i

Posteriormente, para a realização do teste, determinou-se o índice ZMK (Equação 4), esse índice, por seguir uma distribuição normal de média igual a zero, caso apresente valores positivos, denotará uma tendência crescente, enquanto, caso apresente valores negativos, identificará tendências decrescentes.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}; & para \ S > 0 \\ 0; & para \ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & para \ S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

Assim, dado o alfa escolhido de 0,05 e por se tratar de um teste bicaudal, para rejeitar a H0 e indicar uma tendência, é preciso que o valor absoluto de ZMK seja maior que 1,96.

## Resultados e discussão

### Cobertura da terra da bacia hidrográfica

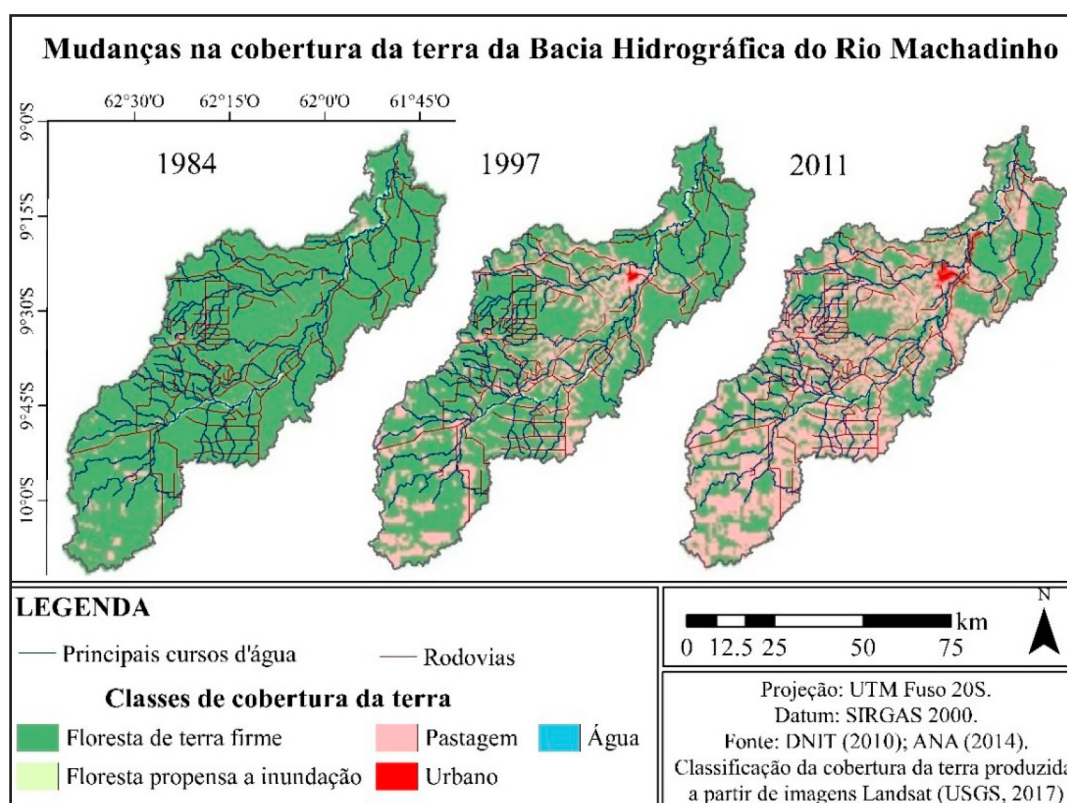
O mapeamento da cobertura da terra da bacia do rio Machadoinho utilizando imagens Landsat5 apresentou os seguintes índices Kappa: 0,981 para o ano de 2011, 0,992 para 1997 e 0,989 em 1984. Tal resultado indica que a classificação obtida foi de 98% a 99%, melhor do que seria um resultado originado através de uma atribuição aleatória dos *pixels*. Como evidencia Lillesand *et al.* (2004), o índice Kappa é uma medida de concordância entre as amostras da cena e aquelas derivadas através da classificação da imagem de sensoriamento remoto, que leva em conta os elementos da matriz de erros e exclui a concordância que ocorre por acaso.

Segundo Lands e Koch (1977), a qualidade dos produtos, avaliada pelo índice Kappa, pode ser considerada boa (40-60%), muito boa (60-80%) e excelente (80-100%). Portanto, para o presente estudo, os mapas de cobertura da terra encontram-se enquadrados na categoria de qualidade excelente.

Na Figura 2, é apresentada a evolução histórica da cobertura da terra gerada a partir da classificação supervisionada de imagens Landsat5 datadas de 1984, 1997 e 2011, em que foram estabelecidas as seguintes classes: (1) área urbana; (2) água; (3) pastagem; (4) floresta de terra firme; e (5) floresta propensa a inundação.

**Figura 2 – Mudanças na cobertura da terra da bacia do rio Machadoinho.**

Figure 2 – Land cover change of the Machadoinho river basin.



Fonte: Autores (2019)

Na Tabela 2, está apresentada a ocorrência das classes de cobertura da terra em porcentagem da área da bacia. Verificam-se, na bacia, três categorias distintas de antropização, sendo essas dadas por: minimamente impactada no ano de 1984; mediamente impactada do ano de 1997; e intensamente impactada do ano de 2011.

**Tabela 2 – Proporção das classes cobertura da terra da bacia do rio Machado no nos anos de 1984, 1997 e 2011.**

Table 2 – Proportion of land cover classes of the Machado river basin in the years 1984, 1997 and 2011.

Classe de cobertura da terra	Área (%)		
	1984	1997	2011
Área urbana	0,00	0,11	0,67
Pastagem	2,60	22,00	45,89
Água	0,25	0,14	0,11
Floresta de terra firme	96,07	76,79	52,36
Floresta propensa à inundação	1,06	0,956	0,95

Ao longo da série histórica analisada, nota-se que a bacia hidrográfica sofreu intensas modificações. Para o ano de 1984, observou-se uma escassa ocupação humana na área, devido ao início da implantação dos projetos de assentamento na região. Nessa ocasião, a proporção de áreas naturais sobrepujava, em grandes dimensões, as que sofreram modificações humanas, sendo possível considerar que praticamente inexissem interferências nos processos hidrológicos dada a escala de ocupação quase nula nesse ano.

O ano de 1997, no entanto, presenciou um aumento em aproximadamente 746% nas áreas de pastagem em relação aos 13 anos anteriores, o que determinou a sua presença com percentual de 22% da área total da bacia. A área urbana também sofreu um aumento expressivo de 41% em contraste com 1984, todavia sua área de predominância na bacia significou menos que 1%, mostrando, assim, que a ocupação desse território se deu principalmente movido pelos processos da pecuária.

Dos anos analisados, 2011 constituiu-se como o mais crítico em relação à interferência humana na área da bacia do rio Machado. O aporte de pastagem e área urbana constituíram, respectivamente, um quantitativo próximo de 46 % e de 0,7 % da área da localidade, sendo esses percentuais bem superiores em relação aos obtidos para os demais anos analisados. A vegetação sofreu, nesse período, uma redução para pouco mais de 50 % da área total da bacia. Assim, em relação aos anos de 1984 e 1997, as modificações na produção de vazão e sedimentos na bacia atingiram, em 2011, o ápice face aos cenários aqui analisados.

Através da análise dos dados de cobertura da terra, é possível observar que a maior porcentagem de supressão da vegetação natural deu-se nas florestas de terra firme, as quais são compostas por vegetações sem incidências de alagamento em qualquer período anual, formadas basicamente por floresta ombrófila aberta das terras baixas e floresta ombrófila densa submontana. Por outro lado, a vegetação propensa à inundação, que sofreu uma menor conversão em pastagem, é constituída pela floresta ombrófila aberta aluvial.

A classe área urbanizada ocorre em uma pequena parte da bacia, correspondendo ao perímetro urbano do município de Machado do Oeste. Essa classe é pouco representativa, como dito anteriormente, mas vem apresentando um crescimento acentuado com o passar dos anos. Esse fato pode ser atribuído ao crescimento populacional, pois, conforme dados do IBGE



(2014), no início de sua criação, o núcleo urbano desse município compunha um quantitativo de 2.934 indivíduos quando era apenas um assentamento; já em 1996, depois de 8 anos de sua elevação para a categoria de município, esse número era de 27.642 habitantes, e, no ano de 2010, o total era de 31.135 pessoas, o que denota, assim, a mudança de parte da população rural para áreas urbanas, visto que o crescimento de área urbana construída superou a proporção de acréscimo populacional em todo o território do município.

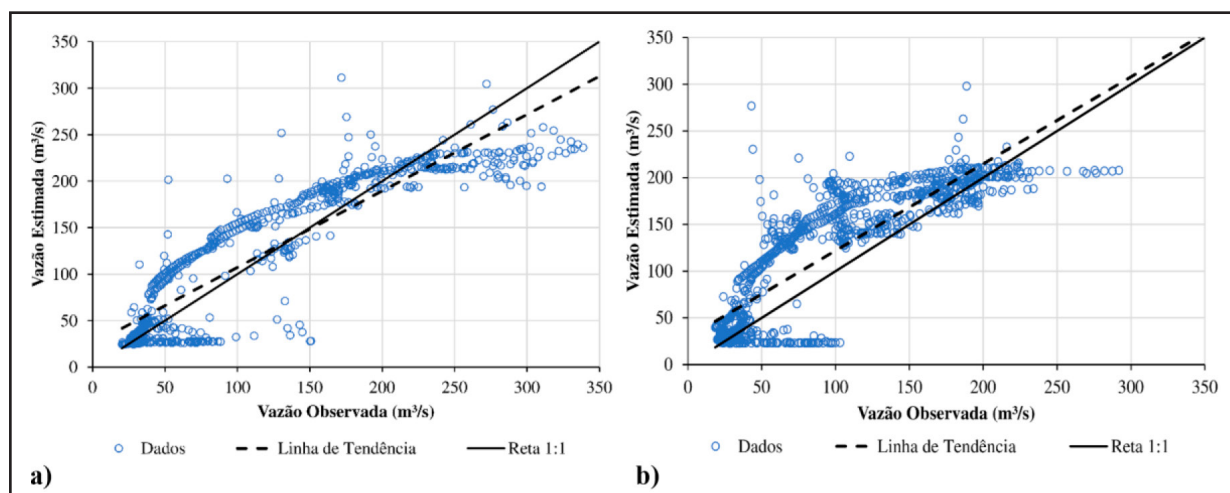
O fator de classe antropogênico de maior magnitude, a pastagem, apresentou, ao longo dos anos, um crescimento desordenado, no qual não se respeitaram os corpos de água, como indicado na Figura 2, com exceção da foz da bacia, que mostrou poucas mudanças, tendo a permanência de grande parte da mata original registrada até o ano mais recente analisado nesta pesquisa.

## Vazão

Os resultados da calibração e da validação da modelagem da vazão podem ser visualizados no diagrama de dispersão dos dados na Figura 3.

**Figura 3 – Diagrama de dispersão dos dados de vazão: a) após a calibração; b) após a validação.**

Figure 3 – Dispersion diagram of streamflow data: a) after calibration; b) after validation.



Fonte: Autores (2019)

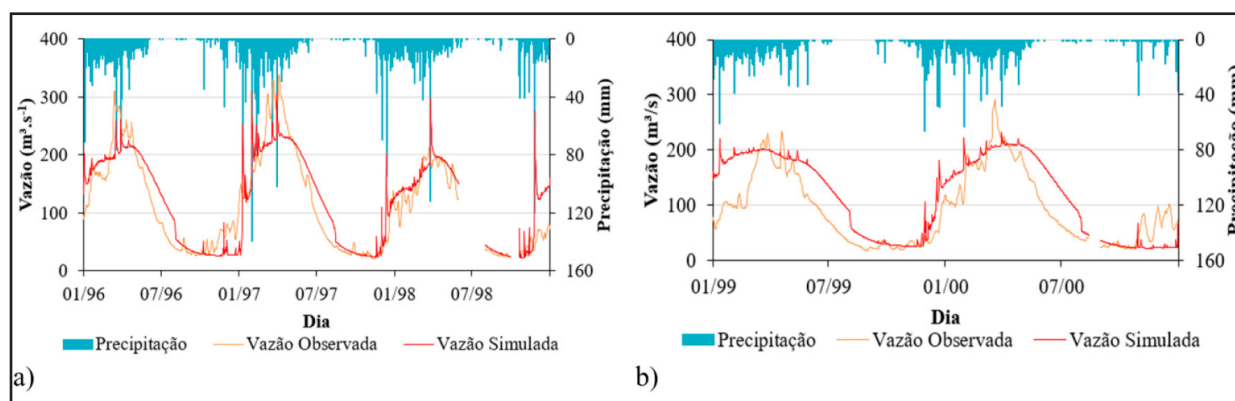
O  $r^2$  da calibração de vazão foi de 0,8077 e o COE de 0,8055, valores bem acima do que estipula Green e Van Griensven (2008) para que a simulação pelo SWAT seja considerada satisfatória. Como o COE apresentou-se maior que 0,75, o desempenho foi enquadrado no grupo de muito boa representatividade do modelo segundo os intervalos de classificação estabelecidos por Krysanova et al. (1998). Destaca-se, ainda, que, nesse ajustamento, conseguiu-se que mais de 80% da variabilidade dos dados estimados pelo SWAT fossem explicados pelos dados medidos.

Na Figura 4, estão os comportamentos da vazão simulada e da vazão observada conjuntamente com a chuva na bacia hidrográfica do rio Machadinho. Como se pode notar, o modelo produziu uma transição mais suave aos eventos máximos e mínimos do que os dados observados, sendo que os picos mais acentuados foram gerados de forma quase instantânea com os eventos pluviométricos mais elevados, evidenciando, assim, que não houve atrasos da transformação de lâmina de água precipitada em vazão. O modelo SWAT, em boa parte, conseguiu prever, após a calibração, os eventos mínimos, pois essas estimativas são praticamente iguais

aos dados reais. Portanto, o modelo SWAT foi mais assertivo e robusto na ausência de fenômenos de precipitação extrema. Dessa forma, o modelo pode ser melhor utilizado para casos em que a vazão seja produzida por chuvas médias de maior tempo de recorrência.

**Figura 4 – Vazão medida e vazão simulada pelo SWAT: a) após a calibração; b) após a validação.**

Figure 4 – Measured streamflow and simulated streamflow by SWAT: a) after calibration; b) after validation.



Fonte: Autores (2019)

No processo de validação, os coeficientes  $r^2$  e COE apresentaram, respectivamente, os valores de 0,722 e 0,544, magnitudes menores do que o processo de calibração. Por outro lado, esses indicadores confirmaram uma modelagem eficiente e satisfatória (KRYSSANOVA *et al.*, 1998; GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008).

Essa boa relação dos dados simulados com os dados calibrados pode ser percebida, também, na Figura 3, na qual a linha de tendência desses dados indica inclinação muito próxima do comportamento ideal que seria a forma linear 1:1.

O comportamento da vazão simulada novamente seguiu a mesma característica do processo de calibração, ou seja, transição mais suave com menores picos do que os dados reais e respostas mais rápidas a eventos de chuva extrema. Todavia, essa piora constatada na relação dos dados medidos em contraste com os simulados pode ser devida aos declínios nos valores dos picos, que foram muito menos acentuados na validação do que na calibração, indicando que, embora o modelo forneça boa representatividade, o mesmo não consegue descrever totalmente a realidade da região.

Na Figura 5, encontram-se os hidrogramas acumulados dos dados observados e das simulações dos cenários de cobertura da terra dos anos de 1984, 1997 e 2011, valendo frisar que todos os cenários possuíam as mesmas condições climáticas.

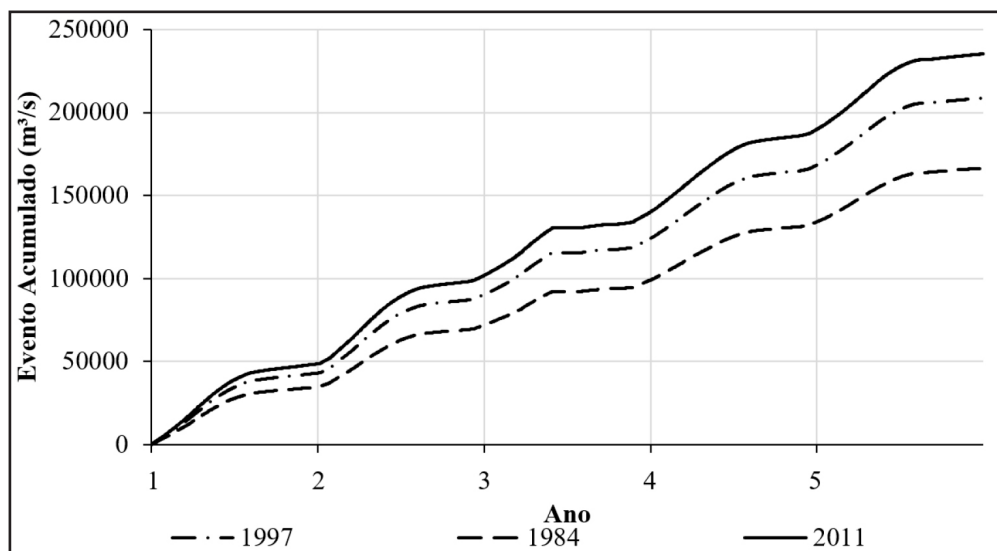
Como se observa na Figura 5, a cobertura da terra é um fator de suma importância na produção de vazão, visto que uma bacia mais próxima do seu estado natural, como no ano de 1984, possuiu um hidrograma menos acentuado que os demais, ou seja, a grande presença de floresta fez com que a vazão fosse reduzida, o que aumenta, assim, a infiltração no solo. Por outro lado, quando a floresta é removida, nota-se a ocorrência da elevação no escoamento, sendo tal aumento diretamente proporcional à taxa de conversão de matas nativas em áreas antropogênicas.

Fato idêntico a esse foi observado no trabalho de Linhares (2005), na bacia do rio Ji-Paraná, do qual a área de estudo faz parte. A autora constatou que a resposta hidrológica e as taxas de incremento de deflúvio mostraram-se associadas à dinâmica das taxas de desflorestamento anuais na bacia do rio Ji-Paraná, indicando que a remoção da floresta gera uma resposta rápida nos valores de escoamento superficial e lateral devido à diminuição dos processos de interceptação e

de infiltração após a remoção da floresta.

**Figura 5 – Hidrogramas acumulados para os cenários simulados.**

Figure 5 – Cumulative hydrograms for the simulated scenarios.



Fonte: Autores (2019)

Pode-se abstrair, ainda, que as mudanças na cobertura da terra da bacia do rio Machinho não representam características sustentáveis, logo a bacia reage com uma maior produção de vazão. Tal afirmativa é sumamente preocupante, pois o aumento exacerbado nas taxas de vazão poderá gerar enchentes, trazendo riscos a populações urbanas e rurais do entorno dos corpos hídricos.

Vale ressaltar que a alta sensibilidade de mudanças de vazão e de sedimentos em relação à configuração de cobertura da terra na bacia estudada, por meio do modelo SWAT, pode ter sido influenciada pelo seu tamanho. Há conjecturas de que a hidrologia local pode ser influenciada por fenômenos em escalas maiores. Apesar disso, encontra-se a discussão levantada por Arancibia (2013), que relata que bacias com área menor do que 500 km<sup>2</sup> sofrem impactos hidrológicos pelo uso da terra, com fácil detecção. Na mesoescala, que abrange bacias entre 500 e 10.000 km<sup>2</sup>, os impactos são, por vezes, detectados. Por outro lado, em escalas maiores do que 10.000 km<sup>2</sup>, não existiria significativa influência de mudanças na cobertura e uso do solo no comportamento hidrológico das correspondentes bacias.

No caso das grandes bacias na Amazônia, Rodriguez, Tomasella e Linhares (2010) comentam que impactos hidrológicos provenientes da mudança da cobertura da terra possuem um maior tempo de defasagem em bacias com maiores áreas, tornando-se assim de difícil detecção. Essa constatação sugere que a relação de mudança do solo com impactos possui comportamento não linear com o tempo. Logo, ao se suprimir parte da vegetação e convertê-la em outro tipo de cobertura de terra, o ciclo hidrológico dessa região poderá ser afetado somente anos após essas ações.

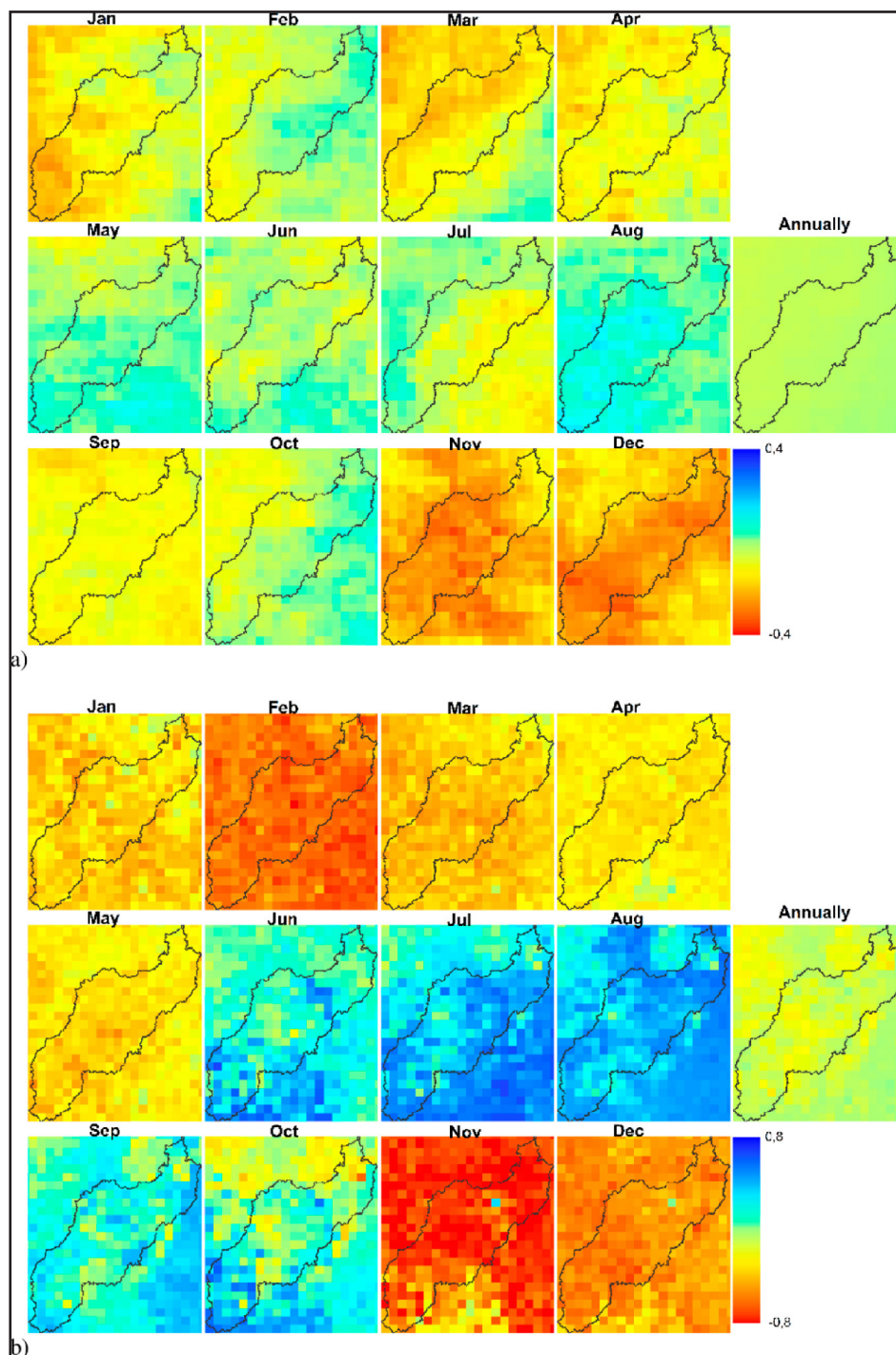
## Precipitação e evapotranspiração

As tendências das magnitudes dos acumulados mensais da precipitação e da evapotranspiração, obtidos através do teste Mann-Kendal no nível de confiança de 95%, estão na Figura 6. Na imagem, as intensidades mais próximas do azul indicam uma alta tendência positiva, ou seja, crescimento do fenômeno no período observado, enquanto o tom avermelhado

denota que se observou uma redução na magnitude.

**Figura 6 – Análise de tendência para a bacia do rio Machado.**

Figure 6 – Trend analysis for the Machado river basin.



Fonte: Autores (2019)

a) precipitação no período de 1981 a 2017; b) evapotranspiração no período 2002 a 2017.

a) rainfall in the period from 1981 to 2017; b) evapotranspiration in the period from 2002 to 2017.



A precipitação na bacia teve sua tendência variando no intervalo de -0,4 a 0,4 entre o período de 1981 a 2017. Logo, observaram-se zonas com redução e aumento de 40% nos acumulados mensais. Estratificando essas análises por mês, verificou-se que os meses de maior intensidade de chuva na região (novembro, dezembro e janeiro) juntamente com os meses de transição da estação chuvosa para seca (março e abril), foram os que tiveram os maiores impactos de redução, principalmente para a área de nascente da bacia, que é um dos locais em que houve maior conversão de floresta em pasto. Mudanças na cobertura da terra modificam o balanço de energia da superfície terrestre. Superfícies florestadas são mais escuras. Assim, possuem maiores taxas de evapotranspiração em comparação com superfícies cobertas por vegetação rasteira. A substituição de áreas de floresta por agricultura/pastagem gera aumento na superfície de solo, redução na área foliar, redução na profundidade do enraizamento e a redução na rugosidade da superfície (SWANN, 2015). A redução da área foliar, bem como de raízes profundas leva a diminuição da evapotranspiração e, necessariamente, a um aumento no fluxo de calor sensível, fatores que contribuem para o aquecimento da superfície e reduções na precipitação (SWANN, 2015).

Em relação à evapotranspiração, verificou-se que o intervalo de tendência foi de -0,8 a 0,8 entre os anos de 2002 a 2017. Essas maiores intensidades no que tange à precipitação, deveu-se à quantidade de anos analisados ser menor e coincidir com o período em que se presenciaram as maiores mudanças no solo e, conseqüentemente, a maiores reduções de florestas, pois, como é notado na análise de cobertura da terra para a bacia, a maior taxa de retirada de floresta deu-se de 1997 a 2011. Nessa série histórica, observa-se um *pixel* discrepante, que possui sua localização na zona urbana da cidade, o que pode denotar que a base de dados utilizada possui um sinal de interferência em núcleos urbanos circundados com floresta.

O comportamento da evapotranspiração possui uma divisão em dois períodos, incluindo aumento (junho a outubro) e redução (novembro a maio). Assim, em meses mais secos, caracterizaram-se aumentos da evapotranspiração, enquanto, nos meses mais chuvosos, intensifica-se a redução da variável climática.

Analisando o comportamento hidrológico em conjunto, fica nítido que a supressão da floresta na bacia reduz a presença de chuva, mas intensifica a vazão presente por reduzir a capacidade de infiltração do solo e a evapotranspiração durante esse período mais chuvoso. Todavia os meses mais secos tenderam a ter a quantidade de água disponível na bacia reduzida pela evapotranspiração e, conseqüentemente, no futuro, a quantidade de água ofertada na bacia poderá ser reduzida.

## Conclusão

Diante dos resultados obtidos, observaram-se diversas mudanças na cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Machadinho. Essas alterações ocorreram, principalmente, em áreas caracterizadas como pastagens, que passaram de um quantitativo de 2,6% no ano de 1984 para 45,9% no ano de 2011, sendo a maior conversão observada nas nascentes do corpo hídrico principal.

Confirmou-se que o modelo SWAT pode ser aplicado em bacias da Amazônia Ocidental, servindo como uma ferramenta em decisões futuras de manejo da bacia por órgãos de sistemas gestores no que se refere à produção de vazão, visto que, para o presente estudo, foram obtidos coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) e de determinação ( $r^2$ ) de 0,8055 e 0,8077, respectivamente, na fase de calibração, e de 0,544 e 0,722, respectivamente, na fase de validação do modelo.

Isolando-se a influência dos fatores climáticos nas simulações de configurações históricas de cobertura da terra, verificou-se o impacto das transformações antrópicas nas descargas líquidas da bacia estudada. Observou-se uma relação diretamente proporcional entre o aumento de vazão frente à conversão da mata nativa em pastagem e em meio urbano, dado que o cenário de cobertura da terra do ano de 1984, que possuía cerca de 97% da área formada por florestas, apresentou um hidrograma menos acentuado que os demais anos, que tiveram grandes reduções de floresta. Além disso, em 1984, a produção de sedimentos foi reduzida e suavizada sem gerar grandes picos anuais decorrentes de eventos de precipitação mais extremos.

Verificaram-se tendências de redução da magnitude da chuva no período chuvoso, enquanto a evapotranspiração também tendeu a reduzir nesse período e se intensificar nos períodos mais quentes e secos. Caso continue essa transformação de floresta em pastos e núcleos urbanos na bacia, a bacia terá reduzido o seu quantitativo de água. Dessa forma, pensando-se de uma forma mais global, se todos os contribuintes da bacia amazônica se comportarem da mesma forma, a região poderá, no futuro, presenciar alterações nos padrões de comportamento de variáveis hidrológicas fundamentais, sobretudo com chuvas mais escassas e menor disponibilidade hídrica.

## Agradecimentos

Inicialmente, os autores agradecem a bolsa de estudos concedida ao primeiro autor fornecida pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014, FAPERJ no E\_12/2015 e FAPERJ no E\_22/2016, bem como ao suporte oferecido pelo CNPq por meio do projeto Edital no 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e projetos Edital Universal no 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e no 28/2018 – Processo 435714/2018-0 bem como pelo apoio da CAPES - Código de Financiamento 001.

## Referências

- ARANCIBIA, J. L. P. **Impacts of land use change on dry season flows across the tropics**. 2013. 128f. Tese (Doutorado), Universidade de Londres, Londres, 2013.
- BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 178f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, 2005.
- CORREA, S. W. *et al.* Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 549, p.667–684, 2017.
- DINKU, T. *et al.* Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s.l.], p.1–21, 2018.
- FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, [s.l.], v. 2, n.15, 2015.
- GOMES, F. B. **Modos de ocupação no município de Machadinho D'Oeste /RO e suas relações com equilíbrio natural da paisagem e ajustes morfodinâmicos**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em geografia), Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Porto Velho, 2009.
- GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds, **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v.23, p.422 – 434, 2008.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades por Unidades Federativas**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 20 jun. 2014.
- KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. Londres: Charles Griffin, 234p., 1975.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks**, Nova Iorque: Piscataway, 1948p., 1995.
- KRYSAKOVA, V.; MULLER-WOHLFEIL, D.; BECKER, A. Development and test of spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, [s.l.], v.106, n.2, p.261-289, 1998.

- LANDS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, p. 159-154, 1977.
- Lillesand, T.M. *et al.* **Remote sensing and interpretation**. 5ed. Madison: Wiley, 2004. 763p., 2004.
- LINHARES, C.A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do Rio Ji-paraná/RO**. 2005. 220f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), INPE, São José dos Campos, 2005.
- LU, E. *et al.* *The Relationships between Climatic and Hydrological Changes in the Upper Mississippi River Basin: A SWAT and Multi-GCM Study*, *Journal of Hydrometeor*, [s.l.], v. 11, p. 437-451, 2010.
- MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, [s.l.], v.13, p.245-259. 1945.
- NEETI, N; EASTMAN, J.R. A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance. **Transactions in GIS**, [s.l.], v.15, n.5, p.599-611. 2011.
- PEDLOWSKI, M. A., DALE, V. H., MATRICARDI, E. A. T., SILVA, E. P. Patterns and impacts of deforestation in Rondonia, Brazil. **Landscape and Urban Planning**, [s.l.], v. 38, n. 3-4, p. 149-157, 1997.
- ROBERTS, D. A. *et al.* Large area mapping of land-cover change in Rondônia using multitemporal spectral mixture analysis and decision tree classifiers. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 107, n. 20, p. 40-48, 1997.
- RODRIGUEZ, D. A., TOMASELLA, J., LINHARES, C. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Parana Catchment, **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 24, n. 10, p. 1254-1269, 2010.
- SWANN, A. L. S. . Future deforestation in the Amazon and consequences for South American climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s.l.], v. 214, p. 12-24, 2015.
- SENAY, G.B. *et al.* Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss**, [s.l.], v. 11, p. 723-756, 2014.
- SENAY, G. B. *et al.* A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, [s.l.], v. 7, p. 979-1000, 2007.
- SENAY, G. B. *et al.* Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, [s.l.], v. 49, p. 577- 591, 2013.
- SOUZA, V. A. S. **Avaliação Hidrossedimentológica Com Suporte Do Modelo SWAT Na Amazônia Ocidental – Bacia Do Rio Machado/RO**. 2015. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- SOLER, L. S., VERBURG, P. H.. Combining remote sensing and household level data for regional scale analysis of land cover change in the Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 371-386, 2010.
- VU, M. T.; RAGHAVAN, S. V.; LIONG, S. Y. SWAT use of gridded observations for simulating runoff – a Vietnam river basin study, **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [s.l.], v. 8, n. 6, 2011.
- ZSEE - Rondônia. Governo do Estado, 2007, **Zoneamento Socioeconômico-Ecológico do Estado de Rondônia: Um Instrumento de Gestão Ambiental a Serviço do Desenvolvimento Sustentável de Rondônia**. Porto Velho: SEDAM, 2007.