

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
Centro de Desenvolvimento Tecnológico  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Avaliação dos impactos de cenários de mudanças no uso do solo na  
hidrologia da bacia hidrográfica do rio Xingu**

Zandra Almeida da Cunha

Pelotas, 2021

Zandra Almeida da Cunha

Avaliação dos Impactos de cenários de mudanças no uso do solo na hidrologia da  
bacia hidrográfica do rio Xingu

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do  
Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Carlos Rogério de Mello

Coorientador: Samuel Beskow

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

C972a Cunha, Zandra Almeida da

Avaliação dos impactos de cenários de mudanças no uso do solo na hidrologia da bacia hidrográfica do rio Xingu / Zandra Almeida da Cunha ; Carlos Rogério de Mello, orientador ; Samuel Beskow, coorientador. — Pelotas, 2021.

129 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. LASH. 2. Cerrado. 3. Floresta Amazônica. 4. Desmatamento. I. Mello, Carlos Rogério de, orient. II. Beskow, Samuel, coorient. III. Título.

CDD : 627

Zandra Almeida da Cunha

Avaliação dos Impactos de cenários de mudanças no uso do solo na hidrologia da  
bacia hidrográfica do rio Xingu

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em  
Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal  
de Pelotas.

Data da Defesa: 23 de fevereiro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Samuel Beskow (Coorientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Livia Alves Alvarenga

Doutor em Recursos hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de  
Lavras

Prof. Dr. Jose Alves Junqueira Junior

Doutor em Recursos hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de  
Lavras

## Dedicatória

A minha mãe *Ivanilda Foster Almeida*  
Ao meu pai, *Joel Senécio Gomes da Cunha*  
DEDICO

## Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a *Deus* e a todo o *Povo Espiritual* por toda a proteção e por me permitirem chegar até aqui, com saúde e força.

Aos meus pais, *Ivanilda Foster Almeida* e *Joel Senécio Gomes da Cunha*, pela confiança e apoio nas minhas decisões, e por terem me incentivado a traçar o meu caminho e alcançar meus objetivos, sem perder a minha essência.

À minha casa de religião *C.E.U. Ogum Sete Espadas* e aos meus pais de religião *Mariângela Gill* e *Adriano Gill*, por serem exemplos de pessoas e de profissionais, e por estarem sempre cuidando de mim.

Ao meu orientador *Carlos Rogério de Mello*, por todo conhecimento transmitido, pela disponibilidade e boa vontade em ensinar. Você é um ídolo.

Ao meu co-orientador *Samuel Beskow*, pelos valiosos ensinamentos ao longo de toda minha formação, e pela confiança e amizade.

Aos colegas do *Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas*, pelo companheirismo e apoio. Em especial as minhas queridas amigas *Maíra Moura*, *Marcelle Vargas* e *Tamara Beskow*, pela parceria. A *Maíra* pela amizade sincera e por todo ensinamento, não só sobre hidrologia, mas, principalmente, de valores que levarei para a vida. A *Marcelle* pela forte amizade, companheirismo e apoio de todos os dias, pela constante troca de ideias e, as vezes, de alguns desabafos. A *Tamara*, que desde o início da minha vida acadêmica esteve presente incentivando o melhor que posso ser.

Aos meus amigos desde a época da faculdade, *Henri Viola* e *Diego Ricci*. Obrigada por serem tao ecessenciais e pelo nosso laço nunca romper. Vocês me dão força e alegria.

Ao meu amor, *Douglas Veiga*, pelo carinho, apoio e companherismo. Obrigada por me ensinar outra maneira de enxergar a vida.

Ao *Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos* e à *Universidade Federal de Pelotas*, pela oportunidade.

*“One, remember to look up at the stars and not down  
at your feet. Two, never give up work. Work gives  
you meaning and purpose and life is empty without it.  
Three, if you are lucky enough to find love,  
remember it is there and don't throw it away.”*

*— Stephen Hawking*

## Resumo

CUNHA, Zandra Almeida da. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Xingu**. 2021. 129f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

A bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) possui grande importância no desenvolvimento econômico do Brasil, dada intensificação de atividades agropecuárias na região. Estas atividades ocasionam em crescentes taxas de desmatamento na bacia. Neste sentido, o uso de modelos hidrológicos para avaliar os impactos no comportamento hidrológico por mudanças no uso do solo torna-se uma ferramenta viável para o gerenciamento dos recursos hídricos. Este estudo objetivou avaliar o potencial do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) em representar os principais processos hidrológicos e indicadores hidrológicos na BHRX e, ainda, simular os possíveis impactos hidrológicos frente a diferentes cenários de mudanças no uso do solo no comportamento hidrológico da bacia. Os cenários avaliados abordaram a aumento de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta para áreas de pastagens. Os cenários C3 e C4 compreendem a aumento de 50% e 100% das áreas de floresta para as áreas cultivo de soja. Por fim, o C5 abordou o aumento de 100% das áreas de pastagem para áreas de cultivo de soja. Os resultados obtidos na calibração e validação do modelo LASH permitiram verificar que o desempenho na BHRX foi superior aos outros estudos já realizados com o modelo. Ademais, pôde-se inferir que o desempenho do modelo LASH foi superior ao de outros modelos empregados em bacias hidrográficas da Floresta Amazônica e do Cerrado. Analisando os hidrogramas estimados frente aos observados foi possível observar que o modelo teve bom desempenho da representação das vazões médias diárias e mensais da BHRX. Assim como, o modelo LASH apresentou subestimativa nos valores de vazões mínimas e máximas da BHRX. Quanto aos componentes do balanço hídrico, os resultados indicaram bom desempenho do modelo para a estimativa na BHRX. Ademais, os componentes de maiores participações nas saídas do balanço hídrico na BHRX foram a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) e o armazenamento atual (At). Já os resultados da validação "*Proxy Basin Test*" permitiram inferir que os parâmetros do modelo LASH calibrados no exutório da BHRX foram representativos para a bacia hidrográfica do rio Iriri. Analisando os hidrogramas de cada cenário, pôde-se observar que, de maneira geral, as modificações nos usos do solo na BHRX inferiram no aumento da produção de vazão, principalmente nas vazões de pico. Nos cenários mais críticos, o aumento no escoamento superficial foi de 16,1% no C2 e 18,6% no C4. A estimativa dos componentes do balanço hídrico, indicou que, de maneira geral, os cenários de desmatamento na BHRX resultaram em reduções nas taxas de ET<sub>r</sub>, interceptação e At, em até 4,9%, 11,7% e 21,9%, respectivamente. Foi possível concluir que as taxas de desmatamento atuais têm o potencial de alterar significativamente a magnitude dos componentes do ciclo hidrológico na Floresta Amazônica.

**Palavras-chave:** LASH. Floresta Amazônica. Cerrado. Desmatamento.

## Abstract

CUNHA, Zandra Almeida da. **Hydrological simulation in the Xingu River watershed**. 2021. 129f. Dissertation (Master Degree em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

The Xingu River watershed (XRW) has great importance in the economic development of Brazil, given the intensification of agricultural activities in the region. These activities result in increasing deforestation rates in the basin. In this sense, the use of hydrological models to assess impacts on hydrological behavior due to changes in land use becomes a viable tool for the management of water resources. This study aimed to evaluate the potential of the Lavras Simulation of Hydrology (LASH) model to represent the main hydrological processes and hydrological indicators at XRW and, also, to simulate the possible hydrological impacts in face of different scenarios of land-use changes in the hydrological behavior of the basin. The evaluated scenarios addressed the increase of 50% (C1) and 100% (C2) of the forest areas to pasture areas. Scenarios C3 and C4 comprise an increase of 50% and 100% of forest areas to soybean cultivation areas. Finally, C5 addressed the increase of 100% of pasture areas to soybean cultivation areas. The results obtained in the calibration and validation of the LASH model allowed to verify that the performance in XRW was superior to the other studies already carried out with the model. Furthermore, it was possible to infer that the performance of the LASH model was superior to that of other models used in hydrographic basins of the Amazon Forest and the Cerrado. Analyzing the estimated hydrograms compared to those observed, it was possible to observe that the model performed well in the representation of the average daily and monthly flows of XRW. Likewise, the LASH model underestimated XRW's minimum and maximum flow values. As for the components of the water balance, the results indicated good performance of the model for the estimate in XRW. Furthermore, the components of greater participation in the outputs of the water balance at XRW were real evapotranspiration (ETr) and current storage (At). The results of the "Proxy Basin Test" validation, on the other hand, made it possible to infer that the parameters of the LASH model calibrated in the XRW outlet were representative for the Iriri River watershed. Analyzing the hydrographs of each scenario, it was observed that, in general, the changes in the uses of the soil at XRW led to an increase in flow production, mainly at peak flows. In the most critical scenarios, the increase in runoff was 16.1% in C2 and 18.6% in C4. The estimate of the components of the water balance indicated that, in general, the deforestation scenarios in XRW resulted in reductions in the rates of ETr, interception, and At, in up to 4.9%, 11.7%, and 21.9%, respectively. It was possible to conclude that the current deforestation rates have the potential to significantly change the magnitude of the components of the hydrological cycle in the Amazon.

**Keywords:** LASH. Amazon rainforest. Cerrado. Deforestation.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico em escala global.....	22
Figura 2 - Representação de uma bacia hidrográfica e seus componentes.....	23
Figura 3 - Áreas de aplicação do modelo LASH.....	32
Figura 4 - Municípios da bacia do rio Xingu em que houve desmatamentos nos meses de setembro e outubro de 2020. ....	36
Figura 5 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Xingu no contexto da bacia do rio Amazonas, do Brasil e da América do Sul.....	40
Figura 6 - a) Espacialização das classes de clima que compreendem a bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) de acordo com a classificação de Alvares <i>et al.</i> (2014). b) Mapa de distribuição das precipitações totais anuais médias na BHRX no período de 1995 a 2019, elaborado com base nos dados provenientes das estações de monitoramento pluviométrico da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico. ....	41
Figura 7 - Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC) da bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX).....	48
Figura 8 - a) Direções de fluxo obtidas para a bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX); b) acúmulos de fluxos obtidos para a BHRX; c) hidrografia gerada a partir do limiar de drenagem estabelecido para a BHRX; d) sub-bacias hidrográficas delimitadas para modelagem hidrológica na BHRX. ....	50
Figura 9 – Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX), adaptado de IBGE (2012).....	54
Figura 10 – a) Mapa da espacialização dos biomas que compreendem a BHRX, elaborado a partir das informações disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). b) Mapa da espacialização das classes de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX), extraídas do projeto Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias);.....	56
Figura 11 - Localização das estações de monitoramento hidrológico empregadas neste estudo. Ademais, localização da bacia do rio Iriri (BHRI) com exutório na estação Porto de Moz (18700000).....	60

Figura 12 - Polígonos de Thiessen delimitados para computar as áreas de influência das estações a) pluviométricas e b) meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	63
Figura 13 - Representação das sub-bacias hidrográficas e dos trechos de cursos d'água na bacia hidrográfica do rio Xingu obtidas a partir do pacote hidrológico HEC-GeoHMS.....	64
Figura 14 - Cenários de mudanças no uso do solo construídos para simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu.....	71
Figura 15 - Hidrograma estimado na calibração e validação do modelo LASH na bacia hidrográfica do rio Xingu considerando um valor baixo do parâmetro $C_{ss}$ (igual a 71,76), demonstrando o retardo na ocorrência das vazões mínimas causadas pelo baixo valor.....	77
Figura 16 - Perfis transversais dos anos 1998, 2000, 2001, 2003 e 2005 do exutório da (a) bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) e da (b) bacia hidrográfica do rio Iriri (BHRI).Os perfis transversais dos exutórios de ambas sub-bacias foram construídos com base nos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. ....	80
Figura 17 - Desempenho do modelo LASH na estimativa das vazões médias diárias na bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) frente a diferentes estudos nas bacias hidrográficas do rio Aiuruoca (BHRA), rio Lontra (BHRL), rio Grande (BHRG), rio Sapucaí (BHRS), rio Verde (BHRV), arroio Pelotas (BHAP), arroio Fragata (BHAF) e rio Piratini (BHRP), a partir das estatísticas $C_{NS}$ e $C_{NSlog(Q)}$ , considerando discretização semi-distribuída. ....	82
Figura 18 - Hidrogramas diários observados ( $Q_{obs}$ ) e estimados ( $Q_{sim}$ ) pelo modelo LASH e precipitação média observada ( $P_M$ ) para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	85
Figura 19 - Hidrogramas mensais observados ( $Q_{obs}$ ) e estimados ( $Q_{sim}$ ) pelo modelo LASH e precipitação total mensal observada ( $P_M$ ) para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	86
Figura 20 - Valores das vazões: (a) máximas anuais observadas ( $Q_{m\acute{a}x\_obs}$ ) e estimadas ( $Q_{m\acute{a}x\_sim}$ ) e (b) vazões mínimas anuais observadas ( $Q_{m\acute{a}n\_obs}$ ) e estimadas ( $Q_{m\acute{a}n\_sim}$ ) no modelo LASH para a bacia hidrográfica do rio Xingu.....	88

Figura 21 - Curvas de permanência observada e estimada pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	89
Figura 22 - Valores médios mensais estimados pelo modelo LASH entre os anos de 1996 a 2005 para os componentes do ciclo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Xingu. Armazenamento de água no solo (At), interceptação (I <sub>t</sub> ), evapotranspiração (ET) e deflúvio (D). ....	92
Figura 23 - Hidrogramas observados (Q <sub>obs</sub> ) e simulados (Q <sub>sim</sub> ) pelo modelo LASH e precipitação média observada (PM) para os períodos de validação do modelo LASH na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Iriri (BHRI), considerando o passo de tempo (a) diário e (b) mensal. ....	94
Figura 24 - Curvas de permanência observada e estimada pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri. ....	96
Figura 25 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catual) em comparação com (a) cenário 1 (C1) e (b) cenário 2 (C2) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	98
Figura 26 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catual) em comparação com (a) cenário 3 (C3) e (b) cenário 4 (C4) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	99
Figura 27 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catual) em comparação com o cenário 5 (C5) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	100
Figura 28 - Curvas de permanência simuladas pelo modelo LASH para os cenários de mudança no uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu: a) cenários de mudanças de 50% (C1) e 100% (C2) da floresta nativa para pastagem; b) cenários de mudanças de 50% (C1) e 100% (C2) da floresta nativa para cultivo de soja; e c) cenário de mudança de 100% das áreas de pastagem para cultivo de soja (C5). ....	101
Figura 29 - Evapotranspiração (Et) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	105

Figura 30 – Interceptação ( $I_t$ ) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu. .... 106

Figura 31 – Armazenamento de água no solo ( $A_t$ ) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu. .... 108

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características das sub-bacias hidrográficas delimitadas para a modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: área (A), latitude do centroide, altitude média da bacia, comprimento do curso d'água principal (L) e o tempo de concentração da bacia (Tc) calculado pela equação de Giandotti (1940). 51	
Tabela 2 - Valores adotados de profundidade, umidade do ponto de saturação ( $\theta_s$ ) e umidade do ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) para cada classe do solo da bacia do rio Xingu, bem como, suas referências. ....55	55
Tabela 3 - Valores das informações de albedo, altura, índice de área foliar, resistência estomática e profundidade do sistema radicular de cada classe do uso do solo requeridas pelo modelo LASH, bem como, suas referências.....56	56
Tabela 4 - Informações das estações fluviométricas empregadas no estudo. ....60	60
Tabela 5 - Informações das estações pluviométricas e meteorológicas empregadas neste estudo.....61	61
Tabela 6 - Informações computadas para entrada no módulo de propagação de cheias para a bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: ordem de ocorrência dos trechos considerada para processamento no modelo LASH (ID); número do curso d'água analisado (TRECHO); comprimento do trecho ( $X_L$ ); largura do trecho (B); declividade do trecho ( $S_0$ ); bacias que drenam para o no trecho analisado ( $SB_1$ e $SB_2$ ) e trechos que drenam para o trecho analisado ( $T_1$ e $T_2$ ). ....65	65
Tabela 7 - Parâmetros de calibração do modelo LASH e intervalo de calibração considerado para modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu. ....66	66
Tabela 8 - Áreas de ocupação de cada classe de uso do solo equivalente a cada cenário construído para simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu. ..69	69
Tabela 9 - Parâmetros do modelo LASH calibrados para a bacia hidrográfica do rio Xingu à montante do exutório "Altamira". ....72	72
Tabela 10 - Valores do coeficiente de abstração inicial da chuva ( $\lambda$ ) calibrados para diferentes bacias hidrográficas utilizando o modelo LASH.....73	73
Tabela 11 - Valores dos parâmetros de condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ( $K_{SS}$ ) e subterrâneo ( $K_B$ ) calibrados para diferentes bacias hidrográficas utilizando o modelo LASH. ....75	75

Tabela 12 - Valores do parâmetro $C_B$ determinados a partir do hidrograma observado no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	78
Tabela 13 - Valores obtidos para as estatísticas de desempenho Coeficiente de Nash e Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e sua versão logaritmizada ( $C_{NSlog(Q)}$ ) e o coeficiente $P_{bias}$ considerando vazões diárias e mensais.....	81
Tabela 14 - Vazões de referência extraídos das curvas de permanência e seus respectivos valores de vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	89
Tabela 15 - Contribuição dos componentes do balanço hídrico mensal médio estimado pelo LASH para os períodos chuvoso e seco na bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: armazenamento de água no solo médio ( $A_t$ ), evapotranspiração real média (ET), interceptação média ( $I_t$ ), deflúvio médio (D) e vazão média (Q).....	90
Tabela 16 - Valores obtidos para as estatísticas de desempenho Coeficiente de Nash e Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e sua versão logaritmizada ( $C_{NSlog(Q)}$ ) e o coeficiente $P_{bias}$ para a validação do modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri considerando os passos de tempo diário e mensal. ....	93
Tabela 17 - Vazões de referência extraídos das curvas de permanência e seus respectivos valores de vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri. ....	96
Tabela 18 - Vazões de referência extraídos das curvas de permanência simuladas para o cenário atual e os cenários de mudanças no uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	102
Tabela 19 - Valores médios anuais de chuva, evapotranspiração ( $E_t$ ), interceptação ( $I_t$ ), armazenamento atual ( $A_t$ ), deflúvio superficial ( $D_{sup}$ ) e deflúvio de base ( $D_{base}$ ) computados para o cenário atual ( $C_{atual}$ ) e para os cinco cenários de mudanças no uso do solo na bacia hidrográfica do rio Xingu. ....	103

## Sumário

1	Introdução .....	17
2	Objetivos .....	20
2.1	Geral .....	20
2.2	Específicos .....	20
3	Revisão de Literatura .....	21
3.1	Hidrologia em bacias hidrográficas .....	21
3.2	Caracterização dos biomas Floresta Amazônica e Cerrado .....	25
3.2.1	Floresta Amazônica.....	25
3.2.2	Cerrado .....	27
3.3	Modelagem hidrológica.....	28
3.4	Modelo hidrológico <i>Lavras Simulation of Hydrology</i> (LASH).....	31
3.5	Impactos de alterações do uso do solo sobre o regime hidrológico .....	35
4	Metodologia.....	39
4.1	Descrição da área de estudo .....	39
4.2	Descrição do Modelo <i>Lavras Simulation of Hydrology</i> (LASH) .....	41
4.3	Base de dados espaciais utilizada na modelagem hidrológica .....	47
4.4	Base de dados temporais utilizada na modelagem hidrológica .....	59
4.5	Base de dados utilizada no módulo de propagação de cheias .....	63
4.6	Calibração e validação do modelo LASH.....	66
4.7	Construção e simulação dos cenários de mudanças no uso do solo .....	68
5	Resultados e discussão .....	72
5.1	Calibração do modelo LASH para a BHRX.....	72
5.2	Análise das estatísticas de desempenho do modelo LASH.....	81
5.3	Análise com base nos hidrogramas e nos indicadores de vazões.....	84
5.4	Estimativa de componentes do ciclo hidrológico pelo modelo LASH para a BHRX .....	90
5.5	Validação “ <i>Proxy basin test</i> ” .....	93
5.6	Simulação hidrológica dos cenários de mudanças no uso do solo .....	97
6	Conclusão .....	112
	Referências .....	114

## 1 Introdução

A água é um recurso de valor inestimável pois garante a sobrevivência e manutenção da vida no planeta (WWAP, 2003) e age como insumo fundamental para o desenvolvimento econômico. Desta forma, o conhecimento do comportamento espacial e temporal das variáveis do ciclo hidrológico é indispensável no gerenciamento dos recursos hídricos (GOMES; BLANCO; PESSOA, 2019). De acordo com Mello *et al.* (2008), inúmeros são os fatores que influenciam na hidrologia de bacias hidrográficas.

O Brasil é um país conhecido pela sua grande abundância de água doce. Neste sentido, o cenário brasileiro tem como principal fator a utilização dos recursos hídricos como insumo para geração de energia elétrica. De acordo com Guerrero *et al.* (2020), cerca de 70% da energia elétrica do país é produzida por usinas hidrelétricas. Portanto, a compreensão do comportamento hidrológico, bem como, a predição do regime hidrológico nas bacias hidrográficas brasileiras são pontos relevantes para o planejamento energético do país.

Dentre os principais mananciais brasileiros, destaca-se o rio Xingu, que tem sua nascente no norte do estado de Mato Grosso e possui mais de 2.300km de extensão (SANCHES; VILLAS-BÔAS, 2005), fluindo, em sua maior parte, pela Floresta Amazônica brasileira. De acordo com Sanches e Villas-Bôas (2005), outros importantes mananciais são afluentes do rio Xingu ao longo de toda sua extensão até sua foz, no Rio Amazonas, no estado do Pará, compreendendo uma bacia hidrográfica com área de drenagem de aproximadamente 530.000km<sup>2</sup>. A bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) tem sido importante no contexto econômico no Brasil, visto que possui a maior usina hidrelétrica 100% brasileira, a Usina Hidrelétrica (UHE) de Belo Monte (NORTE ENERGIA S.A., 2020), além da crescente expansão agropecuária.

Ao longo da BHRX, diversas são os tipos de vegetação, tais como aquelas existentes no bioma Cerrado, no bioma Floresta Amazônica, assim como a vegetação presente na transição entre estes dois biomas. Contudo, o crescente aumento das atividades agropecuárias na região tem levado a um aumento do desmatamento, especialmente junto às principais nascentes da bacia (SANCHES; BOAS, 2005; TEIXEIRA; SOARES-FILHO, 2009; PANDAY *et al.*, 2015).

As atividades antrópicas têm resultado em grandes extensões de áreas de desmatamento. Segundo Guerrero *et al.* (2020), as atividades antrópicas, principalmente relacionadas às atividades agrícolas, são o principal motor das mudanças no uso e cobertura do solo, afetando substancialmente 75% da superfície da Terra. Com isso, é crescente a perda associada à biodiversidade, disponibilidade de água, ciclagem de nutrientes e regulação climática no planeta (CRUZ *et al.*, 2020). Na região da Floresta Amazônica brasileira, a conversão das florestas para áreas de pastagem e cultivo, para abertura de estradas e a extração de madeira e minérios, são as principais causas de desmatamento (ABE *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2020).

De acordo com os dados apontados pelo DETER (INPE, 2020), uma ferramenta que visa identificar os focos de desmatamento e queimada da Floresta Amazônica Legal, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), as áreas desmatadas na BHRX correspondem à quase metade dos alertas de desmatamento registrados no estado do Pará no período de agosto de 2019 a abril de 2020. O Sistema de indicação de desmatamento na bacia do Xingu (Sirad X) mostrou que, entre os meses de março e abril de 2020, uma área de 208,59km<sup>2</sup> foi desmatada, sendo 64% no estado do Pará e 36% no estado do Mato Grosso (XINGU+, 2020). Em maio e junho de 2020, foram desmatados 328,34km<sup>2</sup>, um crescimento de 57% em relação aos dois meses anteriores (XINGU+, 2020). Já nos meses de julho e agosto de 2020, de acordo com o Boletim nº 20 disponibilizado pelo Sirad X, mais de 360km<sup>2</sup> foram desmatados na bacia do Xingu mantendo o ritmo de alta. Desta porção, 88% do desmatamento da bacia se concentrou no território paraense (XINGU+, 2020). Por fim, a maior taxa de desmatamento já mapeada desde o início do funcionamento do Sirad X ocorreu nos meses de setembro e outubro de 2020, onde mais de 468km<sup>2</sup> foram desmatados na bacia do rio Xingu (XINGU+, 2020).

De acordo com Oliveira *et al.* (2018), as mudanças no uso e cobertura do solo e a hidrologia das bacias hidrográficas estão diretamente interligadas. Um dos fatores que mais afeta a produção de água em uma bacia é a alteração no uso do solo, podendo afetar positiva ou negativamente (DA SILVA *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2018). Neste sentido, de acordo com Santos *et al.* (2018) e Viola *et al.* (2014), o uso de modelos hidrológicos para avaliar o impacto das mudanças no uso do solo sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas torna-se uma ferramenta estratégica para o gerenciamento de recursos hídricos e tomada de decisões.

Dentre os modelos hidrológicos existentes, o *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) tem se destacado para a finalidade de avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica frente a diferentes cenários de uso do solo. O modelo LASH foi desenvolvido por Viola (2008) e aprimorado Beskow (2009) e Caldeira (2016), possuindo uma abordagem que visa prever o fluxo das bacias hidrográficas utilizando dados de clima, solo, uso do solo e vazão.

Desde seu desenvolvimento, o modelo LASH vem sendo utilizado para análise do comportamento hidrológico frente a mudanças nos usos do solo de bacias hidrográficas em algumas regiões brasileiras. Beskow; Norton; Mello (2013) empregaram o modelo LASH para predição do comportamento hidrológico frente a cenários de mudanças dos usos do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, localizada no sul de Minas Gerais. Posteriormente, Viola *et al.* (2014) aplicaram o modelo LASH na simulação do comportamento de variáveis hidrológicas frente às mudanças de uso do solo nas bacias hidrográficas do rio Aiuruoca, rio Grande, rio Sapucaí e rio Verde, localizadas no estado de Minas Gerais. No entanto, em algumas regiões, como no bioma Floresta Amazônica, as potencialidades do modelo LASH ainda não foram verificadas.

Os estudos empregando o modelo LASH obtiveram resultados consistentes sobre os impactos das mudanças nos usos do solo no comportamento do escoamento e de outros componentes do ciclo hidrológico. Assim, os impactos decorrentes de mudanças no uso do solo na BHRX são relevantes para subsidiar a gestão dos recursos hídricos na bacia, visando a sustentabilidade hidrológica da mesma frente, e esses impactos serão estudados com o modelo hidrológico LASH na sua terceira versão.

## 2 Objetivos

### 2.1 Geral

Este estudo objetiva avaliar o desempenho do modelo LASH de representar os principais componentes hidrológicos na BHRX e, também, de simular os possíveis impactos hidrológicos frente a diferentes cenários de mudanças no uso do solo no comportamento hidrológico da bacia.

### 2.2 Específicos

- Avaliar o desempenho do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* - LASH numa bacia de uma região de transição dos biomas Amazonia e Cerrado (BHRX), realizando a calibração automática e validação do modelo considerando os dados fluviométricos do exutório da bacia.
- Realizar a validação do modelo LASH com parâmetros calibrados no exutório da BHRX em uma sub-bacia da BHRX.
- Avaliar a simulação de componentes hidrológicos, como o deflúvio, a evapotranspiração, a interceptação e o armazenamento atual de água no solo na BHRX.
- Avaliar os impactos na hidrologia resultantes das simulações de diferentes cenários de possíveis mudanças no uso do solo da BHRX.

### 3 Revisão de Literatura

#### 3.1 Hidrologia em bacias hidrográficas

A ciência que objetiva estudar e quantificar os fenômenos do ciclo hidrológico, desde a ocorrência, circulação e distribuição de água no planeta e sua relação com o ambiente é denominada Hidrologia (CHOW, 1964). Em escala global, a aplicação da hidrologia torna-se complexa ao estudar e quantificar os processos do ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é descrito por Collischonn; Dornelles (2015) como o conceito central da hidrologia. Segundo Linsley, Kohler e Paulhus (1975), o ciclo hidrológico compreende o termo utilizado para descrever a circulação geral da água dos oceanos para a atmosfera, para a superfície e novamente para os oceanos. Miranda, Oliveira; Silva (2010) descrevem o ciclo hidrológico como uma sucessão de vários processos na natureza pelos quais a água inicia seu caminho indo de um estágio inicial até retornar à posição primitiva, impulsionado fundamentalmente pela radiação solar, à gravidade e à rotação da Terra. Enquanto que, para Mello; Silva; Beskow (2020) o ciclo hidrológico corresponde à dinâmica da água no meio ambiente em seus diferentes estados físicos (líquido, vapor e sólido) presentes nos diferentes ambientes do globo terrestre, como a atmosfera, oceanos, solos e outros.

Os processos que abrangem o ciclo hidrológico em uma escala global podem ser observados na Figura 1, sendo os principais: precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e escoamento subterrâneo. Na engenharia hidrológica, o ciclo hidrológico é geralmente estudado com maior interesse na fase terrestre (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015), podendo ser analisado em diferentes escalas dependendo dos objetivos técnicos e científicos da análise (MELLO; SILVA; BESKOW 2020). No entanto, geralmente delimita-se uma área de estudo que represente as condições hidrológicas locais ou regionais, compreendida pela bacia hidrográfica (ALMEIDA; SERRA, 2017).

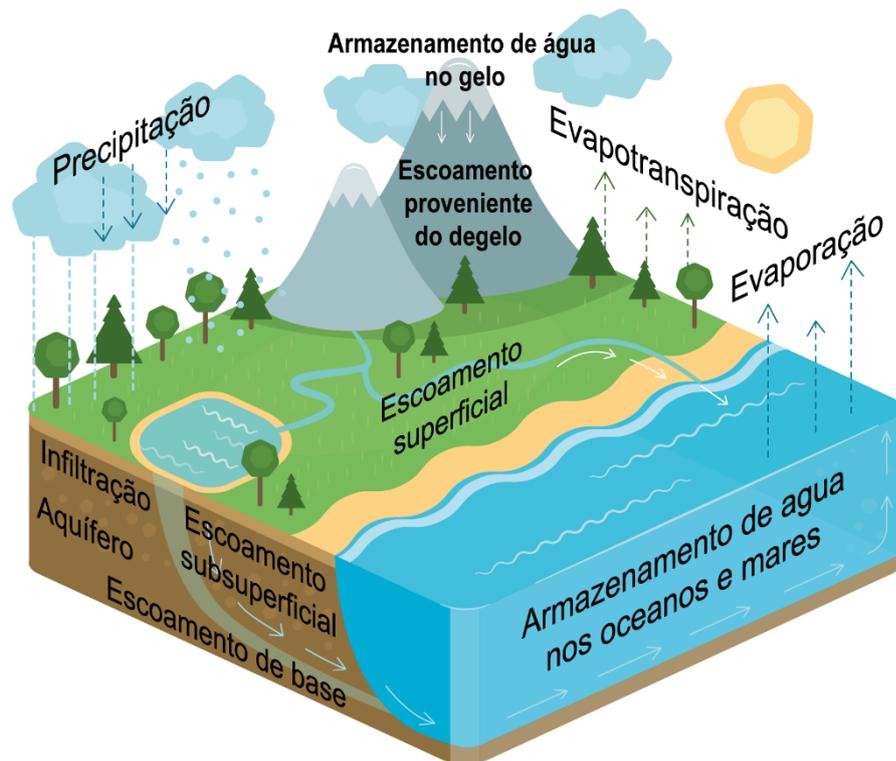


Figura 1 - Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico em escala global.  
 Fonte: Adaptado de Freepik (2021).

De acordo com a Lei Nº 9.433/97, a bacia hidrográfica é definida como unidade de gestão onde há atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SNGRH) (BRASIL, 1997). Como unidade geográfica, a bacia hidrográfica é definida por Altaf *et al.* (2013), como uma área delimitada espacialmente pelos divisores de água, onde ocorre captação de água proveniente da atmosfera, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada exutório, por meio da rede de drenagem, conforme apresentado na Figura 2.

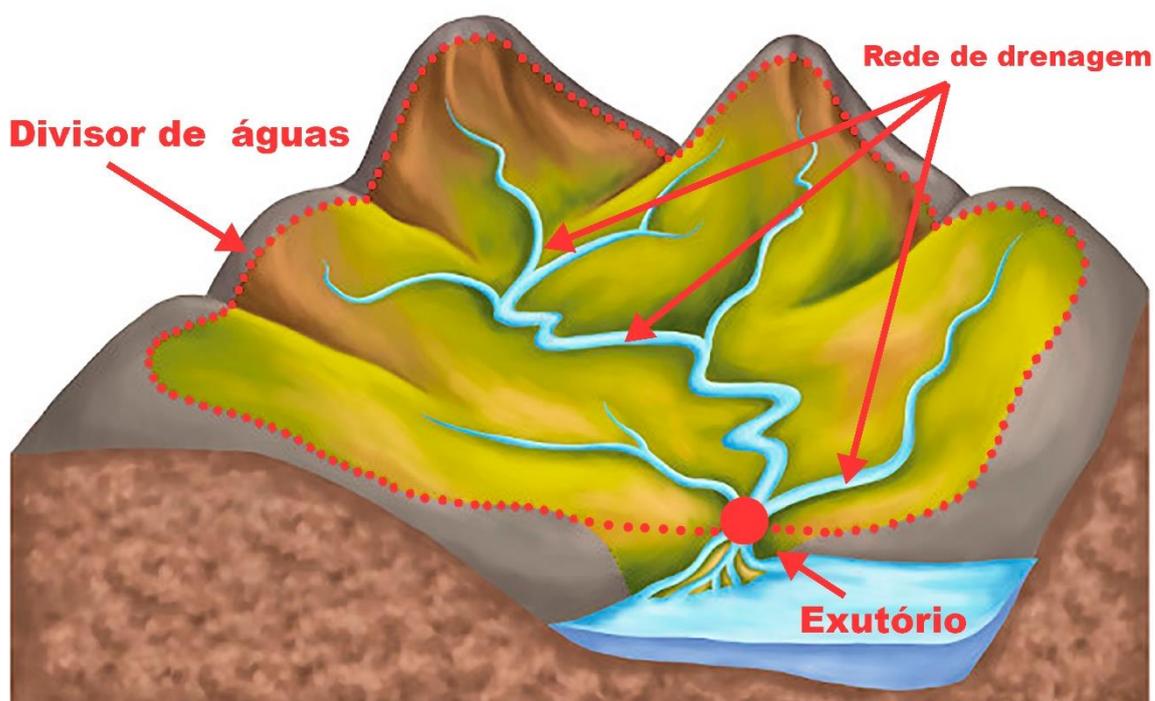


Figura 2 - Representação de uma bacia hidrográfica e seus componentes.  
Fonte: Adaptado de Brasil Escola (2021).

Dentre os processos do ciclo hidrológico que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica, a precipitação é a principal entrada de água no sistema (MELLO; SILVA, BESKOW 2020). Conforme Mello; Silva. Beskow (2020), a precipitação pode ser definida como uma forma de umidade presente na atmosfera que, em função de condições termodinâmicas, precipita. De acordo com Tucci (2009), a precipitação pode ocorrer na forma de chuva, neve, granizo, geada ou orvalho, sendo que em regiões de clima tropical e subtropical, a precipitação em forma de chuva é mais comum (MELLO; SILVA; BESKOW 2020).

Ao precipitar, a água incide sobre a superfície terrestre podendo encontrar a cobertura vegetal ou corpos hídricos, como rios e lagos. Nesta etapa, parte da água precipitada pode ficar retida pela vegetação ou outros obstáculos, caracterizando o processo de interceptação (SOUSA *et al.*, 2016; MIRANDA, OLIVEIRA; SILVA, 2010). Uma vez interceptada, a água volta a atmosfera por meio do processo de evaporação (SOUSA *et al.*, 2016). Por outro lado, segundo Beskow; Sousa; Luz (2015), parte da água que não é interceptada atinge a superfície do solo, e pode ficar armazenada nas depressões do terreno, infiltrar na camada de solo, escoar sobre a superfície ou escoar pela camada de solo como o fluxo subsuperficial.

O processo de infiltração consiste na entrada de água no solo pela camada superficial, que devido à ação da gravidade percola para baixo por meio dos poros vazios até atingir uma barreira impermeável, formando os lençóis de água (KLEIN; KLEIN, 2014; MIRANDA, OLIVEIRA; SILVA, 2010). De acordo com Tucci (2009), o processo de infiltração está associado às características dos solos e vegetação, do estado da superfície, assim como, da quantidade de água e ar presente em seu interior. Outros fatores de importância no comportamento da infiltração são a intensidade da precipitação, sua duração e distribuição ao longo do tempo. Mello; Silva; Beskow (2020) destacam a importância da infiltração, pois promove o preenchimento dos poros do solo com água, a qual pode ficar retida na matriz do solo ficando disponível para ser utilizada pelas plantas. Ademais, a infiltração exerce influência direta sobre outros processos do ciclo hidrológico, tais como escoamento superficial direto.

A evapotranspiração é uma variável de difícil determinação, entretanto, em regiões de clima seco, pode corresponder a 95% do balanço hídrico (KOOL *et al.*, 2014). De acordo com Raghunath (2006), a evapotranspiração é definida como o fluxo de água para a atmosfera em decorrência da evaporação da água retida na matriz do solo e da transpiração das plantas. Rodrigues (2017) conceitua a evaporação como o processo de passagem da água do estado líquido ao estado gasoso a qualquer temperatura inferior ao ponto de ebulição. Enquanto que, o processo de transpiração das plantas ocorre principalmente por meio dos microscópicos poros nas superfícies das folhas, conhecidos como estômatos, onde as taxas de transpiração são dependentes da regulação da abertura estomática (CALDATO; SCHUMACHER, 2013).

No âmbito de estudos hidrológicos, um dos processos mais importantes do ciclo hidrológico a ser estudado é o escoamento (SILVA *et al.*, 2006). Dadas as peculiaridades envolvidas no processo de escoamento, este é subdividido em três componentes: escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e escoamento de base.

Carlesso; Spohr; Flores (2011) definem o escoamento superficial direto como a parcela do ciclo hidrológico relacionada ao movimento da água sobre a superfície do solo. Pode ser gerado a partir da saturação do solo e/ou da grande quantidade e intensidade de precipitação, o que influencia na infiltração do solo, fazendo com que

a água escoar diretamente sobre a superfície do solo até encontrar um corpo hídrico ou ficar retida nas depressões do terreno (MELLO; SILVA e BESKOW, 2020; CALDEIRA, 2016). O escoamento subsuperficial inicia no momento em que ocorre a entrada de água na camada de solo mais próxima à superfície, pelo processo de infiltração. Este componente, segundo Miranda; Oliveira; Silva (2010), é difícil ser quantificado de forma isolada, sendo em alguns casos analisado juntamente com o escoamento superficial. Já o escoamento de base possui fundamental importância na capacidade de produção de água em uma bacia hidrográfica, principalmente em regiões com chuvas de baixa intensidade, pois é produzido pela drenagem natural do aquífero.

A compreensão da relação entre os processos do ciclo hidrológico permite realizar a simulação do comportamento da água na bacia hidrográfica. A simulação hidrológica, realizada por meio da modelagem hidrológica, possibilita a predição de diferentes cenários hidrológicos frente às mudanças no clima e no uso do solo da bacia hidrográfica.

## **3.2 Caracterização dos biomas Floresta Amazônica e Cerrado**

### **3.2.1 Floresta Amazônica**

O bioma Floresta Amazônica possui uma área de aproximadamente 6,5 milhões de km<sup>2</sup>, a qual corresponde a 56% das florestas tropicais do planeta e desempenha um papel fundamental nas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície continental e a atmosfera, sendo um dos controladores do clima do planeta (ROCHA; CORREIA; GOMES, 2019). De acordo com Amorim; Sena; Cataldi (2019), o bioma Floresta Amazônica é caracterizado como o maior bioma brasileiro, visto que ocupa cerca de 49,29% do território nacional. Sua extensão compreende os estados do Pará, Amazonas, Amapá, Acre, Rondônia e Roraima e algumas partes dos estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso. Ademais, o bioma Floresta Amazônica compreende territórios de países próximos ao Brasil, como as Guianas, Suriname, Venezuela, Equador, Peru e Bolívia.

Dada sua localização tropical e grande área de extensão, a Floresta Amazônica é uma importante fonte de vapor de água para o planeta, em especial para a América do Sul (ARTAXO *et al.*, 2014; ROCHA *et al.*, 2009). De acordo com Artaxo *et al.* (2014), essa adição de vapor d'água na atmosfera ocorre com maior vigor durante a estação seca do que na estação chuvosa, em função das raízes profundas das árvores e, também, do fato de haver um sombreamento por nuvens na estação chuvosa que reduz a energia solar disponível para as plantas fazerem fotossíntese. Desta forma, o bioma Floresta Amazônica se comporta como um sumidouro de umidade atmosférica recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração produzida pela própria floresta tropical (ROCHA; CORREIA; GOMES, 2019).

A floresta Amazônica possui um importante papel regulador do clima regional e global (DIAS, 2013; ARTAXO *et al.*, 2014; AMORIM, SENA; CATALDI, 2019). Segundo Artaxo *et al.* (2014), o clima na Floresta Amazônica não é isolado do resto do planeta e evolui em função de alterações climáticas de caráter global, como a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña. A Floresta Amazônica é dividida em sub-regiões com características climáticas distintas, uma vez que, geralmente, as regiões Norte e Leste são influenciadas pelo oceano Atlântico, enquanto que, nas regiões sul e oeste ocorrem as friagens causadas por frentes frias provenientes do sul do continente em dissipação (ARTAXO *et al.*, 2014).

A grande variabilidade espacial e temporal da precipitação é fundamental para a definição do clima na Floresta Amazônica (Franco *et al.* 2018). De acordo com Amanajas; Braga (2012), a precipitação é essencial para o planejamento de atividades humanas e para o desenvolvimento local. Neste sentido, são identificados dois regimes pluviométricos distintos: um chuvoso, com elevada precipitação e diretamente influenciado pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na direção meridional; e outro menos chuvoso, sem período de seca definido (AMANAJAS; BRAGA, 2012).

De acordo com Demattê; Demattê (1993), cerca de 50% dos solos presentes na Floresta Amazônica são os Latossolos. Dada a combinação da atmosfera e a presença de solos desenvolvidos, a Floresta Amazônica se caracteriza por ser uma enorme floresta tropical úmida (ARTAXO *et al.*, 2014). Neste sentido, o bioma abriga diversos tipos de vegetações florestais, tais como florestas de terra firme, florestas

úmidas e secas, matas de várzea e de igapó, manguezais, campos inundados e áreas de transição com biomas adjacentes (COPERTINO *et al.*, 2019). De acordo com Salomão *et al.*, (2007) e Artaxo *et al.* (2014), a floresta de terra firme é o tipo de vegetação predominante na Floresta Amazônica, cobrindo cerca de 70% da área do bioma.

Todavia, existe a possibilidade da vegetação da Floresta Amazônica ser substituída por um tipo de vegetação mais esparsa, de tipo savana, devido às mudanças climáticas da região (CÂNDIDO *et al.*, 2007). Esta hipótese é denominada “Savanização” e vem sendo levantada em alguns estudos que visam avaliar o impacto das mudanças no uso do solo e no clima, e.g. Liesenfeld; Vieira; Miranda (2016), Morello *et al.* (2017).

### 3.2.2 Cerrado

O bioma Cerrado é conhecido como o segundo maior bioma brasileiro em extensão, ocupando cerca de 2.045.000 Km<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente 25% do território nacional (BANDEIRA; CAMPOS, 2018). Segundo Lima (2011), a maior parte do bioma Cerrado está compreendida no Planalto Central Brasileiro, que é caracterizado por possuir regiões de altitudes elevadas. Desta forma, o espaço geográfico ocupado pelo bioma Cerrado influencia positivamente no processo de distribuição dos recursos hídricos pelo Brasil, uma vez que as águas do Cerrado vertem para oito regiões hidrográficas brasileiras (LIMA, 2011; BANDEIRA; CAMPOS, 2018).

O clima predominante no bioma Cerrado é o tropical sazonal com duas estações bem definidas: verões quentes e chuvosos e invernos secos (MARCUIZZO; MELO; COSTA, 2012; BANDEIRA; CAMPOS, 2018). De acordo com Marcuzzo; Melo; Costa (2012), a temperatura média anual do bioma Cerrado fica em torno de 23°C e as temperaturas médias mensais apresentam pouca variação para os valores máximos (podendo chegar a mais de 40°C) e muita variação nos valores mínimos (atingindo valores próximos ou abaixo de zero).

De maneira geral, a precipitação média anual do bioma Cerrado varia entre 1.200 a 1.800mm, com os maiores volumes compreendidos nas estações de

primavera e verão (outubro a março) enquanto que nas estações de outono e inverno (maio a setembro) os índices pluviométricos são bastante reduzidos (MARCUIZZO; MELO; COSTA, 2012). Segundo Campos; Chaves (2020), o bioma Cerrado apresenta uma alta variabilidade espacial na precipitação anual, uma vez que os valores tendem a aumentar de leste para o oeste. Os valores de precipitação média são mais frequentes na região central do bioma Cerrado, com os menores valores na região norte e os maiores nas áreas de transição com o bioma Floresta Amazônica (CAMPOS; CHAVES, 2020).

Conforme Gomes *et al.* (2004), os solos mais frequentes no bioma Cerrado são os Latossolos e os Neossolos Quartzarênicos. Os Latossolos são descritos genericamente como profundos, com poucos nutrientes e praticamente sem minerais primários de fácil intemperismo (GOMES *et al.*, 2004). No tocante à vegetação do bioma Cerrado, Bandeira; Campos (2018) a descrevem como não homogênea, exibindo subsistemas de campo, cerrado, cerradão, matas, matas ciliares ou galeria e veredas e ambientes alagadiços. Ademais, o Cerrado é conhecido como “a savana mais rica do planeta” por possuir formações savânicas e sua formação vegetal ocupar grande parte do território nacional, sendo superado apenas pela Floresta Amazônica (BANDEIRA; CAMPOS, 2018).

### **3.3 Modelagem hidrológica**

Um modelo é definido como a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, objetivando entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005). Os modelos hidrológicos descrevem quantitativamente os fenômenos naturais complexos presentes no ciclo hidrológico. Desta forma, quanto mais complexos os sistemas a serem representados, mais desafiadores e robustos são os modelos, podendo ser classificados sob diferentes aspectos (TUCCI, 2005).

Segundo Beven (2004), os modelos hidrológicos podem ser classificados como concentrados, que analisam os processos hidrológicos considerando a bacia hidrográfica como uma unidade homogênea, ou distribuídos, que realizam a análise discretizando a bacia hidrográfica em sub-bacias ou em uma grade regular de células.

Outra classificação empregada, segundo Shaw (1994), diz respeito aos modelos serem estocásticos, ou seja, fazem uso de distribuições de probabilidade para gerar séries temporais de variáveis hidrológicas; ou determinísticos, que transformam chuva em vazão a partir da quantificação dos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica.

De acordo com Tucci (2005), os modelos podem, também, ser classificados quanto a sua formulação, podendo ser conceituais, que consideram os processos físicos nas formulações que representam o sistema, ou empíricos. Quanto à forma de representação dos dados para a análise, os modelos podem ser classificados como discretos ou contínuos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012). Segundo Marinho Filho *et al.* (2012), os modelos discretos visam analisar períodos isolados de uma série histórica, enquanto os modelos contínuos analisam longos períodos de dados.

A quantidade de informações necessárias, de acordo com a aplicação de interesse, é definida a partir da complexidade na formulação do modelo. Conforme Beven (2004), quanto maior a complexidade do modelo, maior o número de parâmetros de calibração, sendo necessário maiores informações de entrada. No entanto, os modelos hidrológicos requerem informações em escalas temporais e espaciais que podem ter disponibilidade de aquisição escassas (CALDEIRA *et al.* 2019).

Ao aplicar um modelo hidrológico, a primeira etapa a ser realizada é a análise de sensibilidade. A etapa de análise de sensibilidade, segundo White e Chaubey (2005), visa avaliar a influência que as alterações nos valores dos parâmetros do modelo podem ter na resposta de uma variável de saída, sendo os parâmetros mais sensíveis os que exercem maior influência.

O ajuste do conjunto de parâmetros, indicados como mais sensíveis pela etapa de análise de sensibilidade, para a bacia hidrográfica em análise é determinada pela calibração. O objetivo da calibração é encontrar valores para um conjunto de parâmetros que representem a realidade hidrológica, podendo ser realizada manualmente pelo método tentativa e erro ou por métodos automáticos (BESKOW *et al.*, 2011). De acordo com Eckhardt; Arnold (2001), o processo de calibração manual pode ser subjetiva e potencialmente tendenciosa, além de demandar um considerável período de tempo. Neste sentido, os processos de calibração automática podem superar estas dificuldades.

Após a etapa de calibração, sequencia-se a etapa de validação dos parâmetros do modelo hidrológico. A validação consiste em avaliar a acurácia nas aplicações pretendidas e deve estar fundamentada em testes avaliados por coeficientes estatísticos (VIOLA, 2008). Klemeš (1986) apresenta alguns tipos de testes para validação de modelos hidrológicos em quatro aplicações distintas, como:

- *Split sample test*: consiste na aplicação de dois períodos de tempos diferentes, sendo um período para realizar a etapa de calibração do modelo e o outro para realizar a aplicação dos parâmetros obtidos na calibração. Este teste é aplicado para realizar a validação de modelos aplicados a processos estacionários com calibração e simulação na mesma bacia.
- *Proxy basin test*: são empregadas duas bacias hidrográficas com características edafoclimáticas semelhantes a bacia a qual se deseja obter as informações hidrológicas. Este teste pode ser aplicado para validar modelos aplicados a processos estacionários com calibração e simulação em bacias distintas.
- *Differential Split-sample test*: calibra o modelo para um período de tempo anterior às alterações avaliadas e valida para um período de tempo posterior. É utilizado para realizar a validação de modelos aplicados a processos não estacionários, com a calibração e simulação na mesma bacia.
- *Proxy-basin Differential Split-sample test*: é caracterizado pela combinação dos testes *Proxy-basin* e *Differential Split-sample*. Este teste é utilizado para realizar a validação de modelos aplicados em processos não-estacionários, com calibração e simulação em bacias distintas.

Os diferentes processos do ciclo hidrológico necessitam ser cuidadosamente estudados a fim de descobrir suas variações e realizar previsões. Neste sentido, vários modelos hidrológicos foram e ainda vêm sendo desenvolvidos, sendo usados cada vez mais para auxiliar em uma extensa gama de problemas de recursos hídricos em todo o mundo, principalmente para verificar o impacto das propriedades climáticas e/ou do solo na hidrologia de bacias hidrográficas (DEVI, GANASRI; DWARAKISH, 2015; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014). Dentre os modelos hidrológicos desenvolvidos, podem ser citados os modelos *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

(ARNOLD *et al.*, 1998) e o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN, 2001).

O modelo LISEM, de acordo com Jetten (2018), é fisicamente baseado para simular os processos hidrológicos, bem como o transporte de sedimentos, durante e imediatamente após a ocorrência de um evento de chuva sobre a bacia hidrográfica. O modelo SWAT é um modelo amplamente utilizado em estudos hidrológicos (MUHAMMAD *et al.*, 2019; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014; ADHIKARY *et al.*, 2019; DJEBOU, 2019, entre outros). Segundo Douglas-Mankin; Srinivasan; Arnold (2010) e Adhikary *et al.* (2019), o SWAT é um modelo fisicamente baseado, determinístico e contínuo, usado para avaliar os recursos hídricos em múltiplas escalas. Enquanto que o modelo MGB-IPH foi desenvolvido para realizar a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas de grande escala, sendo aplicado com sucesso em bacias hidrográficas da América do Sul na análise do impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos (BRAVO *et al.*, 2014).

### **3.4 Modelo hidrológico *Lavras Simulation of Hydrology (LASH)***

O modelo *Lavras Simulation of Hydrology (LASH)* teve seu desenvolvimento iniciado por Viola (2008), em uma parceria entre pesquisadores da Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais, e a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos.

A primeira versão consistiu em um modelo hidrológico chuva-vazão semiconceitual, determinístico, de longo termo e distribuído por sub-bacias. A partir dos resultados promissores obtidos por Viola (2008) na modelagem com discretização espacial concentrada, Mello *et al.* (2008) empregaram o modelo LASH com discretização espacial distribuída por sub-bacias à região Alto rio Grande, no sul de Minas Gerais.

A segunda versão foi apresentada por Beskow (2009), onde o modelo obteve, então, a forma de um programa de computador escrito na linguagem de programação Delphi e passou a ser chamado oficialmente como *Lavras Simulation of Hydrology (LASH)*. Nesta versão, o modelo LASH passou por diversas adaptações e aprimoramentos, sendo a principal diferença atribuída à distribuição espacial,

podendo ser distribuída por células, além de contar com um algoritmo para calibração automática dos parâmetros do modelo.

A terceira versão do modelo foi avaliada por Caldeira (2016) em duas bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Os principais aprimoramentos para esta versão foram de caráter computacional no que tange ao desenvolvimento de módulos para análise de dados na escala temporal, como o *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA) (VARGAS et al., 2019) e espacial, como o ArcLASH (CALDEIRA et al. 2015).

O modelo LASH vem sendo aplicado em bacias hidrográficas brasileiras de diferentes dimensões e em diferentes biomas, obtendo sucesso na modelagem hidrológica. No entanto, o LASH ainda não foi aplicado em algumas regiões, tais como o bioma Floresta Amazônica, sendo necessária a verificação do comportamento do modelo em áreas de diferentes características. As regiões em que o modelo LASH foi aplicado anteriormente e a região em que a BHRX está inserida, podem ser observadas na Figura 3.

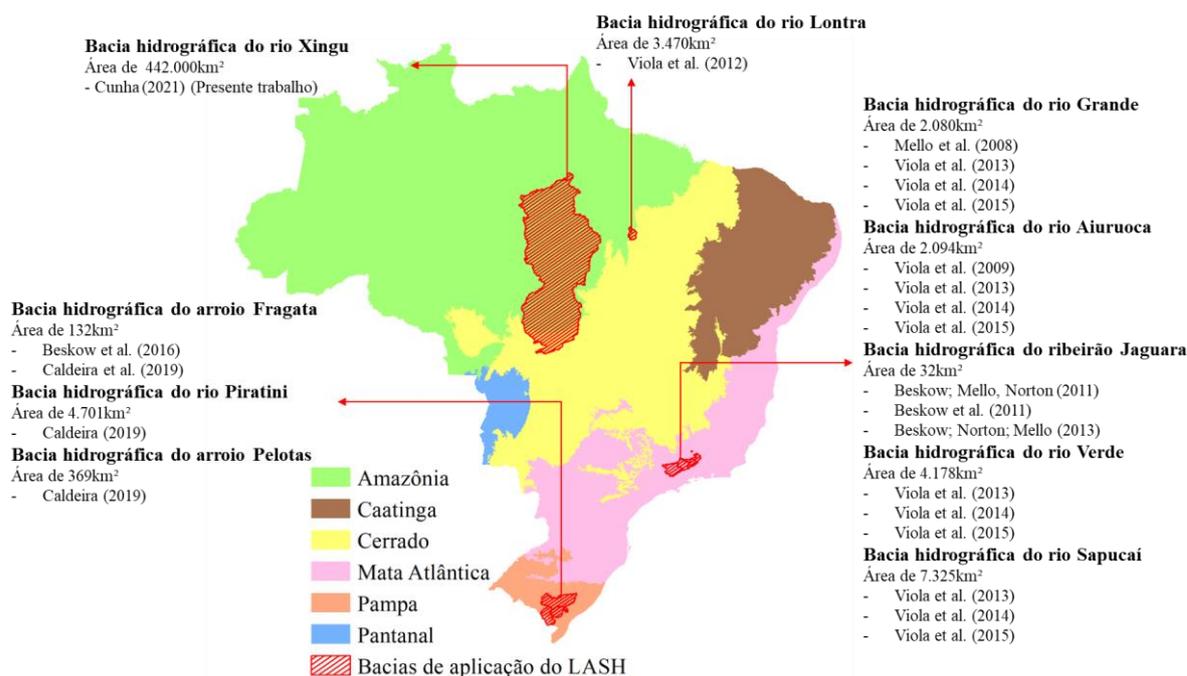


Figura 3 - Áreas de aplicação do modelo LASH.

Após os bons resultados obtidos em seu desenvolvimento e aplicação realizado por Viola (2008) na bacia hidrográfica do rio Grande, com área de 2.080km<sup>2</sup>, Mello et al. (2008) aplicaram o modelo LASH na mesma bacia utilizando discretização espacial

semi-distribuída por sub-bacias hidrográficas. O estudo em questão indicou que o modelo obteve estimativas satisfatórias as vazões diárias, incluindo os períodos de La-Niña e El-Niño. Ademais, segundo os autores, o modelo LASH também produziu resultados robustos no tocante à simulação dos impactos decorridos de alterações no uso do solo da bacia analisada.

Posteriormente, Viola *et al.* (2009) avaliaram o desempenho do modelo LASH na bacia do rio Aiuruoca, de área de 2.094km<sup>2</sup>, utilizando discretização espacial semi-distribuída por sub-bacias. Neste estudo, também foram encontrados resultados promissores para simulação do comportamento diário das vazões, com estatística  $C_{NS}$  de 0,87 e 0,92 para calibração e validação e  $C_{NSlog(Q)}$  de 0,77 na calibração e 0,80 na validação. Dentre as dificuldades apontadas no estudo, destacou-se a estimativa nas vazões de cheia que está associada principalmente à representação da distribuição espacial das chuvas e ao intervalo de simulação adotado na modelagem.

Beskow; Mello; Norton (2011) descreveram minuciosamente a estrutura, componentes, formulações e potencialidades da segunda versão do modelo. Neste estudo, os autores realizaram análise de sensibilidade, redução do intervalo dos parâmetros e das incertezas que ocorrem anteriormente à calibração, utilizando como área de estudo a bacia hidrográfica experimental do ribeirão Jaguará, localizada em Minas Gerais. Posteriormente, as etapas de calibração e validação do modelo, bem como a análise da capacidade em estimar os hidrogramas da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará foram realizadas por Beskow *et al.* (2011). No estudo de Beskow *et al.* (2011) foram encontrados bons resultados de ajuste do modelo LASH, com  $C_{NS}$  igual a 0,82 e 0,76 para os períodos de calibração e validação, e  $C_{NSlog(Q)}$  igual a 0,82 e 0,77.

A primeira versão do modelo LASH foi aplicada por Viola *et al.* (2012) em uma sub-bacia hidrográfica do rio Lontra, no estado de Tocantins. Neste estudo, os autores realizaram a calibração do modelo, obtendo  $C_{NS}$  igual a 0,74 e  $C_{NSlog(Q)}$  de 0,80, e a validação, com  $C_{NS}$  de 0,75 e  $C_{NSlog(Q)}$  igual a 0,84, e verificaram sua acurácia na estimativa dos valores de vazões de referência da curva de permanência, assim como seu desempenho em longo termo. Um estudo semelhante foi conduzido por Viola *et al.* (2013) nas bacias hidrográficas dos rios Aiuruoca, Grande, Sapucaí e Verde, em Minas Gerais.

Beskow; Norton; Mello (2013) realizaram a simulação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará frente a diferentes cenários no uso e cobertura do solo a partir do modelo LASH. Os autores destacaram que, no cenário de troca de pastagens para eucalipto, houve reduções nas vazões de pico da bacia. Enquanto que, no cenário de troca de eucalipto para pastagem, os valores das vazões de pico sofreram aumento. Viola *et al.* (2014) realizaram a simulação do comportamento hidrológico frente as mudanças de uso e cobertura do solo aplicando o modelo LASH na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, em Minas Gerais. Viola *et al.* (2014) constataram que, os cenários embasados no reflorestamento com eucalipto acarretaram em reduções nos valores de rendimentos de água médios anuais. Já nos cenários de desmatamento para áreas de pastagem houve aumentos nesses valores. Visando avaliar o impacto das projeções climáticas sobre os recursos hídricos, Viola *et al.* (2015) aplicaram o modelo LASH na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, em Minas Gerais.

Na região Sul do país, Beskow *et al.* (2016) calibraram e validaram o modelo LASH para a bacia hidrográfica do arroio Fragata, localizada no Sul do Rio Grande do Sul. Ademais, a terceira versão do modelo foi desenvolvida e avaliada por Caldeira (2016) na mesma área de estudo de Beskow *et al.* (2016) e na bacia hidrográfica do arroio Pelotas. Caldeira (2019) avaliou o impacto das mudanças climáticas utilizando o modelo LASH em 3 bacias hidrográficas no sul do Rio Grande do Sul. Considerando os bons resultados obtidos na modelagem nas bacias estudadas, Caldeira *et al.* (2019) contemplaram a análise da discretização espacial sobre o desempenho do modelo LASH na bacia hidrográfica do arroio Fragata.

Andrade *et al.* (2020) desenvolveram uma versão do modelo LASH com o uso das Unidades Hidrológicas Homogêneas e calibrando o modelo de forma distribuída por sub-bacia na bacia de drenagem que alimenta o reservatório da usina hidrelétrica de Furnas, no sul de Minas Gerais. Os autores usaram o modelo para estimativa do armazenamento de água no solo distribuída por sub-bacias hidrográficas, produzindo resultados promissores também no tocante a essa variável hidrológica, fundamental em diversos de campos de aplicação.

### 3.5 Impactos de alterações do uso do solo sobre o regime hidrológico

As alterações no uso e cobertura do solo das bacias hidrográficas produzem impactos sobre a hidrologia, principalmente no que tange à evapotranspiração e ao escoamento. Segundo Tucci (2005), podem produzir aumento ou reduções das vazões médias, mínimas e máximas, além de alterações na qualidade da água de uma bacia hidrográfica.

Segundo o diagnóstico socioambiental da zona oeste do Estado do Pará, desenvolvido por Venturieri *et al.* (2010), a região amazônica vem sofrendo com as atividades antrópicas que ocasionam a mudança do uso nos últimos 30 anos. Ainda segundo este estudo, um dos fatores imprescindíveis para essas modificações é a ocupação da Floresta Amazônica por meio da criação do Plano de Integração Nacional (1970), que incentivou a interiorização da região, além da instalação de projetos de infraestrutura como, por exemplo, a implementação da BR-163 e BR-230 (Transamazônica), contribuindo para a exploração das regiões adjacentes.

O primeiro Relatório Anual do Desmatamento no Brasil (RADB), produzido e publicado pelo MapBiomas, mostra a perda da vegetação nativa detectada em todos os biomas do país no ano de 2019. Segundo o relatório, o país perdeu aproximadamente 12.187km<sup>2</sup> de vegetação nativa (MAPBIOMAS, 2020). Os resultados do RADB (MAPBIOMAS, 2020) apontaram que mais de 60% desta área desmatada está associada ao bioma Floresta Amazônica, com 7.700km<sup>2</sup> devastados. O segundo bioma para o qual houve mais desmatamento foi o Cerrado, com 4.066km<sup>2</sup>. Neste sentido, as áreas desmatadas nestes dois biomas juntos representam 96,7% do desmatamento brasileiro em 2019 (MAPBIOMAS, 2020).

Na BHRX, segundo o Boletim nº 21 disponibilizado pelo SIRADX, foram desmatados cerca de 468km<sup>2</sup> nos meses de setembro e outubro de 2020. Da área desmatada, aproximadamente 91% ocorreram no estado do Pará. Neste sentido, de acordo com Sanches; Villas-Bôas (2005) e Teixeira; Soares-Filho (2009), na BHRX, o crescente número nas taxas de desmatamento é resultado da expansão de atividades agropecuárias na região.

Na Figura 4 estão ilustradas as áreas de desmatamento em cada município da BHRX nos meses de setembro e outubro de 2020. De acordo com o Boletim nº 21

(SIRADX, 2020), os municípios de São Félix do Xingu, Altamira e Senador José Porfírio concentraram 74% de todo o desmatamento da bacia.

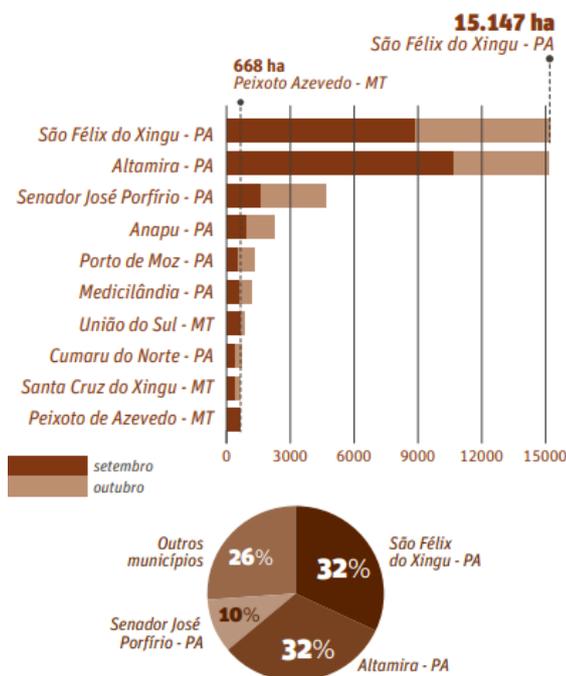


Figura 4 - Municípios da bacia do rio Xingu em que houve desmatamentos nos meses de setembro e outubro de 2020.

Fonte: Boletim nº 21 (SIRADX, 2020).

De acordo com o material produzido pelo instituto socioambiental (ISA) sobre a BHRX em Mato Grosso em 2010, o cultivo da soja corresponde a aproximadamente 33% da área colhida do estado, e a pecuária é bastante extensiva, contando com 6,5 milhões de cabeças. De acordo com Domingues, Bermann; Manfredini (2014), a intensificação da produção de soja é um fator de grande influência no desmatamento na BHRX.

Conforme Perazzoli, Pinheiro; Kaufmann (2013) e Viola *et al.* (2014), o conhecimento da resposta hidrológica da bacia hidrográfica frente a diferentes cenários de tendência de uso do solo é de extrema importância na tomada de decisão sobre a gestão e manejo da mesma. Neste sentido, metodologias experimentais para avaliar os efeitos das mudanças do uso do solo sobre o regime hidrológico em bacias hidrográficas vêm sendo desenvolvidas desde a primeira metade do século XX (MCCULLOCH; ROBINSON, 1993). Segundo Mcculloch; Robinson (1993), estas metodologias podem ser agrupadas em três classes:

- Estudos de correlação: compreende analisar o comportamento hidrológico entre duas bacias hidrográficas distintas, com características muito semelhantes entre si, diferenciando apenas a vegetação. Entretanto, duas bacias hidrográficas nunca serão completamente idênticas, logo, algumas diferenças observadas podem não ser atribuídas às mudanças na vegetação. Neste sentido, existe uma abordagem mais complexa que busca monitorar diversas bacias hidrográficas simultaneamente, averiguando as possíveis variações das condições naturais, tais como, geologia, solo, clima e geomorfologia. Estas variações das condições naturais são correlacionadas com os dados hidrológicos monitorados resultando em equações empíricas que relacionam a vazão com as variáveis independentes.
- Estudos de bacia única: após alguns anos de monitoramento em uma bacia hidrográfica, o comportamento hidrológico desta é estabelecido. Em seguida, são realizadas mudanças no uso do solo da bacia hidrográfica analisada, ou seja, desmatamento ou reflorestamento, e continua-se o monitoramento hidrológico por mais alguns anos. Desta forma, é possível estabelecer a influência das mudanças no uso do solo na bacia hidrográfica. No entanto, esta metodologia não é capaz de evitar a influência das variações climáticas no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, além de onerosa e de longo prazo.
- Estudos de bacias pareadas: compreende a combinação das metodologias de estudos de correlação e estudos de bacia única, sendo considerada a metodologia mais adequada para análise da influência do uso do solo no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Nesta metodologia, são monitoradas duas bacias hidrográficas A e B de características semelhantes, por um período suficiente para caracterização do comportamento hidrológico, chamado “calibração”. Posteriormente, a bacia A é sujeita a alterações no uso do solo, enquanto que a bacia B permanece inalterada. A comparação das variáveis hidrológicas antes e depois das alterações permite analisar os efeitos da vegetação, bem como, da variabilidade climática na hidrologia das duas bacias.

Os resultados obtidos a partir das metodologias experimentais apresentadas reservam-se apenas às bacias as quais foram analisadas. Estas geralmente estão inseridas em uma mesoescala espacial, onde a extrapolação dos resultados obtidos para outras bacias de diferentes escalas espaciais pode resultar em erros consideráveis. Portanto, a simulação hidrológica pode ser uma ferramenta viável na análise do impacto das alterações do uso do solo no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, a partir da modificação de parâmetros dos modelos que representam a vegetação. Desta forma, segundo Viola *et al.* (2014), a simulação hidrológica permite a definição de limites de alterações no uso do solo por atividades que possam afetar adversamente os recursos hídricos.

Estudos aplicando diferentes modelos hidrológicos para avaliar os impactos das mudanças no uso do solo nas bacias hidrográficas vêm sendo realizados em algumas regiões do mundo, e. g. Ty *et al.* (2012), na bacia do rio Srepok que drena terras do Vietnã e Combodia; Du *et al.* (2013), na bacia do rio Qinhuai, localizada na província chinesa Jiangsu; Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013), na bacia do Rio Concorde em Santa Catarina; Santos *et al.* (2018) na bacia do rio Iriri; Oliveira *et al.* (2018) na bacia do rio Verde; e Andrade; Ribeiro (2020) na bacia do rio Paraíba do Sul. Dentre os estudos realizados no Brasil, o modelo LASH foi aplicado por Beskow *et al.* (2013), na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara e Viola *et al.* (2014) nas bacias hidrográficas localizadas na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, em Minas Gerais, para simular os impactos de mudanças no uso do solo nas bacias hidrográficas analisadas.

## 4 Metodologia

### 4.1 Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Amazonas (BHRA) é a maior bacia hidrográfica do planeta, possuindo área de aproximadamente 7,5 milhões de km<sup>2</sup>, sendo que aproximadamente 3,9 milhões de km<sup>2</sup> compreendem o território brasileiro. Uma das sub-bacias da bacia do rio Amazonas é a do rio Xingu (BHRX), um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas (SANTOS *et al.*, 2016).

A BHRX possui aproximadamente 530 mil km<sup>2</sup> de área de drenagem, compreendendo os estados do Pará e Mato Grosso. De acordo com CPRM (2020), o rio Xingu está basicamente dividido em três compartimentos: Alto Xingu, Médio Xingu e Baixo Xingu. No Alto Xingu, recebe contribuição de importantes afluentes, como os rios Suiá-Miçu, Manissaua-Miçu e Arraias; já no Médio Xingu, recebe as contribuições do Rio Fresco, e mais a jusante, do Rio Iriri, o afluente mais importante do rio Xingu; por fim, no Baixo Xingu outro importante afluente é o Rio Bacajá (CPRM, 2020).

Segundo Villas-Bôas *et al.* (2012), a BHRX está localizada em uma área de transição entre os biomas Floresta Amazônica e Cerrado e possui 60% de seu território ocupado por áreas protegidas. Desde sua nascente, localizada no estado do Mato Grosso, até sua foz, no rio Amazonas, o rio Xingu possui uma extensão de 1.640km, sendo de grande importância no contexto econômico do Brasil, principalmente por seu potencial hidráulico. De acordo com Villas-Bôas *et al.* (2012), a pecuária é a principal atividade econômica da BHRX. No entanto, o agronegócio da soja vem se expandindo, especialmente nas regiões de cabeceira da bacia (SANCHES; VILLAS-BÔAS, 2005; TEIXEIRA; SOARES-FILHO, 2009).

Por possuir série histórica com dados de vazão com extensão satisfatória, a BHRX foi delimitada neste estudo à montante da estação fluviométrica Altamira de código 18850000 (Figura 5), de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). Neste sentido, a área da BHRX para este estudo é de 448.022,80km<sup>2</sup>.

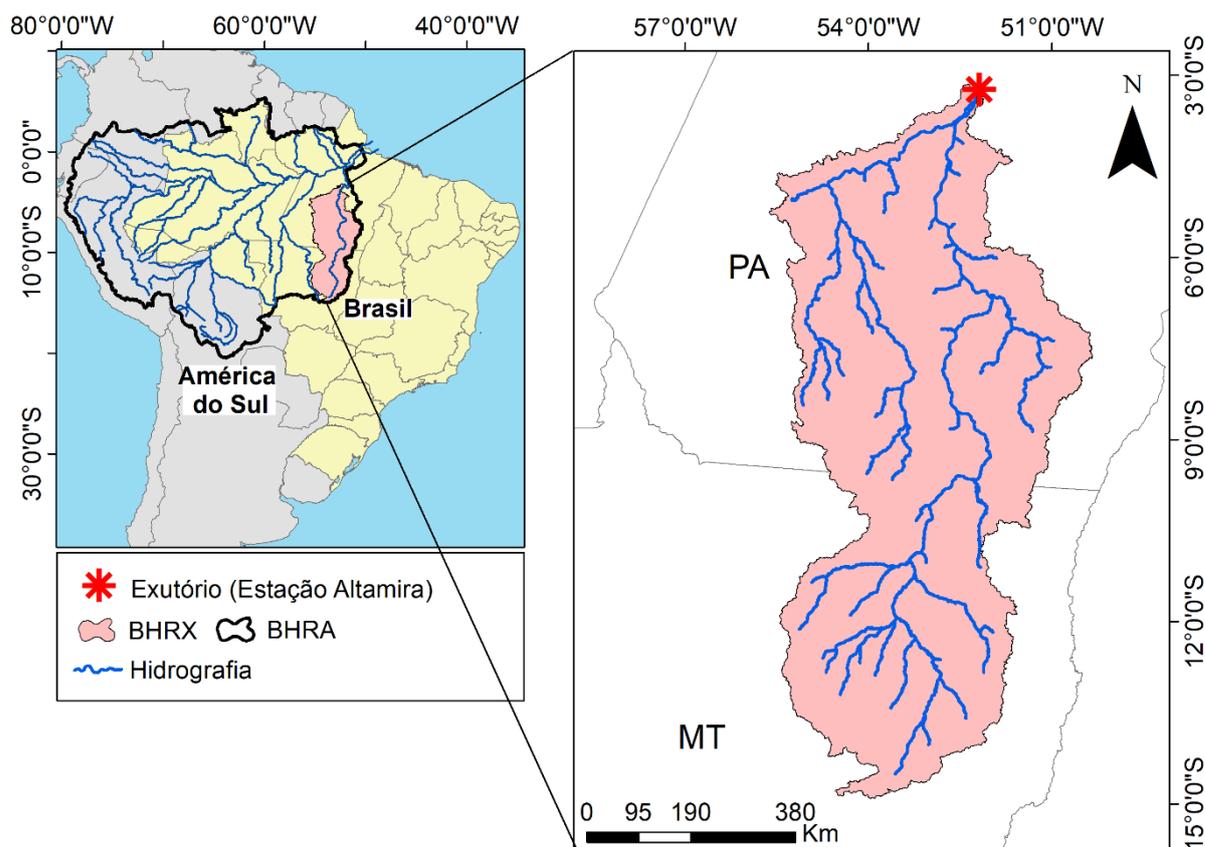


Figura 5 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Xingu no contexto da bacia do rio Amazonas, do Brasil e da América do Sul.

De acordo com a classificação de Köppen, em estudo realizado por Alvares *et al.* (2014), a BHRX compreende três classificações de clima: Af (tropical úmido ou superúmido, sem estação seca), Am (clima de monções) e Aw (tropical com inverno seco) (Figura 6a). O clima Af pode ser observado na BHRX na região centro-oeste do estado do Pará, na região centro e leste do estado, com precipitação anual entre 2.200 e 2.700 mm e temperatura média anual superior a 26°C. O clima Am compreende a maior área da BHRX, sob forte gradiente norte-sul na quantidade e distribuição de chuvas, presente ao sul do estado do Pará e ao norte do estado de Mato Grosso, com aproximadamente 3.000mm por ano. Na região sudoeste do Mato Grosso, próximo às nascentes da BHRX, a precipitação anual diminui para cerca de 2.000 mm e o inverno seco começa caracterizando o clima Aw (ALVARES *et al.*, 2014).

A estação seca na BHRX compreende os meses de maio a outubro, enquanto que a estação chuvosa compreende os meses de novembro a abril. Durante a estação seca, há atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada pelos altos valores de radiação de onda longa emergentes, causando elevados

índices pluviométricos (FRANCO *et al.*, 2018). Na estação chuvosa, os maiores volumes pluviométricos são favorecidos pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (FRANCO *et al.*, 2018). A espacialização da precipitação total anual média na BHRX está ilustrada na Figura 6b.

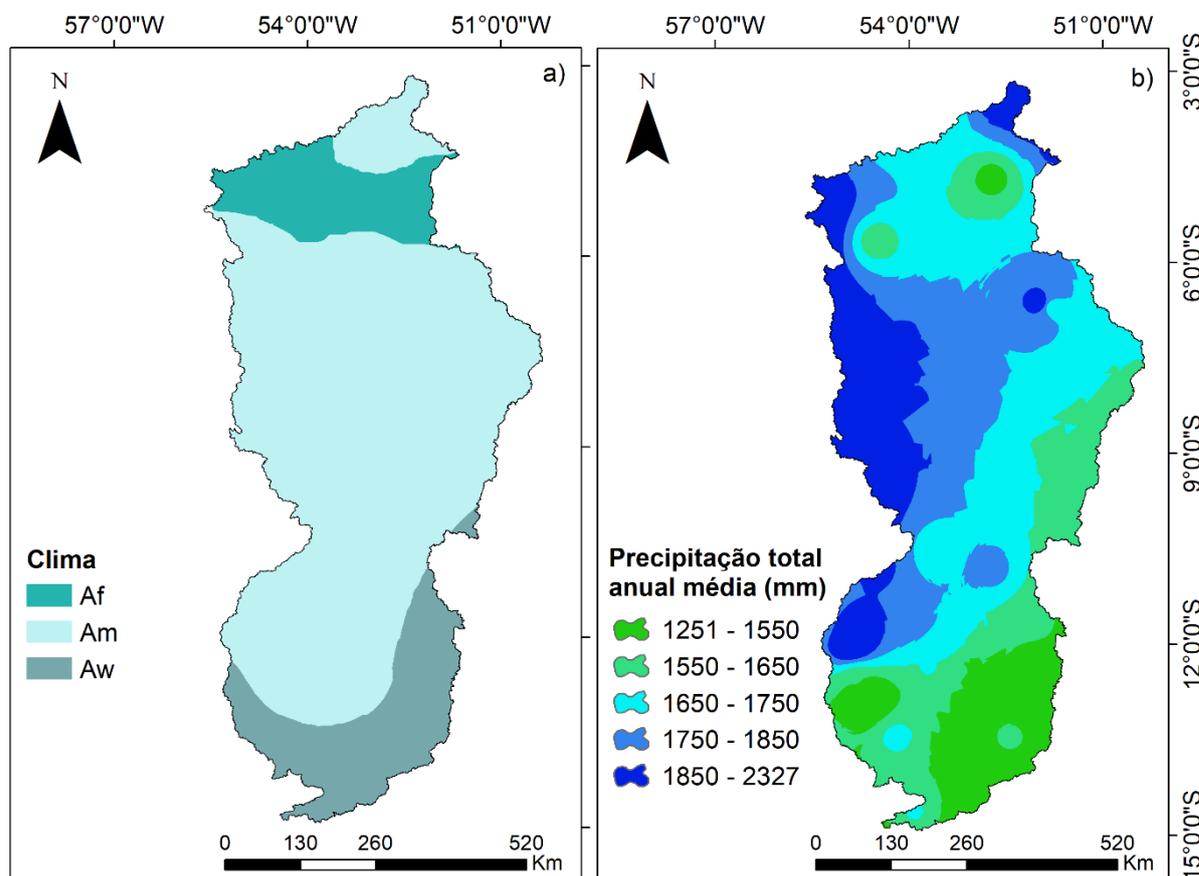


Figura 6 - a) Espacialização das classes de clima que compreendem a bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) de acordo com a classificação de Alvares *et al.* (2014). b) Mapa de distribuição das precipitações totais anuais médias na BHRX no período de 1995 a 2019, elaborado com base nos dados provenientes das estações de monitoramento pluviométrico da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico.

## 4.2 Descrição do Modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH)

O modelo LASH visa simular o comportamento das vazões em uma bacia hidrográfica (CALDEIRA *et al.*, 2019). Neste estudo, foi aplicada a terceira versão do modelo LASH, desenvolvida por Caldeira (2016), a qual utiliza discretização espacial semi-distribuída por sub-bacias, com passo diário de simulação. A linguagem de programação utilizada na versão do modelo LASH aplicada neste estudo foi a MATLAB® (VARGAS, 2021).

De acordo com Caldeira *et al.* (2019), a formulação do modelo LASH é baseada na equação do balanço hídrico, desta forma, pode estimar outras variáveis associadas a diferentes componentes do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração, a interceptação e o escoamento superficial direto. A equação geral do modelo LASH está descrita na Equação 1:

$$\frac{A_t - A_{t-1}}{\Delta t} = \frac{[(P + D_{CR} - ET_R - D_B - D_{SS} - D_S)]}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que,  $A_t$  é o armazenamento atual de água no solo no tempo  $t$  (mm);  $A_{t-1}$  é o armazenamento de água no solo (mm) no intervalo de tempo imediatamente anterior à  $t$ ;  $P$  é a precipitação média (mm), descontada a interceptação ( $IT$ , em mm);  $D_{CR}$  é a ascensão capilar (mm);  $ET_R$  é a evapotranspiração real (mm);  $D_B$  é a lâmina de escoamento subterrâneo (mm);  $D_{SS}$  é a lâmina de escoamento subsuperficial (mm);  $D_S$  é a lâmina de escoamento superficial direto (mm); e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (1 dia).

Todos os processos hidrológicos foram considerados no nível da sub-bacia hidrográfica. Para considerar a condição inicial de  $A_t$ , adota-se um valor inicial de 50% da capacidade máxima de armazenamento de água no solo ( $A_m$ ) média de cada sub-bacia, pois não existem dados monitorados de  $A_t$  (CALDEIRA, 2016). Uma vez que a  $P$  inicia, esta fica armazenada na cobertura vegetal até atingir o armazenamento máximo de  $IT$  ( $IT_{m\acute{a}x}$ ). De acordo com Caldeira (2016), a  $IT_{m\acute{a}x}$  é calculada no modelo LASH considerando como uma função linear do índice de área foliar (IAF), conforme a Equação 2:

$$IT_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot IAF \quad (2)$$

Em que,  $\alpha$  é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas, fixada como igual a 0,2mm (CALDEIRA, 2016).

Em seguida, o modelo LASH estima a parcela de  $P$  que atinge o solo no tempo  $t$ . Para calcular quanto da água interceptada é evaporada em cada passo de tempo o modelo LASH utiliza a equação de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

A parcela de  $D_S$  é estimada pelo modelo LASH considerando o método Curva Número (CN), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS) do *United States*

*Department of Agriculture* e adaptado por Mishra et al. (2006), denominado de CN Modificado (Equação 3).

$$D_s = \frac{(P_t - I_a) \cdot (P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S} \quad (3)$$

Em que,  $D_s$  é a lâmina de escoamento superficial direto ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $P_t$  é a precipitação total que atinge o solo (mm);  $I_a$  é a abstração inicial (mm) (Equação 4);  $M$  corresponde ao armazenamento de água no solo antes do evento de chuva analisado (mm) (Equação 5); e  $S$  é o armazenamento potencial de retenção de água no solo (podendo ser estimado pelas Equações 6 ou 7).

$$I_a = \frac{\lambda \cdot S^2}{S + M} \quad (4)$$

$$M = 0,5 \cdot (-(1 + \lambda) \cdot S) + \sqrt{(1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S} \quad (5)$$

$$S = (\theta_s - \theta_A) \cdot h \quad (6)$$

$$S = A_m - A_t \quad (7)$$

Em que,  $\lambda$  é o coeficiente de abstração inicial (adimensional), que pode variar de 0 a 0,5, de acordo com Mishra et al. (2006);  $P_5$  representa a precipitação antecedente de 5 dias (mm);  $\theta_s$  é o teor de água no solo saturado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_A$  é o teor atual de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); e  $h$  é a profundidade da camada de controle do balanço hídrico (mm).

A parcela de  $D_{ss}$  é estimada no modelo LASH de acordo com o recomendado por Rawls et al. (1993). Conforme Caldeira (2016), quando o  $A_t$  for inferior ao limiar de armazenamento que permite geração de escoamento subsuperficial ( $A_{cc}$ ), a parcela de  $D_{ss}$  será igual a zero, contudo, se for superior, é estimada pela Equação 8.

$$D_{ss} = K_{ss} \cdot \left( \frac{A_t - A_{cc}}{A_m - A_{cc}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{Pr}\right)} \quad \text{se } A_t \geq A_{cc} \quad (8)$$

Em que  $D_{ss}$  é o escoamento subsuperficial ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $K_{ss}$  representa a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $Pr$  é o índice de porosidade do solo (adimensional), considerado fixo e igual à 0,4,  $A_{cc}$  representa o armazenamento de

água no solo a partir do qual ocorre escoamento subsuperficial (mm), considerado fixo e igual à 10% de  $A_m$  (CALDEIRA, 2016).

De acordo com Caldeira (2016), a estimativa do  $D_B$  pelo modelo LASH também é baseada em Rawls *et al.* (1993). Da mesma forma,  $A_t$  for inferior ao limiar de armazenamento que permite a ocorrência de geração de escoamento subterrâneo ( $A_c$ ), o ES será zero, no entanto, se  $A_c$  foi superior,  $D_B$  é estimada pela Equação 9.

$$D_B = K_B \cdot \left( \frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \text{ se } A_t \geq A_c \quad (8)$$

Em que  $D_B$  é o escoamento subterrâneo, em  $\text{mm dia}^{-1}$ ;  $K_B$  é a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo; em  $\text{mm.dia}^{-1}$ , e  $A_c$  representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subterrâneo (mm), considerado fixo e igual à 1%  $A_m$  (CALDEIRA, 2016).

Após quantificar os componentes do escoamento  $D_s$ ,  $D_{ss}$  e  $D_B$ , o modelo LASH converte cada componente em vazão determinando três reservatórios lineares em cada sub-bacia. Segundo Viola (2011), esta etapa é necessária para simular o retardamento dos componentes do escoamento nas sub-bacias antes de estes atingirem a rede de drenagem. Neste sentido, as vazões de saída nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, são determinadas pelas equações:

$$Q_s = \frac{D_s \cdot A_{SB}}{C_s \cdot T_c} = \frac{V_s}{C_s \cdot T_c} \quad (9)$$

$$Q_{ss} = \frac{D_{ss} \cdot A_{SB}}{C_{ss} \cdot T_c} = \frac{V_{ss}}{C_{ss} \cdot T_c} \quad (10)$$

$$Q_B = \frac{D_B \cdot A_{SB}}{C_B} = \frac{V_B}{C_B} \quad (11)$$

Em que,  $Q_s$ ,  $Q_{ss}$  e  $Q_B$  são as vazões, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , de saída no reservatório superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente;  $A_{SB}$  corresponde a área de drenagem da sub-bacia, em  $\text{m}^2$ ;  $V_s$ ,  $V_{ss}$  e  $V_B$  representam os volumes nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, em  $\text{m}^3$ , respectivamente;  $C_s$  (adimensional),  $C_{ss}$  (adimensional) e  $C_B$  (dias) são os parâmetros de calibração da propagação nos

reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente; e  $T_c$  é o tempo de concentração da sub-bacia, em segundos. É importante destacar que para as sub-bacias da BHRX, o tempo de concentração foi calculado considerando a equação de Giandotti (1940), dada por:

$$T_c = \frac{1,5 \cdot L + 4 \cdot \sqrt{A_{SB}}}{0,80 \cdot \sqrt{h}} \quad (12)$$

Em que,  $T_c$  é o tempo de concentração da sub-bacia, em horas; L corresponde ao maior comprimento do curso d'água, em km;  $A_{SB}$  corresponde a área de drenagem da sub-bacia, em km<sup>2</sup>; e h é o desnível entre a altitude média e o ponto mais baixo do curso d'água principal, em m.

A vazão estimada em cada passo de tempo adotado, em cada sub-bacia, é dada, no modelo LASH, pelo somatório das vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo. A vazão estimada no exutório de uma sub-bacia atingirá a rede de drenagem a jusante e será propagada pelos canais até o próximo exutório. Posteriormente, será acrescida à vazão estimada no exutório da sub-bacia a jusante e propagada novamente pelos canais de drenagem, até todas as sub-bacias terem contribuído para a vazão de saída no exutório da bacia hidrográfica de análise.

A versão do modelo LASH de Caldeira (2016) realiza a propagação de vazões nos rios pelo método de Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969). Entretanto, para esse estudo, o módulo de propagação de vazões foi adaptado considerando o método da Onda Cinemática (LIGHTHILL; WHITHAM, 1955a, 1955b). A Onda Cinemática é um modelo hidráulico de propagação da onda de cheia e descreve o ESD com variação lenta ao longo do curso d'água (JETTEN, 2018). No método da Onda Cinemática, o movimento da onda é descrito pelas equações de *Saint-Venant*, a equação de continuidade (Equação 13), enquanto que os termos de aceleração e pressão na equação do momento (Equação 14) são desprezíveis (Equação 15) (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (13)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g \cdot (S_0 - S_f) = 0 \quad (14)$$

$$S_0 = S_f \quad (15)$$

Em que Q é a vazão, x é o intervalo espacial, A é a área, t é o intervalo de tempo, q é a vazão de entrada lateral, g é a aceleração da gravidade, S<sub>0</sub> o termo referente à gravidade e S<sub>f</sub>, o termo referente ao atrito.

As equações de continuidade e momento para Onda Cinemática podem ser combinadas e resultam na Equação 16, tendo como única variável dependente a vazão (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (16)$$

em que α e β são parâmetros do canal.

As equações de *Saint-Venant* para propagação de cheias não possuem solução analítica. Desta forma, são necessárias utilizações de esquemas numéricos para solucionar as equações diferenciais parciais em um conjunto de equações algébricas de diferenças finitas, que podem ser lineares ou não lineares (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Após incorporar a forma finita da Equação 16 e o rearranjo dos termos, tem-se a equação referente ao esquema não-linear da Onda Cinemática:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha (Q_{i+1}^{j+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha (Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \left( \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (17)$$

A Equação 17 é resolvida de forma implícita, seguindo as diretrizes desenvolvidas por Paiva (2007) em MATLAB®. Paiva (2007) descreve que, os dados necessários à função são: o hidrograma de entrada, o intervalo de tempo, o número de subtrechos em que o curso d'água será dividido, o coeficiente de rugosidade de Manning, o comprimento, a largura e a declividade do curso d'água. É importante destacar que essa função não faz uso da vazão de entrada lateral (q = 0).

### **4.3 Base de dados espaciais utilizada na modelagem hidrológica**

O modelo LASH requer informações associadas à fisiografia da bacia hidrográfica. Para compor a base de dados espaciais do modelo, foram levantadas informações sobre o relevo, classes de solo e classes de uso e cobertura do solo. Na versão do modelo LASH empregada nesse estudo, a sub-bacia hidrográfica é a unidade de discretização para análise dos processos hidrológicos e de definição das variáveis médias associadas aos dados espaciais e temporais.

Inicialmente, para determinação do relevo da BHRX foram utilizadas informações provenientes da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90m. O Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo da missão SRTM foi obtido junto ao *United States Geological Survey* (USGS). A partir deste MDE, foi obtido o MDE Hidrologicamente Consistente (MDEHC), por meio do preenchimento das depressões espúrias. As altitudes da BHRX, segundo o MDEHC obtido, variaram de 86 a 847m, conforme apresentado na Figura 7.

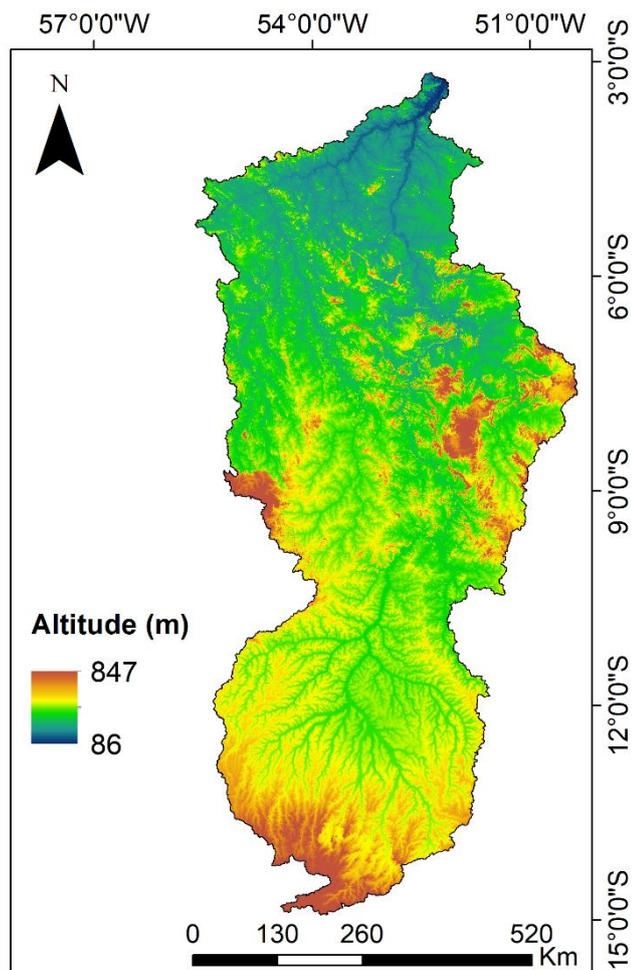


Figura 7 - Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC) da bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX).

Posteriormente, para a obtenção das sub-bacias, foi obtida as direções de fluxo do escoamento a partir do MDEHC (Figura 8a), utilizando a ferramenta “*Flow Direction*” da *toolbox* “*Hydrology*” no sistema de informações geográficas (SIG) ArcGIS 10.5. Esta etapa considera o algoritmo de Jenson; Domingue (1988), o qual determina uma única direção de fluxo para cada pixel do MDEHC de acordo com a maior declividade em relação aos pixels vizinhos. Utilizando a ferramenta “*Flow Accumulation*” foram obtidos os fluxos acumulados (Figura 8b), dados pelo somatório de pixels drenados até o pixel de análise a partir das direções de fluxo estabelecidas.

Segundo a metodologia utilizada por Ozdemir; Bird (2009), a hidrografia da BHRX foi gerada a partir da determinação do limiar de área de drenagem necessária para a formação decursos d’água. O limiar de drenagem possui impacto no número de cursos d’água e de confluências gerados e, conseqüentemente, no número de sub-bacias geradas. O valor do limiar utilizado foi de 350.000 células, a partir do mapa de

fluxo acumulado, utilizando a ferramenta “*Raster Calculator*”. A hidrografia gerada pode ser observada na Figura 8c.

Uma vez gerada a hidrografia, foram atribuídos valores aos cursos d’água a fim de discretizar a hidrografia entre as interseções, utilizando a ferramenta “*Stream Link*”. Por fim, as informações de direções de fluxo e a hidrografia discretizada foram inseridas na ferramenta “*Watershed*” obtendo a delimitação de 91 sub-bacias hidrográficas, com áreas variando entre 264,0 e 15.869,3 km<sup>2</sup>, para modelagem hidrológica da BHRX. A disposição das sub-bacias pode ser observada na Figura 8d.

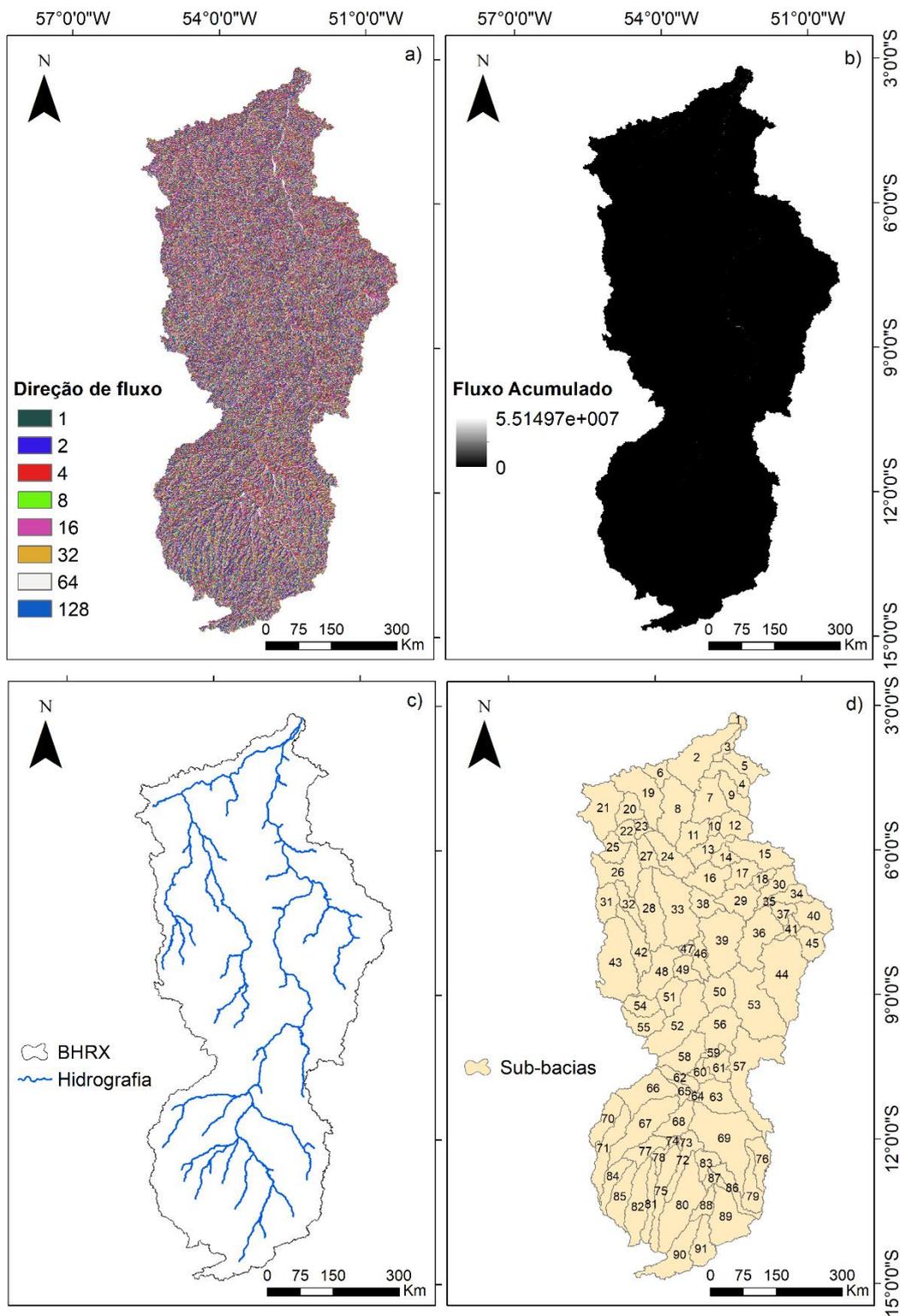


Figura 8 - a) Direções de fluxo obtidas para a bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX); b) acúmulos de fluxos obtidos para a BHRX; c) hidrografia gerada a partir do limiar de drenagem estabelecido para a BHRX; d) sub-bacias hidrográficas delimitadas para modelagem hidrológica na BHRX.

As características das sub-bacias hidrográficas delimitadas requeridas para modelagem hidrológica, tais como, área (A), latitude do centroide, altitude média, comprimento do curso d'água principal (L) e o  $T_c$  podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das sub-bacias hidrográficas delimitadas para a modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: área (A), latitude do centroide, altitude média da bacia, comprimento do curso d'água principal (L) e o tempo de concentração da bacia ( $T_c$ ) calculado pela equação de Giandotti (1940).

Sub-bacia	A (km <sup>2</sup> )	Latitude Centroides (graus)	Altitude média (m)	L (km)	$T_c$ (min)
1	918,24	-3,32	157,53	20,94	1.353,43
2	10.362,18	-4,07	186,96	239,58	5.962,92
3	1.543,39	-3,86	163,56	89,22	2.616,58
4	3.554,93	-4,46	202,61	55,75	2.916,64
5	3.223,39	-4,26	216,93	27,00	2.203,98
6	2.168,38	-4,40	215,14	44,69	2.284,76
7	6.338,38	-4,98	201,43	114,54	4.769,85
8	2.893,18	-4,67	216,76	3,26	1.722,86
9	3.727,70	-4,87	214,74	45,66	2.749,84
10	1.056,46	-5,51	212,79	33,30	1.875,67
11	4.179,02	-5,71	244,87	30,22	2.503,87
12	3.773,43	-5,50	227,67	14,62	2.477,03
13	3.656,71	-5,99	255,66	51,28	2.470,70
14	2.237,01	-6,16	229,78	60,46	2.649,22
15	6.438,08	-6,09	290,79	108,62	3.261,89
16	5.552,08	-6,60	269,16	85,34	3.346,77
17	3.602,23	-6,50	267,07	75,89	2.812,38
18	1.624,87	-6,61	251,39	39,46	1.984,68
19	8.093,37	-4,81	227,66	102,07	4.544,55
20	3.087,31	-5,15	228,18	76,22	3.309,70
21	8.597,80	-5,12	242,39	98,44	4.571,22
22	2.000,38	-5,62	241,09	60,74	2.634,36
23	1.256,09	-5,53	227,53	46,09	2.344,18
24	5.577,62	-6,12	264,04	109,65	3.932,60
25	3.228,36	-5,97	255,99	33,14	2.501,07
26	6.907,16	-6,41	255,45	137,12	4.878,12
27	3.125,29	-6,13	244,40	91,49	3.541,49
28	8.201,31	-7,25	294,52	146,32	4.247,28
29	5.121,07	-7,06	292,03	98,42	3.130,84
30	3.899,62	-6,73	250,92	52,28	3.234,44
31	3.689,36	-7,08	274,11	11,01	2.275,98
32	2.875,53	-7,09	272,76	105,76	3.303,61
33	12.033,86	-7,23	287,65	240,79	6.040,90
34	2.910,40	-6,95	321,31	11,20	1.577,38
35	263,99	-7,09	234,63	16,94	1.135,89
36	8.703,62	-7,82	392,22	144,98	3.195,11

37	2.053,98	-7,29	277,65	70,72	2.445,81
38	3.472,81	-7,12	288,37	42,82	2.315,78
39	11.351,06	-7,88	311,71	177,32	4.784,73
40	5.118,80	-7,39	388,69	31,74	2.012,87
41	1.543,63	-7,65	331,27	64,66	1.932,62
42	5.275,58	-7,93	306,78	117,02	3.648,71
43	13.080,80	-8,33	338,77	167,91	4.782,14
44	14.308,34	-8,59	361,98	183,57	5.205,02
45	3.593,69	-7,94	360,91	18,26	1.853,26
46	2.840,22	-8,23	313,26	1,00	1.893,97
47	822,00	-8,05	297,33	49,59	1.889,37
48	6.747,34	-8,52	335,27	111,86	4.104,26
49	2.794,43	-8,48	314,59	76,42	3.116,25
50	4.924,03	-8,95	313,21	51,20	3.051,34
51	3.682,82	-9,02	320,16	108,00	4.050,88
52	11.466,73	-9,55	332,78	158,61	6.024,98
53	13.721,95	-9,22	339,67	183,51	5.478,97
54	3.124,32	-9,23	388,73	6,85	1.722,15
55	3.925,19	-9,57	378,83	42,71	2.436,34
56	7.163,08	-9,71	311,27	119,78	4.886,21
57	13.624,62	-10,60	309,09	233,96	7.847,84
58	6.040,39	-10,24	335,01	51,83	3.458,86
59	913,10	-10,20	307,74	26,85	1.827,35
60	1.750,39	-10,62	313,04	68,92	2.960,31
61	2.967,70	-10,50	311,85	5,12	2.471,99
62	2.263,42	-10,72	332,23	26,90	2.175,49
63	5.437,51	-11,13	322,43	25,43	3.417,88
64	505,38	-11,12	306,43	32,00	1.737,72
65	1.277,62	-11,01	322,10	50,37	2.292,89
66	7.005,04	-11,00	339,76	157,68	5.365,89
67	9.559,76	-11,71	341,95	138,25	5.527,19
68	4.255,83	-11,64	317,11	112,12	4.791,77
69	15.869,36	-11,99	324,89	197,26	8.326,83
70	4.050,76	-11,56	349,87	36,80	3.054,21
71	6.243,62	-12,17	370,39	145,54	4.526,71
72	3.951,37	-12,44	330,15	72,92	3.579,64
73	302,04	-12,08	304,89	5,33	1.029,44
74	432,31	-12,05	306,36	31,66	1.946,10
75	6.029,92	-13,07	393,32	123,59	3.510,10
76	3.676,10	-12,42	346,41	37,60	3.096,76
77	3.371,88	-12,21	337,29	119,46	4.395,61
78	1.331,67	-12,38	333,37	63,39	2.683,99
79	4.219,53	-13,02	368,69	95,05	3.492,21
80	11.600,09	-13,37	394,06	170,85	4.846,55
81	3.220,11	-13,31	418,04	35,93	1.906,92
82	7.087,30	-13,34	425,98	125,35	3.452,11

83	2.471,25	-12,49	317,11	67,62	3.747,95
84	3.474,93	-12,85	391,60	36,41	2.301,03
85	5.105,71	-13,18	412,66	56,35	2.640,44
86	2.914,36	-13,02	359,88	13,44	2.118,22
87	1.533,63	-12,88	338,09	66,29	2.769,66
88	2.126,79	-13,38	361,05	107,15	3.340,96
89	8.621,75	-13,66	379,67	101,53	4.428,51
90	7.240,69	-14,40	501,44	137,50	3.069,01
91	4.330,46	-14,19	412,87	61,12	2.807,72

A espacialização das classes de solo da BHRX foi desenvolvida com base no Mapa de Solos da Floresta Amazônica Legal publicado pela Diretoria de Geociências do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2012, a qual possui escala de 1:250.000 (IBGE, 2012). As classes de solos predominantes na BHRX são Argissolo e Latossolo, compreendendo 53,1 e 26,4% da área da bacia, respectivamente. Também estão presentes na bacia as classes Cambissolo (2,7%), Gleissolo (3,2%), Neossolo (10,4%), Nitossolo (2,3%), Organossolo (0,0006%) e Plintossolo (1,8%), conforme ilustrado na Figura 9.

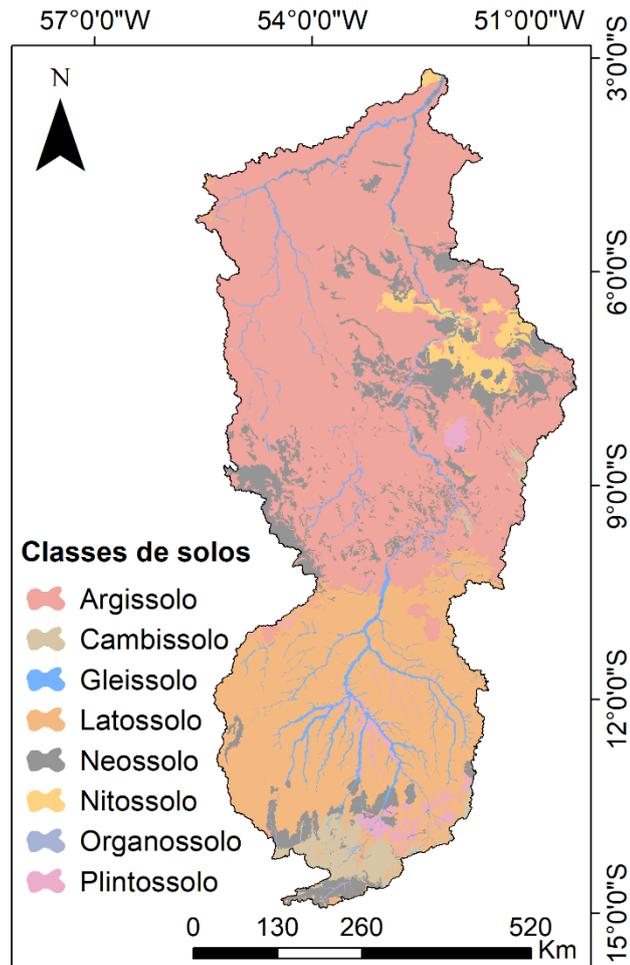


Figura 9 – Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX), adaptado de IBGE (2012).

Para cada classe de solo especificada na bacia, o modelo LASH requer informações de profundidade do solo ( $Z$ ), umidade do solo no ponto de saturação ( $\theta_s$ ) e umidade do solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ). Os valores de referência das informações requeridas foram extraídos de um banco de dados físico-hídrico dos solos para o Brasil, denominado *Hydrophysical database for Brazilian Soils 1.0* (HYBRAS) (OTTONI *et al.*, 2018) e, também, de outros estudos encontrados na literatura. Os valores de  $Z$ ,  $\theta_s$  e  $\theta_{pmp}$  e as respectivas referências consultadas estão apresentados na Tabela 2. Para a modelagem hidrológica foram extraídos os valores médios destes atributos de acordo com as classes de solo de ocorrência em cada uma das 91 sub-bacias hidrográficas da BHRX.

Tabela 2 - Valores adotados de profundidade, umidade do ponto de saturação ( $\theta_s$ ) e umidade do ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) para cada classe do solo da bacia do rio Xingu, bem como, suas referências.

Classe	Profundidade (mm)	$\theta_s$	$\theta_{pmp}$	Referência
Argissolo	1833,33	0,48	0,27	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Cambissolo	342,73	0,61	0,32	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Gleissolo	180,00	0,62	0,32	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Latossolo	2153,33	0,50	0,28	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Neossolo	483,33	0,36	0,14	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Nitossolo	2000,00	0,53	0,34	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Organossolo	655,00	0,64	0,37	Ottoni <i>et al.</i> , (2018)
Plintossolo	900	0,22	0,003	O'Coffee (2019)

A BHRX é localizada em uma região de transição entre os biomas Floresta Amazônica e Cerrado, conforme a Figura 10a. No entanto, 92,3% da área da bacia é compreendida no bioma amazônico, enquanto que o bioma Cerrado compreende 7,7%. As classes de uso do solo presentes na BHRX foram extraídas do projeto Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas), que visa disponibilizar mapas de uso e cobertura do solo para todo país a cada ano, a partir da classificação dos mosaicos Landsat. O mapa de classes de uso do solo utilizado para caracterizar as informações da BHRX foi do ano de 2000, o qual também foi tomado como referência para as análises dos impactos de mudanças no uso do solo na bacia. A classe de uso do solo predominante na BHRX é de floresta nativa, compreendendo 86,5% da área total da bacia. O restante é compreendido pelas classes de cultivo de soja (0,6%), vegetação rasteira (2,5%), pastagem (9,6%), solo exposto (0,08%), urbanização (0,007%) e corpos d'água (0,8%), conforme ilustrado na Figura 10b.

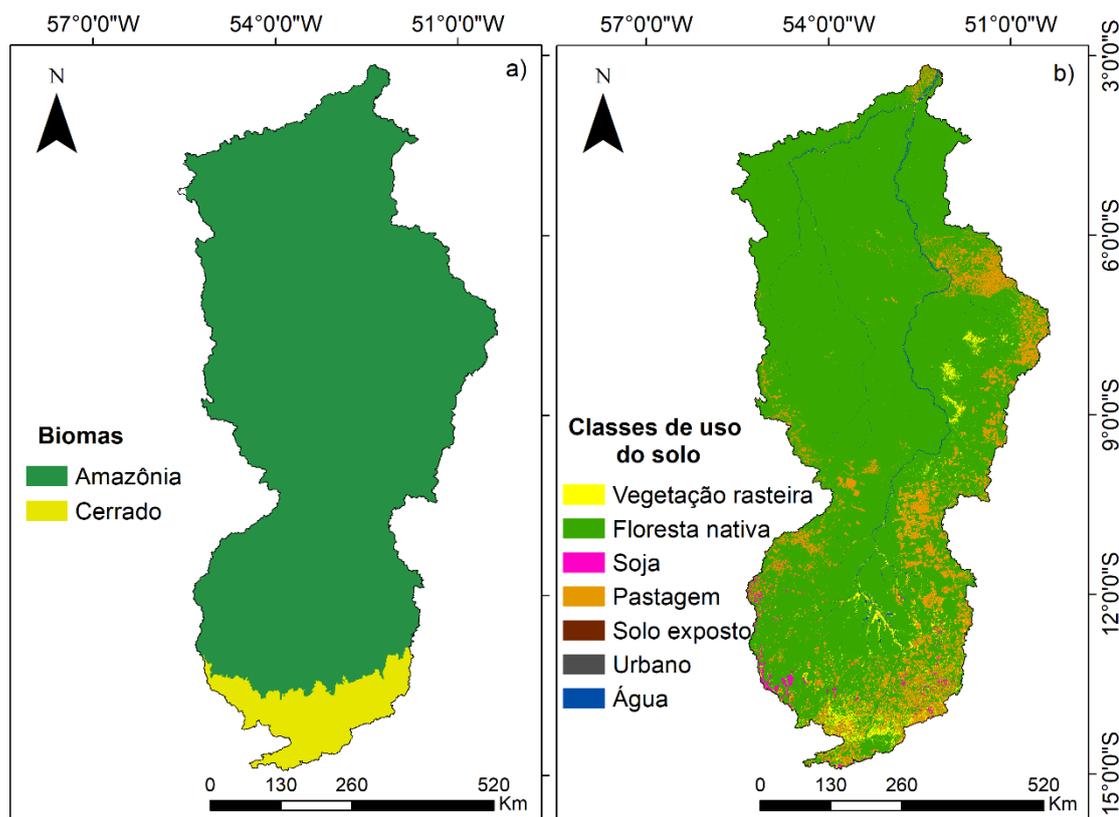


Figura 10 – a) Mapa da espacialização dos biomas que compreendem a BHRX, elaborado a partir das informações disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). b) Mapa da espacialização das classes de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX), extraídas do projeto Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas);

As informações requeridas pelo modelo LASH para cada classe de uso do solo são: índice de área foliar (IAF); altura das plantas (h); resistência estomática (RE); e profundidade do sistema radicular ( $Z_{SR}$ ). De acordo com Caldeira (2016), a modelagem pode considerar a variabilidade temporal das informações ao longo do ano. Os valores das informações requeridas pelo modelo LASH foram obtidas a partir da literatura, conforme apresentado na Tabela 3. Foram considerados os valores médios de cada parâmetro de acordo com as classes de uso do solo de ocorrência em cada sub-bacia da BHRX, considerando a variabilidade mensal ao longo do ano.

Tabela 3 - Valores das informações de albedo, altura, índice de área foliar, resistência estomática e profundidade do sistema radicular de cada classe do uso do solo requeridas pelo modelo LASH, bem como, suas referências

Classe	Mês	Albedo (adimensional)	Altura (m)	Índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ )	Resistência Estomática ( $s.m^{-1}$ )	Profundidade do sistema radicular (mm)
Floresta nativa	janeiro	0,13	10	6,25	140	2000
	fevereiro	0,13	10	6,25	140	2000
	março	0,14	10	6,25	140	2000

	abril	0,15	10	6,25	140	2000
	maio	0,16	10	6,25	140	2000
	junho	0,17	10	6,25	140	2000
	julho	0,18	10	6,25	140	2000
	agosto	0,18	10	6,25	140	2000
	setembro	0,17	10	6,25	140	2000
	outubro	0,16	10	6,25	140	2000
	novembro	0,15	10	6,25	140	2000
	dezembro	0,14	10	6,25	140	2000
	Referência	a	b	c	d	e
Vegetação Rasteira	janeiro	0,2	0,5	0,5	65	500
	fevereiro	0,21	0,5	0,5	65	500
	março	0,22	0,5	0,5	65	500
	abril	0,23	0,5	0,5	65	500
	maio	0,24	0,5	0,5	65	500
	junho	0,25	0,5	0,5	65	500
	julho	0,26	0,5	0,5	65	500
	agosto	0,25	0,5	0,5	65	500
	setembro	0,24	0,5	0,5	65	500
	outubro	0,23	0,5	0,5	65	500
	novembro	0,22	0,5	0,5	65	500
	dezembro	0,21	0,5	0,5	65	500
	Referência	g	h	i	j	k
Pastagem	janeiro	0,2	0,5	3,99	60	500
	fevereiro	0,21	0,5	3,99	60	500
	março	0,22	0,5	3,99	70	500
	abril	0,23	0,5	3,21	70	500
	maio	0,24	0,5	3,21	70	500
	junho	0,25	0,5	3,21	80	500
	julho	0,26	0,5	1,86	80	500
	agosto	0,25	0,5	1,86	80	500
	setembro	0,24	0,5	1,86	80	500
	outubro	0,23	0,5	2,67	80	500
	novembro	0,22	0,5	2,67	80	500
	dezembro	0,21	0,5	2,67	60	500
	Referência	g	h	l	m	k
Cultivo de soja	janeiro	0,15	0,80	1,8	60	500
	fevereiro	0,17	1,10	0,4	60	500
	março	0,17	1,10	0,8	60	500
	abril	0,23	0,00	1,7	70	500
	maio	0,23	0,00	3,1	70	500
	junho	0,22	0,00	3,5	80	500
	julho	0,17	0,00	4,7	80	500
	agosto	0,15	0,00	5,5	80	500
	setembro	0,15	0,00	7	90	500

	outubro	0,15	0,00	6,7	80	500
	novembro	0,15	0,20	5,1	70	500
	dezembro	0,15	0,50	3,9	60	500
	Referência	n	h	o	m	k
Solo exposto	janeiro	0,35	0	0	545,3	500
	fevereiro	0,35	0	0	545,3	500
	março	0,22	0	0	545,3	500
	abril	0,22	0	0	545,3	500
	maio	0,22	0	0	545,3	500
	junho	0,1	0	0	545,3	500
	julho	0,1	0	0	545,3	500
	agosto	0,1	0	0	545,3	500
	setembro	0,22	0	0	545,3	500
	outubro	0,22	0	0	545,3	500
	novembro	0,22	0	0	545,3	500
	dezembro	0,35	0	0	545,3	500
	Referência	g			p	p
Urbanização	janeiro	0,35	0	0	545,3	500
	fevereiro	0,35	0	0	545,3	500
	março	0,22	0	0	545,3	500
	abril	0,22	0	0	545,3	500
	maio	0,22	0	0	545,3	500
	junho	0,1	0	0	545,3	500
	julho	0,1	0	0	545,3	500
	agosto	0,1	0	0	545,3	500
	setembro	0,22	0	0	545,3	500
	outubro	0,22	0	0	545,3	500
	novembro	0,22	0	0	545,3	500
	dezembro	0,35	0	0	545,3	500
	Referência	g			p	p
Corpos d'água	janeiro	0,124	0	0	0	0
	fevereiro	0,124	0	0	0	0
	março	0,124	0	0	0	0
	abril	0,124	0	0	0	0
	maio	0,124	0	0	0	0
	junho	0,124	0	0	0	0
	julho	0,124	0	0	0	0
	agosto	0,124	0	0	0	0
	setembro	0,124	0	0	0	0
	outubro	0,124	0	0	0	0
	novembro	0,124	0	0	0	0
	dezembro	0,124	0	0	0	0
	Referência	q				

\* a - Miranda *et al.*, (1996); b - Collischonn (2001); c - Marques Filho; Dallarosa; Pachêco (2005); d – Andrew; Dymond (2007); e – Viola (2008); f - Manfron et al. (2003); g - Shuttleworth (1993); h – Barros

(2016); i – Caldeira (2019); j - Bathurst et al., (2011); k - Allen et al. (1998); l – Fagundes *et al.*, (2006); m - Ruhoff *et al.*, (2013); n – Souza *et al.*, (2010); p – Viola *et al.* (2014); r – Leivas *et al.* (2007).

#### **4.4 Base de dados temporais utilizada na modelagem hidrológica**

Foram utilizadas séries históricas de vazão, precipitação e de outras variáveis meteorológicas para compor a base de dados temporais do modelo LASH. As séries de vazões médias diárias foram obtidas junto à ANA, a partir do portal HydroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas. As séries obtidas correspondem ao exutório da BHRX (18901080) e a um exutório de sub-bacia hidrográfica à montante, conforme apresentado na Figura 11. A sub-bacia da BHRX selecionada foi a bacia do rio Iriri (BHRI) com exutório na estação Porto de Moz (18700000). As informações das estações fluviométricas utilizadas estão contidas na Tabela 4.

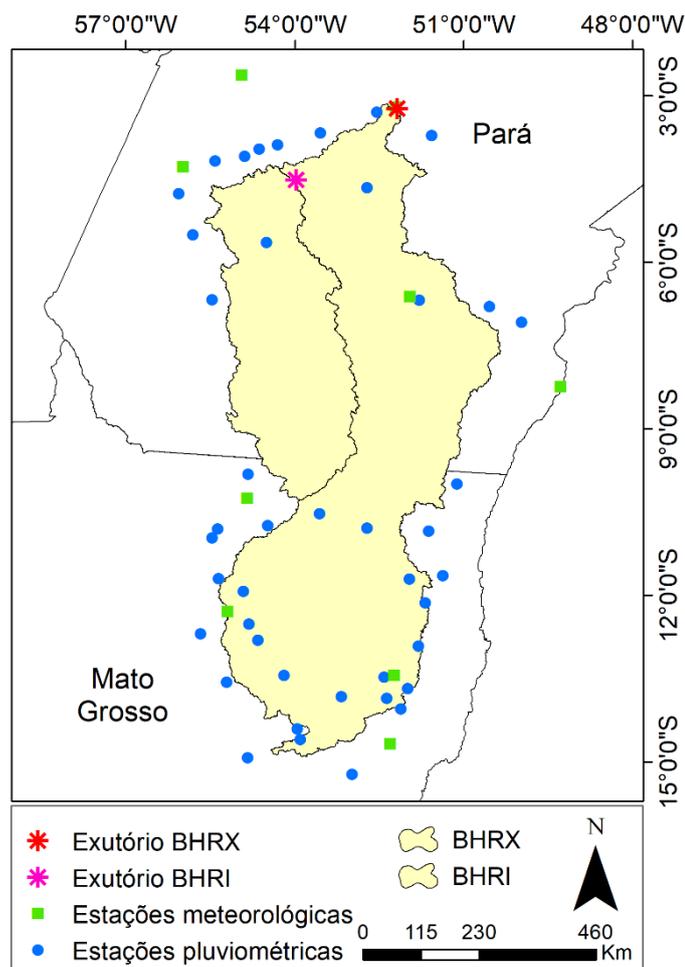


Figura 11 - Localização das estações de monitoramento hidrológico empregadas neste estudo. Ademais, localização da bacia do rio Iriri (BHRI) com exutório na estação Porto de Moz (18700000).

Tabela 4 - Informações das estações fluviométricas empregadas no estudo.

Bacia	Código	Nome da Estação	Rio	Área (Km <sup>2</sup> )	Responsável	UF	Extensão da série histórica
BHRX	18850000	Altamira	Xingu	448.022,80	ANA	PA	1968 - 2020
BHRI	18700000	Pedra do Ó	Iriri	122.432,86	ANA	PA	1976 - 2020

Nas séries de vazões, o teste de tendência de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945) foi aplicado a fim de verificar a estacionariedade da série histórica. Para aplicação deste teste, as séries foram trabalhadas com o software *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (VARGAS *et al.*, 2019), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq, constituindo séries de vazões médias anuais com limiar de falhas de 31 dias. O procedimento de aplicação do teste foi realizado no MATLAB<sup>®</sup>, utilizando

a função MKMiss (TEASAM LEE, 2019) ao nível de 5% de significância com premissas para utilizar a série com falhas, i.e. “NaN”.

As séries históricas de precipitação total diária também foram obtidas no portal HidroWeb. Foram selecionadas estações pluviométricas de acordo com a área de influência de precipitação, conforme a metodologia dos Polígonos de Thiessen (THIESSEN; ALTER, 1911), na BHRX. Da mesma forma, as séries das variáveis meteorológicas de temperatura mínima ( $T_{\min}$ ) e máxima ( $T_{\max}$ ), insolação (R), umidade relativa média (UR) e velocidade do vento média (VV), as quais foram selecionadas e obtidas junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto de Nacional de Meteorologia (INMET). As informações das estações pluviométricas e meteorológicas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Informações das estações pluviométricas e meteorológicas empregadas neste estudo.

Código	Nome	Responsável	UF	Variável	Extensão das séries históricas
00351002	Fazenda Cipauba	ANA	PA	P	1981-2019
00352005	Brasil Novo	ANA	PA	P	1982-2019
00353000	Uruará	ANA	PA	P	1977-2019
00354000	Sítio São Pedro	ANA	PA	P	1977-2019
00452000	Monte Alegre do Xingu	ANA	PA	P	1976-2019
00454001	Fazenda Marcondes	ANA	PA	P	1982-2019
00455002	Cupari	ANA	PA	P	1977-2019
00455003	Km 1385 Br-163	ANA	PA	P	1980-2019
00455004	Rurópolis Presidente Médici	ANA	PA	P	1982-2019
00554000	Cajueiro	ANA	PA	P	1975-2019
00555002	Km 1130 Br-163	ANA	PA	P	1986-2019
00650001	Fazenda Caicara	ANA	PA	P	1984-2020
00651001	Boa Esperança	ANA	PA	P	1976-2020
00655003	Jamanxim	ANA	PA	P	1993-2019
00749002	Xinguara	ANA	PA	P	1984-2019
00951000	Vila Rica	ANA	MT	P	1983-2020
00954001	Cachimbo	ANA	MT	P	1984-2019
01051001	Porto Alegre Do Norte	ANA	MT	P	1983-2020
01052000	Vila São Jose Do Xingu	ANA	MT	P	1976-2019
01053001	Fazenda Santa Emília	ANA	MT	P	1976-2018
01054000	Agropecuária Cajabi	ANA	MT	P	1976-2019
01055002	Colíder	ANA	MT	P	1982-2019
01055003	Fazenda Tratex	ANA	MT	P	1994-2019
01151000	Bate Papo	ANA	MT	P	1983-2020
01152000	Suia Liquilândia	ANA	MT	P	1976-2018
01154001	Santa Felicidade	ANA	MT	P	1982-2019
01156001	Sinop (Fazenda Sempre Verde)	ANA	MT	P	1983-2020

01251000	Alo Brasil	ANA	MT	P	1982-2019
01251001	Divinea	ANA	MT	P	1982-2019
01254001	Agrovensa	ANA	MT	P	1982-2017
01255001	Teles Pires	ANA	MT	P	1976-2020
01255002	Núcleo Colonial Rio Ferro	ANA	MT	P	1979-2019
01352000	Fazenda Sete De Setembro	ANA	MT	P	1985-2019
01352001	Garapu	ANA	MT	P	1985-2019
01352002	Serra Dourada	ANA	MT	P	1985-2019
01353001	Estancia Rodeio	ANA	MT	P	1985-2019
01354000	Fazenda Agrochapada	ANA	MT	P	1976-2019
01355001	Porto Roncador	ANA	MT	P	1985-2020
01452004	Água Boa	ANA	MT	P	1982-2019
01453000	Passagem Da Br-309	ANA	MT	P	1976-2019
01454000	Paranatinga	ANA	MT	P	1973-2020
01454002	Nova Brasilândia	ANA	MT	P	1983-2019
01552002	Toriquete	ANA	MT	P	1971-2019
82353	Altamira	INMet	PA	M/P	1995-2019
82668	São Felix Do Xingu	INMet	PA	M/P	1995-2019
82445	Itaituba	INMet	PA	M/P	1995-2019
82246	Belterra	INMet	PA	M/P	1995-2019
83214	Matupá	INMet	MT	M/P	1995-2019
82861	Conceição Do Araguaia	INMet	PA	M/P	1995-2019
83264	Gleba Celeste	INMet	MT	M/P	1995-2014
83270	Canarana	INMet	MT	M/P	1995-2019
83319	Nova Xavantina	INMet	MT	M/P	1995-2019
83358	Poxoréo	INMet	MT	M/P	1995-2019

As séries históricas médias para as sub-bacias da BHRX foram computadas com base nas áreas de influência de cada estação pluviométrica e meteorológica caracterizadas pelos Polígonos de Thiessen. As áreas de influência das estações pluviométricas podem ser observadas na Figura 12a, assim como, as áreas das estações meteorológicas estão apresentadas na Figura 12b.

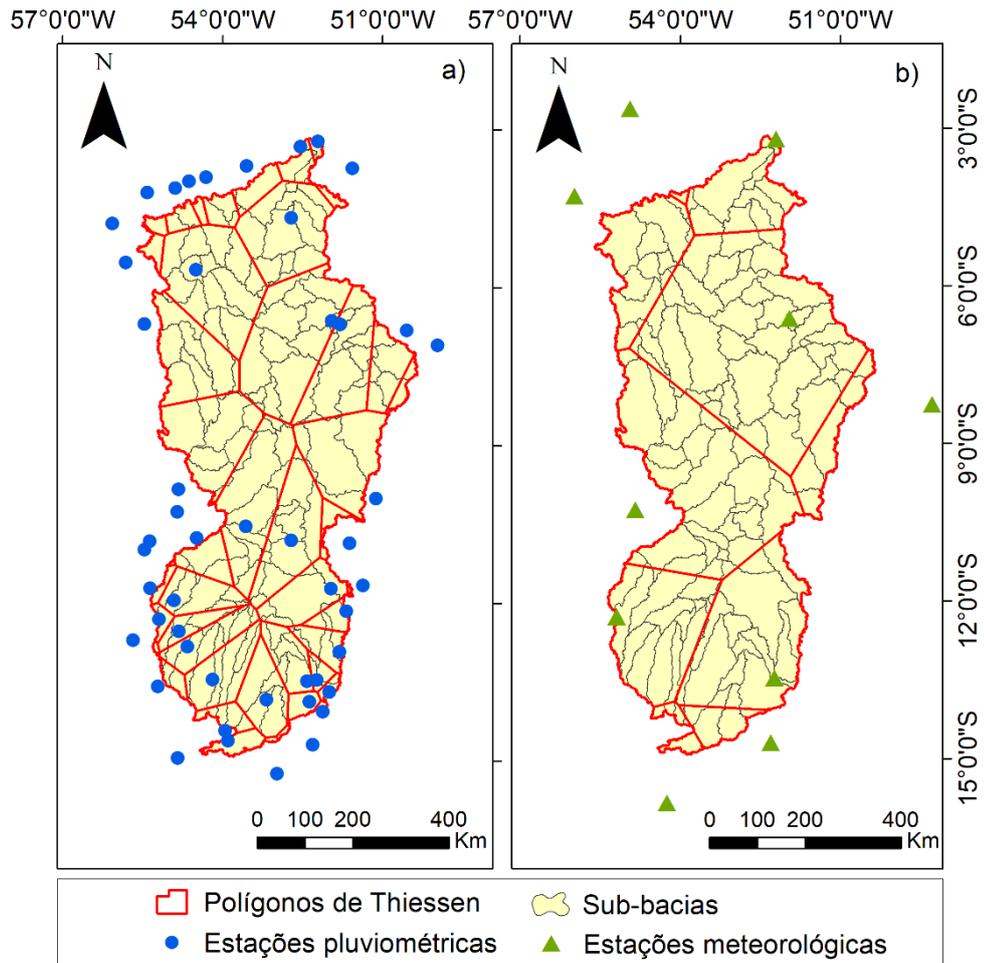


Figura 12 - Polígonos de Thiessen delimitados para computar as áreas de influência das estações a) pluviométricas e b) meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Xingu.

#### 4.5 Base de dados utilizada no módulo de propagação de cheias

As informações necessárias no modelo LASH para compor a base de dados do módulo de propagação das cheias nos cursos d'água foram computados em ambiente SIG Arcgis 10.5 (ESRI, 2014). Para calcular os parâmetros dos trechos de propagação dos cursos d'água na BHRX, foi utilizada a integração do componente ArchIDRO e do pacote hidrológico HEC-GeoHMS (USACE, 2013).

As informações de entrada requeridas no módulo de propagação de cheias nos cursos d'água pelo modelo LASH são: i) comprimento do trecho ( $X_L$ ), ii) declividade do trecho ( $S_0$ ); iii) largura do trecho ( $B$ ); e iv) as relações de influência de cada sub-bacia em cada trecho de curso d'água. Na Figura 13, pode ser observado o layout de integração das 91 sub-bacias nos trechos dos cursos d'água da BHRX. A partir do

layout apresentado, pôde-se verificar quais sub-bacias drenam para um determinado trecho e quais trechos drenam para outros trechos de curso d'água.

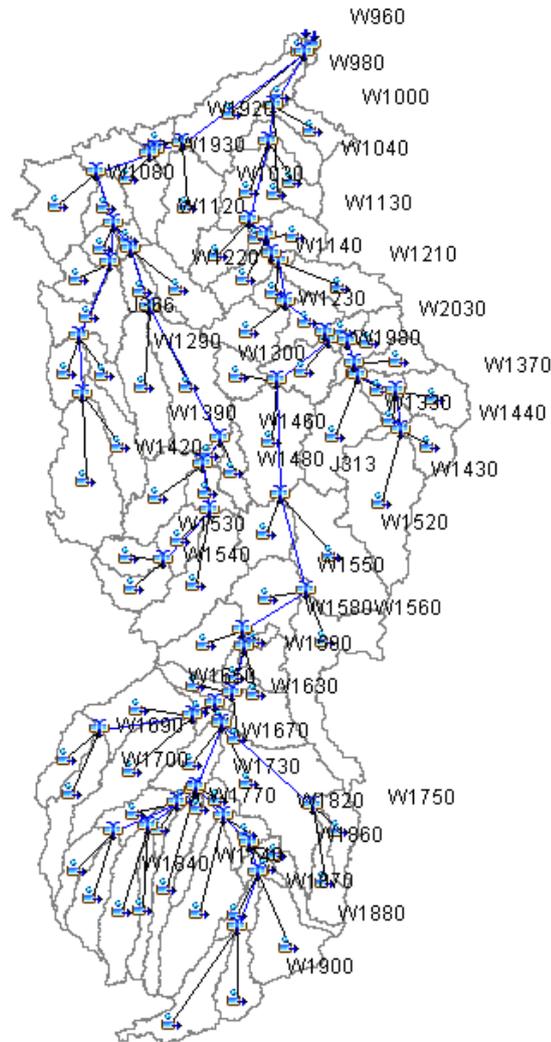


Figura 13 - Representação das sub-bacias hidrográficas e dos trechos de cursos d'água na bacia hidrográfica do rio Xingu obtidas a partir do pacote hidrológico HEC-GeoHMS.

Os parâmetros  $X_L$  e  $S_0$  foram computados a partir do pacote hidrológico HEC-GeoHMS. O parâmetro  $B$  foi obtido visualmente para cada trecho utilizando a ferramenta “Régua” do *Google Earth Pro*. Na Tabela 6, estão apresentadas as informações de entrada requeridas pelo módulo de propagação de cheias nos cursos d'água do modelo LASH computadas para a BHRX.

Tabela 6 - Informações computadas para entrada no módulo de propagação de cheias para a bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: ordem de ocorrência dos trechos considerada para processamento no modelo LASH (ID); número do curso d'água analisado (TRECHO); comprimento do trecho ( $X_L$ ); largura do trecho (B); declividade do trecho ( $S_0$ ); bacias que drenam para o no trecho analisado ( $SB_1$  e  $SB_2$ ) e trechos que drenam para o trecho analisado ( $T_1$  e  $T_2$ ).

ID	TRECHO	$X_L$ (m)	B (m)	$S_0$ (m.m <sup>-1</sup> )	$SB_1$	$SB_2$	$T_1$	$T_2$
1	1	107089.0	125.7	0.0002	90	91	0	0
9	2	66243.0	244.9	0.0002	88	89	1	0
10	3	67555.0	178.5	0.0001	87	86	2	0
11	4	72855.0	443.2	0.0001	80	83	3	0
2	5	63325.0	92.7	0.0001	82	81	0	0
3	6	119414.0	76.9	0.0001	84	85	0	0
12	7	31615.0	189.6	0.0002	77	78	6	5
13	8	5267.4	166.4	0.0015	74	75	7	0
14	9	112090.0	427.3	0.0000*	73	72	8	4
4	10	197192.0	92.0	0.0001	79	76	0	0
15	11	31935.0	670.8	0.0001	68	69	9	10
5	12	157617.0	69.9	0.0001	70	71	0	0
16	13	50327.0	204.9	0.0001	66	67	12	0
17	14	26853.0	637.6	0.0001	65	64	13	11
18	15	68854.0	710.3	0.0000*	62	63	14	0
19	16	26782.0	696.1	0.0001	60	61	15	0
20	17	119735.0	910.0	0.0001	58	59	16	0
21	18	183460.0	1093.3	0.0001	56	57	17	0
22	19	177256.0	1434.1	0.0002	50	53	18	0
23	20	98249.0	1619.1	0.0001	38	39	19	0
6	21	64593.0	147.0	0.0002	44	45	0	0
24	22	70653.0	219.2	0.0005	41	40	21	0
25	23	16898.0	294.4	0.0001	36	37	22	0
26	24	52105.0	226.8	0.0002	34	35	23	0
27	25	39572.0	292.7	0.0001	30	0	24	0
28	26	75842.0	1504.8	0.0001	18	29	20	25
29	27	60398.0	1457.1	0.0002	16	17	26	0
30	28	41068.0	2579.3	0.0002	14	15	27	0
31	29	33241.0	1717.6	0.0000*	13	12	28	0
32	30	114480.0	1205.1	0.0002	11	10	29	0
33	31	55689.0	1590.3	0.0001	7	9	30	0
34	32	89153.0	1548.7	0.0004	4	5	31	0
7	33	107960.0	84.2	0.0002	55	54	0	0
35	34	76380.0	263.5	0.0001	51	52	33	0
36	35	49527.0	292.5	0.0002	48	49	34	0
37	36	240749.0	307.4	0.0002	47	46	35	0
38	37	91443.0	417.8	0.0000*	28	33	36	0
39	38	46045.0	450.0	0.0001	24	27	37	0
8	39	105719.0	200.3	0.0001	43	42	0	0
40	40	137073.0	242.3	0.0001	31	32	39	0
41	41	60677.0	337.7	0.0001	25	26	40	0

42	42	76160.0	926.9	0.0002	22	23	41	38
43	43	91284.0	1097.7	0.0001	21	20	42	0
44	44	44819.0	901.3	0.0002	19	0	43	0
45	45	239532.0	1102.5	0.0002	6	8	44	0
46	46	20831.0	3363.4	0.0045	2	3	45	32

\*Em casos de  $S_0 = 0,0000 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ , um valor insignificante igual a  $0,0000001 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$  foi considerado a fim de não prejudicar a resolução numérica do método da Onda Cinemática.

#### 4.6 Calibração e validação do modelo LASH

Para realizar a modelagem hidrológica na BHRX foi empregado o período de dados observados em escala diária compreendido entre os anos de 1995 a 2005, definido a partir da disponibilidade de séries hidrológicas contínuas. A modelagem hidrológica foi realizada utilizando o modelo LASH, a partir do seu código em linguagem de programação MATLAB® (MATLAB, 2019). A modelagem foi realizada considerando o passo de tempo diário, no entanto, os resultados obtidos foram computados para escala mensal para complementar a análise.

O período de 1 ano, compreendido entre 01/01/1995 a 31/12/1995, foi utilizado como aquecimento do modelo LASH, a fim de suprir as incertezas atreladas às condições hidrológicas iniciais da bacia, assim como em Beskow *et al.* (2016), Caldeira *et al.* (2019) e Mello *et al.* (2008). A calibração dos oito parâmetros do modelo LASH para a BHRX foi realizada tendo-se como base o período de 01/01/1996 a 31/12/2000. Os parâmetros que foram calibrados, de acordo com recomendações de Beskow, Mello; Norton (2011), estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de calibração do modelo LASH e intervalo de calibração considerado para modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu.

Parâmetro	Descrição	Intervalo de calibração
$\lambda$	Coefficiente de abstração inicial da chuva (adimensional)	0,01 – 0,20
$K_B$	Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (mm dia <sup>-1</sup> )	0,10 – 6,00
$K_{SS}$	Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (mm dia <sup>-1</sup> )	0,10 – 180,00
$K_{CAP}$	Densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar (mm dia <sup>-1</sup> )	0,10 – 5,00
$C_S$	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório superficial (adimensional)	1,00 – 50,00
$C_{SS}$	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório subsuperficial (adimensional)	1.000,00 – 100.000,00
$C_B$	Parâmetro do tempo de retardo do escoamento de base (dias)	1,00 – 100,00
$n$	Coefficiente de Manning (adimensional)	0,025 – 0,16

Para o ajuste de um único valor para cada parâmetro, o algoritmo de calibração automática utilizado foi o *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). Os valores de inicialização do SCE-UA serão os intervalos de calibração de cada parâmetro apresentados na Tabela 7, tendo como critério de parada um número máximo de avaliações igual a 10.000, considerando a função objetivo o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) ( $C_{NS}$ ). O  $C_{NS}$  foi escolhido como função objetivo por permitir analisar o comportamento do hidrograma ao longo do tempo. Além disso, de acordo com Guilhon; Rocha (2007), o  $C_{NS}$  verifica a eficiência do modelo para estimativas nos períodos onde observam-se vazões elevadas. O  $C_{NS}$  é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variação residual em comparação com a variação dos dados observados (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

O período de dados das séries históricas utilizado para a validação foi de 01/01/2001 a 31/12/2005. Na etapa de validação, assim como na calibração, analisa-se comparativamente os dados de vazão observados com os dados estimados pelo modelo. Desta forma, as medidas estatísticas empregadas na análise foram: o  $C_{NS}$  (Equação 18), sua versão para valores logaritmizados ( $C_{NS \log(Q)}$ ) (Equação 19) e o coeficiente  $P_{bias}$  (%) (Equação 20).

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{esti})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (18)$$

$$C_{NS \log(Q)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obsi}) - \log(Q_{esti}))^2}{(\log(Q_{obsi}) - \log(\bar{Q}_{obs}))^2} \quad (19)$$

$$P_{bias}(\%) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{esti})_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi})_i} \right] \cdot 100 \quad (20)$$

Os valores de  $C_{NS}$  variam de  $-\infty$  a 1, e, de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), valores de  $C_{NS}$  maiores que 0,75 indicam ajuste “Muito bom” dos dados observados e estimados, valores entre 0,65 e 0,75 indicam ajuste “Bom”, valores entre 0,50 e 0,65 indicam ajuste “Satisfatório” e valores de  $C_{NS}$  abaixo de 0,50 indicam ajuste “Insatisfatório”. Da mesma forma, o  $C_{NS \log(Q)}$  é classificado como proposto por Moriasi *et al.* (2007). No entanto, de acordo com Beskow (2009), o

$CNSlog(Q)$  possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões de estiagem.

O coeficiente  $P_{bias}$  mede a tendência média dos dados estimados pelo modelo hidrológico em super ou subestimar os dados observados vazão. Valores de  $P_{bias}$  próximos de zero indicam que o modelo não apresentou tendência na estimativa dos valores, sendo que, os valores negativos indicam superestimativas, enquanto que os valores positivos indicam subestimativas nos valores de vazão observados (Gupta *et al.*, 1999). Moriasi *et al.* (2007) indicam uma classificação para os valores de  $P_{bias}$ , onde,  $|P_{bias}| < 10\%$  indica ajuste “Muito bom”,  $10\% \leq |P_{bias}| < 15\%$  indica ajuste “Bom”,  $15\% \leq |P_{bias}| < 25\%$  corresponde a ajuste “Satisfatório” e  $|P_{bias}| \geq 25\%$  indica ajuste “Insatisfatório”.

Ademais, na validação do modelo LASH foi aplicado o *Proxy basin test*, que é um teste que valida a aplicação do modelo a processos estacionários com calibração e simulação em bacias distintas. Nessa situação, a validação do modelo LASH será feita no exutório da BHRX e no exutório da BHRI. O período de dados das séries históricas utilizado para esta etapa foi de 01/01/2001 à 31/12/2005.

#### **4.7 Construção e simulação dos cenários de mudanças no uso do solo**

Os cenários de mudanças no uso e de cobertura do solo desenvolvidos no presente estudo seguiram a tendência de desenvolvimento dos fatores socioeconômicos mais relevantes da BHRX. As regiões de cabeceira da BHRX vêm sendo constantemente modificadas pelo crescente desmatamento e crescimento da agropecuária (SANTOS *et al.*, 2018). As atividades agropecuárias na região de cabeceira da BHRX consistem na dinâmica da derrubada de florestas, implantação da pecuária e, posteriormente, conversão das áreas de pastagem para plantações de soja (DOMINGUES, BERMANN; MANFREDINI, 2014).

Desta forma, os cenários de mudanças no uso do solo da BHRX para simulação hidrológica foram determinados a partir de possíveis tendências de desmatamento na região amazônica. Foram estruturados e avaliados cinco cenários:

- Cenário 1 (C1): aumento de 50% das áreas de florestas nativas por áreas de pastagens, com foco nas regiões em que essa prática vem ocorrendo mais expressivamente.
- Cenário 2 (C2): aumento de 100% das áreas de florestas nativas por áreas de pastagens nas regiões em que essa prática vem ocorrendo mais expressivamente.
- Cenário 3 (C3): aumento de 50% das áreas de florestas nativas para áreas de plantio de soja, com foco nas regiões em que essa prática vem ocorrendo mais expressivamente.
- Cenário 4 (C4): aumento de 100% das áreas de florestas nativas para áreas de plantio de soja nas regiões em que essa prática vem ocorrendo mais expressivamente.
- Cenário 5 (C5): aumento de 100% das áreas de pastagem para áreas de plantio de soja nas regiões em que essa prática vem ocorrendo mais expressivamente.

Os cenários de mudanças nos usos dos solos foram construídos no ambiente SIG ArcGIS 10.5, utilizando a ferramenta denominada “*Generate Random Points*”. Esta ferramenta permitiu escolher de forma aleatória um conjunto de pontos compreendido nas classes de uso de interesse de mudança. Posteriormente, foram delimitados buffers ao redor de cada ponto, de maneira a compreender as áreas desejadas nas mudanças. Na Tabela 17, podem ser observadas as áreas de mudanças equivalentes aos cenários construídos tendo-se como base o ano 2000. Na Figura 14 estão apresentados os cenários construídos.

Tabela 8 - Áreas de ocupação de cada classe de uso do solo equivalente a cada cenário construído para simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu.

Classe	Cenário atual (km <sup>2</sup> )	C1 (km <sup>2</sup> )	C2 (km <sup>2</sup> )	C3 (km <sup>2</sup> )	C4 (km <sup>2</sup> )	C5 (km <sup>2</sup> )
Floresta Nativa	387.440,6	341.989,3	277.497,4	344.938,9	294.312,6	387.440,6
Vegetação rasteira	11.231,1	11.231,1	11.231,1	11.231,1	11.231,1	11.231,1
Soja	2.670,4	2.670,4	2.670,4	45.172,1	95.798,3	25.378,5
Pastagem	42.856,6	88.307,9	152.799,8	42.856,6	42.856,6	20.148,5
Solo exposto	357,1	357,1	357,1	357,1	357,1	357,1
Urbano	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
Água	3.434,5	3.434,5	3.434,5	3.434,5	3.434,5	3.434,5

A resposta hidrológica das mudanças dos usos do solo na BHRX será simulada para cada cenário a partir da alteração dos índices de vegetação nas regiões de mudanças. Os atributos que serão modificados são: índice de área foliar (IAF), albedo ( $\alpha$ ), resistência estomática (Re), profundidade das raízes (Pr) e altura da vegetação (h). Para análise dos impactos no ciclo hidrológico da BHRX a partir dos cenários de mudanças no uso do solo, será avaliada a correspondência dos hidrogramas de vazão média diária frente ao cenário atual e das curvas de permanência. Ademais, os valores médios anuais de alguns componentes hidrológicos também serão avaliadas para cada cenário, tais como, deflúvio superficial, deflúvio de base, evapotranspiração real, interceptação e armazenamento atual de água no solo.

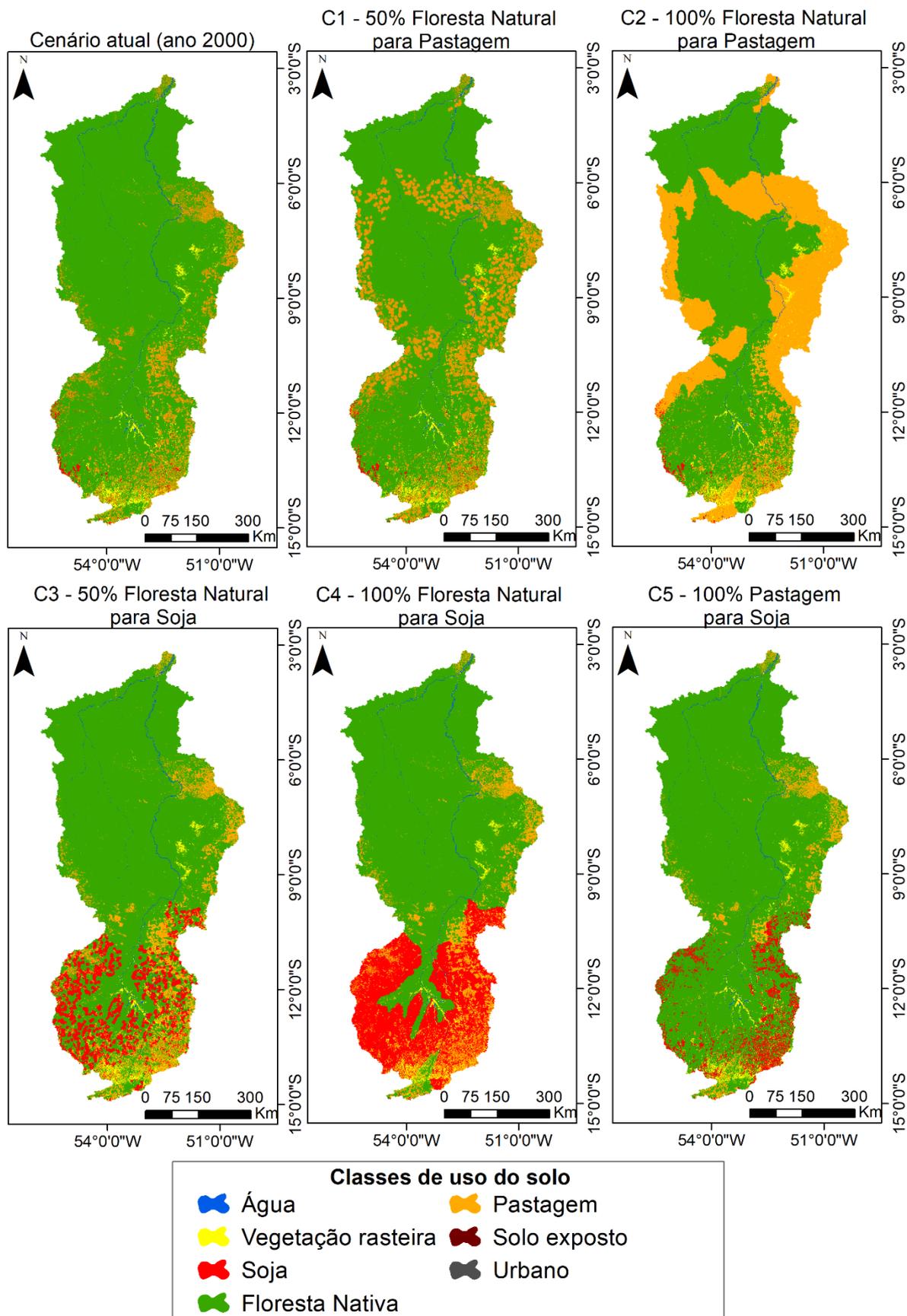


Figura 14 - Cenários de mudanças no uso do solo construídos para simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Xingu.

## 5 Resultados e discussão

### 5.1 Calibração do modelo LASH para a BHRX

Os parâmetros do modelo LASH calibrados para a BHRX a partir do algoritmo genético SCE-UA (DUAN, SOROOSHIAN; GUPTA, 1992), considerando a melhor iteração em termos de estatísticas de precisão, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 9 - Parâmetros do modelo LASH calibrados para a bacia hidrográfica do rio Xingu à montante do exutório "Altamira".

Parâmetro	Descrição	Valor final
$\lambda$	Coefficiente de abstração inicial da chuva (adimensional)	0,05
Kss	Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (mm dia <sup>-1</sup> )	3,50
Kb	Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (mm dia <sup>-1</sup> )	0,10
Kcr	Densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar (mm dia <sup>-1</sup> )	4,56
Cs	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório superficial (adimensional)	12,67
Css	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório subsuperficial (adimensional)	44.408,95
C <sub>B</sub>	Parâmetro do tempo de retardo do escoamento de base (dias)	23,78
n	Coefficiente de Manning (s.m <sup>-1/3</sup> )	0,13

As abstrações iniciais da chuva ( $I_a$ ) são caracterizadas como a parcela da precipitação que ocorre antes do início do ESD, constituindo-se de infiltração, acúmulo de água em depressões e retenção pelo dossel das áreas florestais (evaporação). A estimativa da  $I_a$  no método *Curve Number* desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (método SCS-CN) (SCS, 1971), é realizada como função do potencial de armazenamento máximo de água no solo (S) e do valor de  $\lambda$ . Originalmente, baseado em estudos realizados em bacias hidrográficas agrícolas dos Estados Unidos, os autores do método SCS-CN recomendam que o valor de  $\lambda$  seja igual a 0,2, ou seja, que  $I_a$  corresponde a 20% de S. Este valor é considerado em outros modelos hidrológicos que usam este método para simular o ESD, especialmente o modelo SWAT (Oliveira et al. 2017; Alves et al. 2020).

No modelo LASH, o ESD é calculado a partir do método CN Modificado (método CN<sub>modificado</sub>), proposto por Mishra *et al.* (2003). O método CN<sub>modificado</sub> considera que  $I_a$  é função de S,  $\lambda$  e da umidade antecedente do solo (M), caracterizada como função da precipitação dos últimos 5 dias. No entanto, Beskow *et al.* (2011) constataram que não é aconselhável empregar o valor fixo de  $\lambda$  recomendado pelo Método CN<sub>modificado</sub>

para modelagem do ESD. Segundo os autores, o valor de  $\lambda$  pode variar entre as bacias hidrográficas, dadas as diferenças nas condições climáticas, de tipo e uso do solo, da umidade do solo, padrão das precipitações, dentre outros. Além disso, características dos eventos de chuva também possuem influência no valor de  $\lambda$  (SHI *et al.*, 2009; CALETKA *et al.*, 2020).

Mishra *et al.* (2006) encontraram considerável variação dos valores de  $\lambda$  ao avaliarem o ESD em 84 bacias hidrográficas nos EUA por meio do método CN<sub>modificado</sub>. Os valores de  $\lambda$  encontrados pelos autores variaram entre 0,00 e 0,21 em bacias hidrográficas com áreas de drenagem variando de 0,0017 a 0,74km<sup>2</sup>. De forma semelhante, existem numerosos estudos que consideram a calibração do parâmetro  $\lambda$  ao realizar a modelagem hidrológica. Na Tabela 9, estão apresentados os valores de  $\lambda$  calibrados para modelagem hidrológica utilizando o modelo LASH em bacias hidrográficas com áreas e características edafoclimáticas distintas.

Tabela 10 - Valores do coeficiente de abstração inicial da chuva ( $\lambda$ ) calibrados para diferentes bacias hidrográficas utilizando o modelo LASH.

Referência	Bacia hidrográfica	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Discretização espacial*	$\lambda$
Beskow <i>et al.</i> (2011)	BH do ribeirão Jaguara	32,0	Distribuída	0.105
Beskow <i>et al.</i> (2016)	BH do arroio Fragata	132,0	Distribuída	0.147
Caldeira (2016)	BH do arroio Pelotas	368,0	Semi-distribuída	0.024
	BH do arroio Fragata	132.0		0.115
Caldeira <i>et al.</i> (2019)	BH do arroio Fragata	132.0	Distribuída	0.147
			Semi-distribuída	0.039
Caldeira (2019)	BH do rio Piratini	4701.0		0.09
	BH do arroio Pelotas	368.0	Semi-distribuída	0.09
	BH do arroio Fragata	132.0		0.13
Andrade <i>et al.</i> (2020)	BH do Rio Grande	51.852,0	Semi-distribuída	0,018 – 0,5**

\*A discretização espacial é referente a realização do balanço hídrico e das vazões na modelagem hidrológica, e não da calibração do parâmetro  $\lambda$ .

\*\*Modelagem semi-distribuída por Unidades Hidrológicas Homogêneas.

O valor de  $\lambda$  calibrado para a BHRX foi igual a 0,05 (Tabela 8). Esse valor indica que, ao considerar mesmas magnitudes para eventos de chuva, S e M, o início do ESD ocorrerá mais rapidamente na BHRX do que em bacias hidrográficas com valores de  $\lambda$  maiores.

Ao analisar as classes de solo na BHRX, pode-se observar que esta possui abundância de solos intemperizados, caracterizados pela presença de óxidos de ferro e alumínio e pela boa drenagem, especialmente os Latossolos. No entanto, estes solos estão presentes nas regiões de cabeceira da BHRX, onde as declividades são mais acentuadas. Este fato elucida o valor encontrado de  $\lambda$  para a BHRX. Ademais, as práticas agrícolas que ocorrem na região também influenciam no valor de  $\lambda$ , uma vez que, o tráfego de máquinas para o preparo do solo para o plantio, bem como, a movimentação de animais em áreas de pastagem, produzem uma camada compactada no solo, favorecendo o ESD (PRUSKI *et al.*, 1997).

O processo de compactação reduz a capacidade de infiltração de água no solo e propicia a geração de ESD mais rapidamente. Ademais, as características dos eventos de chuva também corroboram com o valor de  $\lambda$  calibrado na BHRX, uma vez que eventos de chuva de grandes magnitudes e intensidades, permitem a geração de ESD mais rapidamente. No bioma da Floresta Amazônica há dominância de eventos convectivos devido ao excesso de calor e umidade, fazendo com que tais eventos apresentem alta intensidade e grandes volumes de chuva.

Seguindo recomendações de Rawls *et al.* (1993), as parcelas de escoamento subsuperficial e subterrâneo são estimadas empregando os parâmetros  $K_{SS}$  e  $K_B$ , respectivamente. Segundo Azevedo (2019), a condutividade hidráulica nas camadas subsuperficial e subterrânea do solo representa a capacidade do solo em promover o fluxo de água pelo meio poroso. Neste sentido, os valores de  $K_{SS}$  e  $K_B$  são dependentes da porosidade do solo, da forma e arranjo das partículas do solo, além da viscosidade e massa específica do fluido (AZEVEDO, 2019).

Na BHRX, o modelo LASH resultou em valores calibrados de  $K_{SS}$  e  $K_B$  iguais a 3,50 e 0,10 mm.dia<sup>-1</sup> (Tabela 8). Estes valores se mostram condizentes com a realidade da bacia no tocante às práticas agrícolas realizadas, uma vez que, a compactação do solo diminui o volume de macroporos e aumenta a densidade e resistência ao movimento de água no perfil do solo (OLIVEIRA, 2005). Desta forma, apesar de, em geral, as classes de solos predominantes na BHRX serem bem desenvolvidas e com boa drenagem, o preparo do solo implica em menores valores de  $K_{SS}$  e  $K_B$ .

Corroborando com os resultados encontrados neste estudo, a aplicação do modelo LASH em diferentes bacias hidrográficas resultou em considerável variação

nos valores de  $K_{SS}$  e  $K_B$ , conforme apresentado na Tabela 10. Este comportamento é esperado, uma vez que estes parâmetros estão diretamente relacionados com as classes de solo encontradas nas bacias hidrográficas.

Tabela 11 - Valores dos parâmetros de condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ( $K_{SS}$ ) e subterrâneo ( $K_B$ ) calibrados para diferentes bacias hidrográficas utilizando o modelo LASH.

Referência	Área de estudo	Classe de solo predominante	Discretização espacial*	$K_{SS}$ (mm dia <sup>-1</sup> )	$K_B$ (mm dia <sup>-1</sup> )
Beskow <i>et al.</i> (2011)	BH do ribeirão Jaguara	Latossolos	Distribuída	182.15	3.18
Beskow <i>et al.</i> (2016)	BH do arroio Fragata	Luvissolo Hipocrômico Órtico típico associado à Neossolo Litólico Distrófico	Distribuída	2.08	0.192
Caldeira (2016)	BH do arroio Pelotas	Luvissolo Hipocrômico Órtico típico associado à Neossolo Litólico Distrófico	Semi-distribuída	137.489	1.866
	BH do arroio Fragata	Luvissolo Hipocrômico Órtico típico associado à Neossolo Litólico Distrófico		5.261	0.634
Caldeira <i>et al.</i> (2019)	BH do arroio Fragata	Luvissolo Hipocrômico Órtico típico associado à Neossolo Litólico Distrófico	Distribuída	2.080	0.192
	BH do rio Piratini			10.777	0.476
Caldeira (2019)	BH do arroio Pelotas	Argissolo Amarelo	Semi-distribuída	77.08	0.65
	BH do arroio Fragata			95.24	1.36
Andrade <i>et al.</i> (2020)	BH do Rio Grande	Latossolos e argissolos	Semi-distribuída	4.39	0.79
				18 – 25**	2 – 5**

\*A discretização espacial é referente a realização do balanço hídrico e das vazões na modelagem hidrológica, e não da calibração dos parâmetros  $K_{SS}$  e  $K_B$ .

\*\*Modelagem semi-distribuída por Unidades Hidrológicas Homogêneas.

Os valores do parâmetro  $K_{CR}$  indicam a máxima densidade de fluxo por ascensão capilar que a bacia hidrográfica pode apresentar em condições de umidade do solo favoráveis à sua ocorrência (CALDEIRA, 2019). Não existem dados que permitam estimar o valor de  $K_{CR}$ , desta forma, o fluxo por ascensão capilar é frequentemente desprezado nas modelagens hidrológicas (COLLISCHONN, 2001). A ascensão capilar pode ser inteiramente consumida pela evapotranspiração ou ficar restrita a camadas muito profundas do solo, o que não implica em grandes alterações no balanço hídrico.

Neste sentido, o algoritmo que permite computar a parcela de ascensão capilar foi implementado no modelo LASH por Beskow; Mello; Norton (2011), com intuito de permitir a simulação de situações em que algumas áreas da bacia hidrográfica

apresentam baixa disponibilidade hídrica no solo, ocorrendo elevação de água do aquífero raso até a camada de solo e tornando-a disponível para evapotranspiração. Beskow *et al.* (2011) realizou uma modelagem hidrológica distribuída na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ) com o modelo LASH e obteve valor de  $K_{CR}$  calibrado de  $4,36\text{mm.dia}^{-1}$ . A BHRJ possui área de drenagem de  $32\text{km}^2$  e predominância de Latossolos.

Caldeira (2016) realizou a modelagem hidrológica semi-distribuída com o modelo LASH nas bacias hidrográficas do arroio Pelotas (BHAP) e do arroio Fragata (BHAF). A BHAP possui área de drenagem de  $368\text{km}^2$ , enquanto que, a BHAF possui  $132\text{km}^2$ , ambas com predominância de Luvisolos Hipocrômicos Órticos associados a Neossolos Litólico Distrófico. Os valores de  $K_{CR}$  calibrados por Caldeira (2016) para a BHAP e BHAF foram  $2,93$  e  $2,02\text{mm.dia}^{-1}$ , respectivamente.

Os parâmetros  $C_s$  e  $C_{ss}$  do modelo LASH estão relacionados com o tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas utilizadas na modelagem. Estes parâmetros, uma vez combinados com o tempo de concentração de cada sub-bacia, indicam os tempos de resposta dos reservatórios superficial e subsuperficial. De acordo com Beskow *et al.* (2011), para que haja sentido hidrológico, o parâmetro  $C_s$  deverá ser menor que o parâmetro  $C_{ss}$ . Outro fator importante, apontado por Caldeira *et al.* (2019) é que a magnitude dos valores destes parâmetros é dependente da área de drenagem das sub-bacias hidrográficas. Esta dependência é justificada pois os tempos de concentração tendem a ser menores em bacias hidrográficas de menores áreas (CALDEIRA *et al.*, 2019). Para a BHRX, os valores dos parâmetros  $C_s$  e  $C_{ss}$  calibrados foram, respectivamente,  $12,67$  e  $44.408,95$ .

Durante a calibração destes parâmetros foi possível observar que o tempo de atenuação das vazões mínimas simuladas pelo modelo LASH sofreu bastante influência do parâmetro  $C_{ss}$ . Isto porque, o parâmetro  $C_{ss}$  multiplicado pelo  $T_c$  de cada sub-bacia determina o tempo de esvaziamento dos reservatórios subsuperficiais. Observou-se que, quanto menor o valor de  $C_{ss}$  calibrado, maior o atraso na atenuação das vazões mínimas nos hidrogramas simulados nos períodos de calibração e validação. A Figura 15 ilustra este comportamento considerando um valor de  $C_{ss}$  baixo, igual a  $71,76$ , para a modelagem das vazões do exutório da BHRX.

Neste sentido, o limite superior deste parâmetro foi ajustado até que as vazões mínimas simuladas pelo modelo LASH ficassem próximas das vazões mínimas

observadas no exutório da BHRX. Portanto, os valores dos parâmetros  $C_s$  e  $C_{ss}$  se mostram condizentes com as magnitudes das vazões observadas da bacia, assim como, com as áreas de drenagem das sub-bacias empregadas.

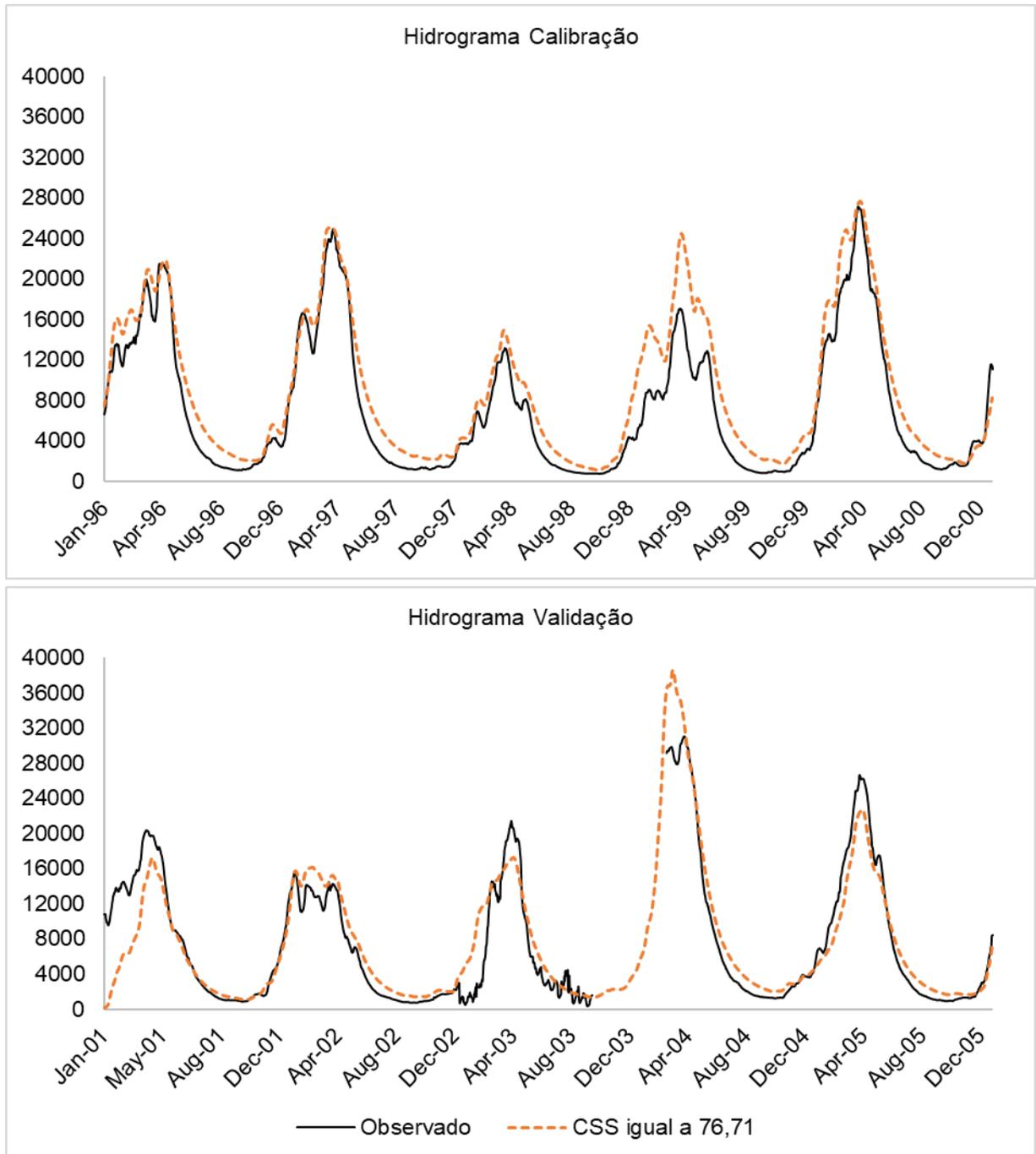


Figura 15 - Hidrograma estimado na calibração e validação do modelo LASH na bacia hidrográfica do rio Xingu considerando um valor baixo do parâmetro  $C_{ss}$  (igual a 71,76), demonstrando o retardo na ocorrência das vazões mínimas causadas pelo baixo valor.

Conforme descrito em Beskow *et al.* (2016), o parâmetro  $C_B$  está relacionado com o reservatório subterrâneo e possui importante influência na caracterização do escoamento de base em bacias hidrográficas. O valor de  $C_B$  calibrado para a BHRX foi de 23,78 dias. É interessante destacar que o parâmetro  $C_B$  pode ser determinado empiricamente para uma bacia hidrográfica, a partir da análise visual do hidrograma, considerando um período de recessão bem caracterizado, como sugerido por Viola (2008). Entretanto, pode ocorrer variação neste parâmetro quando analisado diferentes períodos de recessão. Na Tabela 11, pode-se observar a variação dos valores do parâmetro  $C_B$  determinados para o hidrograma do exutório da BHRX em diferentes períodos de recessão.

Tabela 12 - Valores do parâmetro  $C_B$  determinados a partir do hidrograma observado no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

Calibração		Validação	
Período	$C_B$ calculado (dias)	Período	$C_B$ calculado (dias)
03/05/1995 - 16/10/1995	167,00	24/04/2001 - 06/09/2001	136,00
03/05/1996 - 28/09/1996	149,00	20/04/2002 - 25/09/2002	159,00
19/04/1997 - 30/09/1997	165,00	30/04/2003 - 27/06/2003	59,00
07/04/1998 - 15/09/1998	162,00	08/04/2004 - 24/10/2004	200,00
25/05/1999 - 12/09/1999	111,00	11/04/2005 - 23/09/2005	166,00
04/04/2000 - 19/09/2000	167,00		

Desta forma, Beskow *et al.* (2016) e Caldeira (2016) realizaram a modelagem hidrológica com o modelo LASH considerando o parâmetro  $C_B$  como parâmetro de calibração. Segundo os autores, a determinação do parâmetro  $C_B$  a partir da observação do hidrograma é dependente da experiência do hidrólogo, logo, a calibração deste parâmetro reduz suas incertezas.

Assim, o valor de  $C_B$  calibrado para a BHRX é adequado, uma vez que a discrepância entre o valor calibrado (23,78) e os valores observados (Tabela 11) é justificada pela discretização espacial das informações. A calibração do parâmetro  $C_B$  considera um parâmetro de valor médio entre os estipulados para cada sub-bacia analisada na modelagem, enquanto que a determinação do valor a partir da observação do hidrograma considera a contribuição da área de drenagem da bacia como um todo.

O parâmetro  $n$  foi implementado para calibração no modelo LASH a fim de diminuir a subjetividade da busca e escolha deste parâmetro na literatura. Para a

BHRX, o parâmetro  $n$  calibrado foi igual a 0,13, condizente com a realidade da BHRX, dado que, se aproxima do valor enquadrado como “Arroios e rios com margens espraçadas, com muita vegetação em condições regulares” ( $n = 0,125$ ) na classificação apresentada por Porto (2006).

Embora o valor calibrado para o parâmetro  $n$  seja correspondente a um valor médio entre as sub-bacias utilizadas na modelagem, pode-se observar que há ocorrência de margens espraçadas no exutório da BHRX e no exutório da BHRI, como ilustrado na Figura 16.

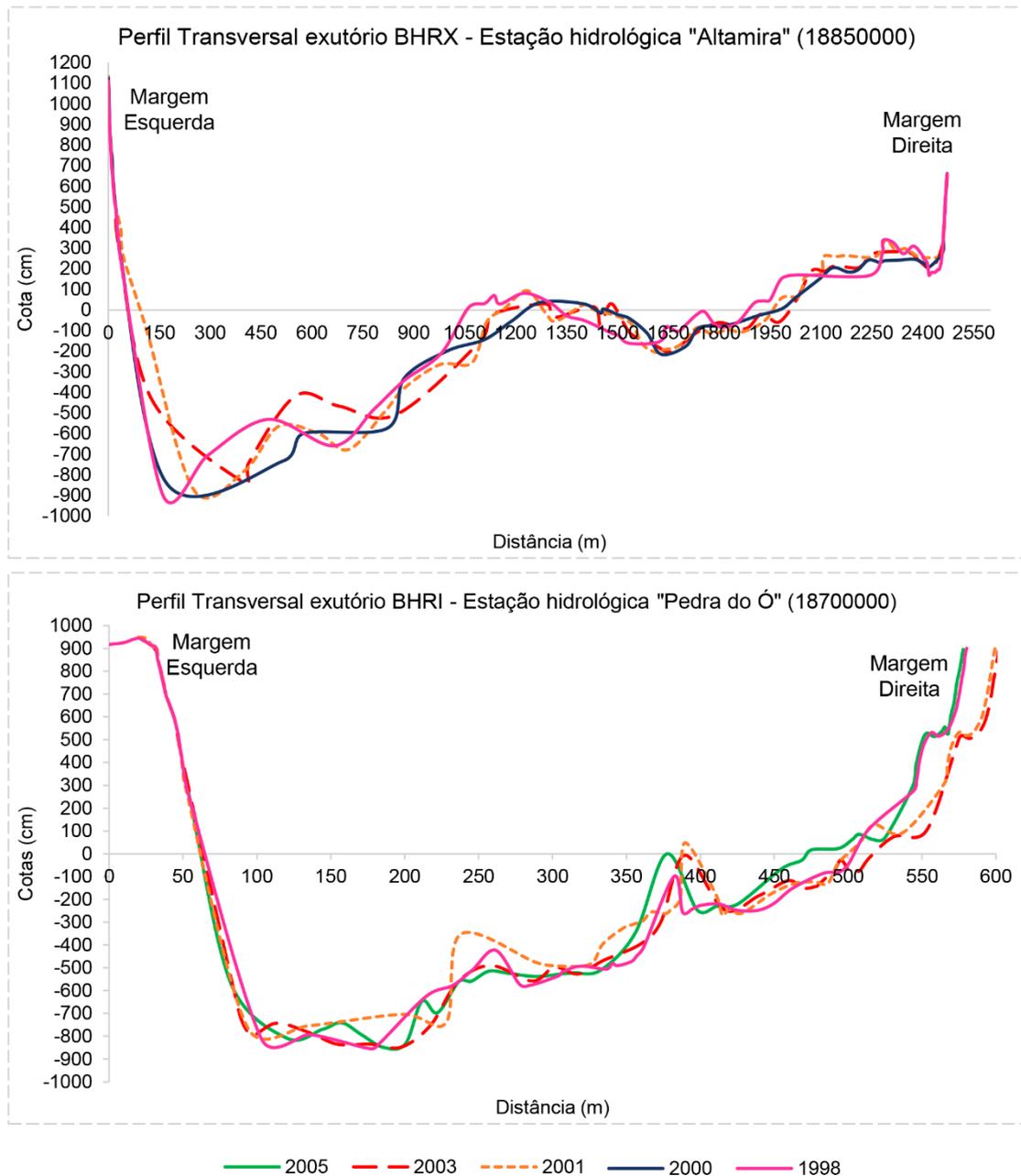


Figura 16 - Perfis transversais dos anos 1998, 2000, 2001, 2003 e 2005 do exutório da (a) bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) e da (b) bacia hidrográfica do rio Iriri (BHRI). Os perfis transversais dos exutórios de ambas sub-bacias foram construídos com base nos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

Em relação à influência da calibração do parâmetro  $n$  na modelagem hidrológica com o modelo LASH, Beskow, Norton e Mello (2011) não verificaram sensibilidade deste parâmetro. Todavia, na versão do modelo analisada o módulo de propagação da onda de cheia nos cursos d'água utilizava o método de Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969). Ademais, a bacia estudada pelos autores possui 32km<sup>2</sup> e um curso d'água principal de pequena extensão. Pode ser interessante a realização de

estudos com vistas a analisar a real sensibilidade do parâmetro  $n$  na resposta hidrológica da modelagem com o LASH utilizando o método da Onda Cinemática.

## 5.2 Análise das estatísticas de desempenho do modelo LASH

Os resultados das estatísticas empregadas para análise de desempenho do modelo LASH à estimativa das vazões na BHRX, no período de calibração e validação, podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 13 - Valores obtidos para as estatísticas de desempenho Coeficiente de Nash e Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e sua versão logaritimizada ( $C_{NSlog(Q)}$ ) e o coeficiente  $P_{bias}$  considerando vazões diárias e mensais.

Estatística	Diário		Mensal	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
$C_{NS}$	0,94	0,84	0,95	0,85
$C_{NSlog(Q)}$	0,91	0,71	0,92	0,78
$P_{bias}$ (%)	-1,43	15,77	-1,46	15,76

Analisando os valores das estatísticas  $C_{NS}$  e  $C_{NSlog(Q)}$  na Tabela 12, tanto no período de calibração, quanto na validação, pode-se observar que os ajustes foram classificados como “Muito bom”, segundo classificação de Moriasi *et al.* (2007). Neste sentido, os resultados encontrados para a BHRX permitem constatar que o modelo LASH foi capaz de representar adequadamente os valores de vazões mínimas e máximas nos períodos de calibração e validação.

Os valores de  $P_{bias}$  apresentados na Tabela 12 para o período de calibração indicaram ajuste “Muito bom” de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007). No entanto, para o período de validação, o valor encontrado indicou ajuste “Satisfatório” (MORIASI *et al.*, 2007). Além disso, ao observar o valor de  $P_{bias}$  para o período de calibração, pode-se observar, pelo valor negativo, que ocorreram superestimativas dos valores das vazões estimadas frente às observadas. Para o período de validação, o valor de  $P_{bias}$  positivo indica que houve subestimativas nestes valores.

Analisando os valores das estatísticas  $C_{NS}$  e  $C_{NSlog(Q)}$  da Tabela 12 para o desempenho das vazões médias mensais, foi possível observar que o desempenho do modelo LASH foi classificado como “Muito bom” em ambas estatísticas para o

período de calibração e validação (MORIASI *et al.*, 2007). O coeficiente  $P_{bias}$  para o período de calibração indicou ajuste “Muito bom”, enquanto que, para o período de validação, o valor resultante indicou ajuste “Satisfatório”, de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

Os dados apresentados na Tabela 12 demonstram que o modelo LASH foi eficiente ao compreender a hidrologia de uma bacia com condições edafoclimáticas muito diferentes daquelas testadas anteriormente. O desempenho mais alto da estatística  $C_{NS}$  comparada a  $C_{NSlog(Q)}$  pode ser justificado pela utilização do  $C_{NS}$  como função objetivo do algoritmo SCE-UA para otimização dos parâmetros do modelo LASH. Isto forçou o modelo a melhor representar as vazões mais altas no exutório da BHRX em detrimento das vazões mais baixas.

Quando comparados os valores das estatísticas  $C_{NS}$  e  $C_{NSlog(Q)}$  para a calibração e validação do modelo, pode-se verificar que o desempenho na BHRX foi superior aos outros estudos já realizados com o modelo LASH. Na Figura 17, pode-se observar o desempenho do modelo na modelagem da BHRX frente a estudos realizados em outras bacias considerando a discretização espacial semi-distribuída. Os resultados obtidos para modelagem hidrológica das vazões médias diárias na BHRX estimulam que o modelo LASH seja aplicado em outras bacias de condições de área de drenagem e relevo semelhantes, assim como, em bacias dispostas em biomas ainda não explorados.

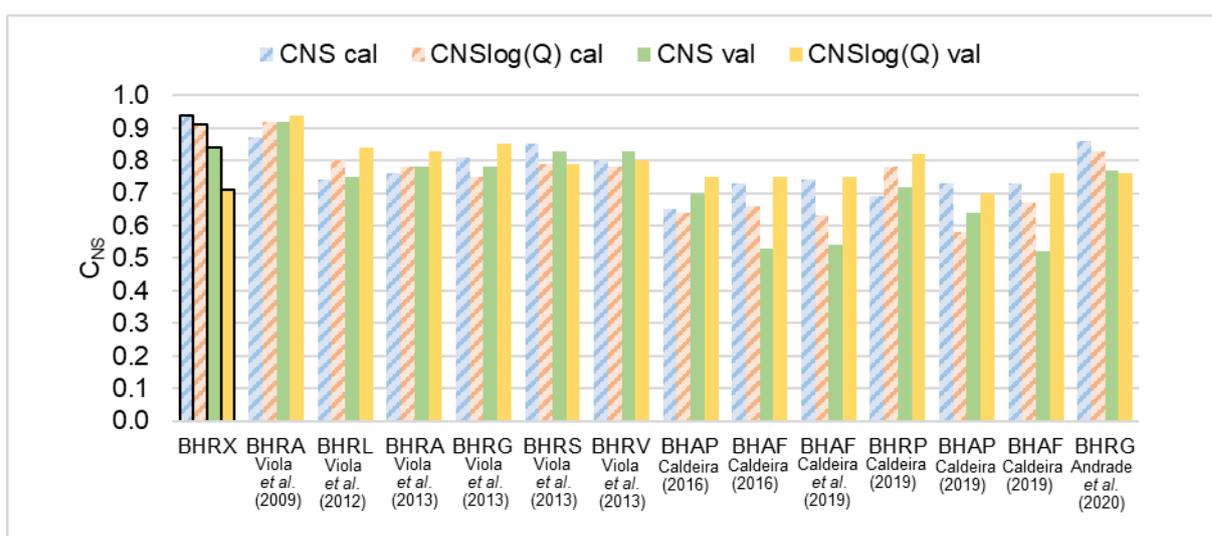


Figura 17 - Desempenho do modelo LASH na estimativa das vazões médias diárias na bacia hidrográfica do rio Xingu (BHRX) frente a diferentes estudos nas bacias hidrográficas do rio Aiuruoca (BHRA), rio Lontra (BHRL), rio Grande (BHRG), rio Sapucaí (BHRS), rio Verde (BHRV), arroio Pelotas

(BHAP), arroio Fragata (BHAF) e rio Piratini (BHRP), a partir das estatísticas  $C_{NS}$  e  $C_{NSlog(Q)}$ , considerando discretização semi-distribuída.

Muitos estudos que envolvem a aplicação de modelos hidrológicos em bacias hidrográficas dos biomas Floresta Amazônica e Cerrado têm empregado o  $C_{NS}$ , o  $C_{NSlog(Q)}$  e  $P_{bias}$  para a verificação do desempenho dos resultados. Louzada; Ribeiro (2019), ao aplicarem o modelo SWAT na BHRX, obtiveram valores de  $C_{NS}$  e  $P_{bias}$  iguais a 0,59 e 17,3%, respectivamente, portanto, consideravelmente inferiores aos obtidos pelo presente estudo. Lamparter *et al.* (2018) realizaram a modelagem hidrológica em duas bacias: a bacia hidrográfica do rio das Mortes (BHRM), com área de drenagem de 17.556km<sup>2</sup>, no bioma Cerrado; e na bacia hidrográfica do rio Jamanxim (BHRJ), com área de drenagem igual 34.403km<sup>2</sup>, no bioma Floresta Amazônica, com o modelo SWAT. Os autores obtiveram valores de  $C_{NS}$  e  $P_{bias}$  iguais a 0,74 e 4,54% no período de calibração e 0,79 e -8,1% no período de validação para a BHRM. Para a BHRJ, os valores de  $C_{NS}$  e  $P_{bias}$  obtidos foram de 0,80 e -0,5% para a calibração e 0,80 e 0,80% na validação (LAMPARTER *et al.*, 2018). Ambos os estudos demonstram desempenho inferior ao obtido pelo modelo LASH no tocante ao  $C_{NS}$ .

Ainda no bioma Cerrado, Oliveira *et al.* (2019a) aplicaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do Alto Paraíba, com clima Aw e área de drenagem de 3.754km<sup>2</sup>, semelhante à região de cabeceira da BHRX. Os autores obtiveram resultados de  $C_{NS}$  de 0,89 e 0,93 para a calibração e validação, respectivamente, e  $P_{bias}$  de -4,5% e -3,5%. Já Santos *et al.* (2018) avaliaram o modelo SWAT na BHRI, no bioma Floresta Amazônica, obtendo valores de  $C_{NS}$  e  $P_{bias}$  iguais a 0,85 e -7,47% no período de calibração e 0,94 a -3,2% no período de validação. No entanto, ambos estudos foram realizados considerando a modelagem hidrológica das vazões mensais.

O modelo MGB-IPH foi aplicado por Oliveira *et al.* (2019b) na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires, com área de drenagem de 37.444km<sup>2</sup>, localizada na zona de transição entre os biomas Floresta Amazônica e Cerrado. O estudo indicou bom desempenho do modelo, com  $C_{NS}$  variando entre 0,80 a 0,84 entre as estações analisadas no período de calibração e 0,77 a 0,81 no período de validação. A estatística  $C_{NSlog(Q)}$  também foi empregada, obtendo valores variando entre 0,85 a 0,92 na calibração e 0,79 a 0,87 na validação, enquanto que os valores de  $P_{bias}$  variaram entre -9,03% a 1,90% e -11,37% a -1,66% para calibração e validação,

respectivamente. Ademais, Paiva *et al.* (2013) encontraram boa performance do modelo MGB-IPH para a modelagem do rio Amazonas, uma vez que, 70% das estações analisadas obtiveram  $C_{NS} > 0,6$  e 75% obtiveram  $P_{bias} < 15\%$ .

Analisando os resultados obtidos pelos autores supracitados em comparação com as estatísticas de desempenho do modelo LASH para a BHRX (Tabela 12), pode-se inferir que o desempenho do modelo LASH foi superior ao de outros modelos empregados em bacias hidrográficas da Floresta Amazônica e do Cerrado. Os valores de  $C_{NS}$  para calibração e validação (0,93 e 0,83) e  $C_{NSlog(Q)}$  (0,92 e 0,79), no intervalo de tempo diário, indicam que o modelo LASH produzirá resultados com alto grau de acurácia na predição de vazões, sendo uma ferramenta robusta na gestão e planejamento dos recursos hídricos para o bioma Amazônico.

### **5.3 Análise com base nos hidrogramas e nos indicadores de vazões**

Na Figura 18 estão apresentados os hidrogramas médios diários observados no exutório da BHRX e estimados pelo modelo LASH para o período de calibração e validação. A Figura 19 ilustra os hidrogramas das vazões médias mensais observadas e estimadas para o período de calibração e validação.

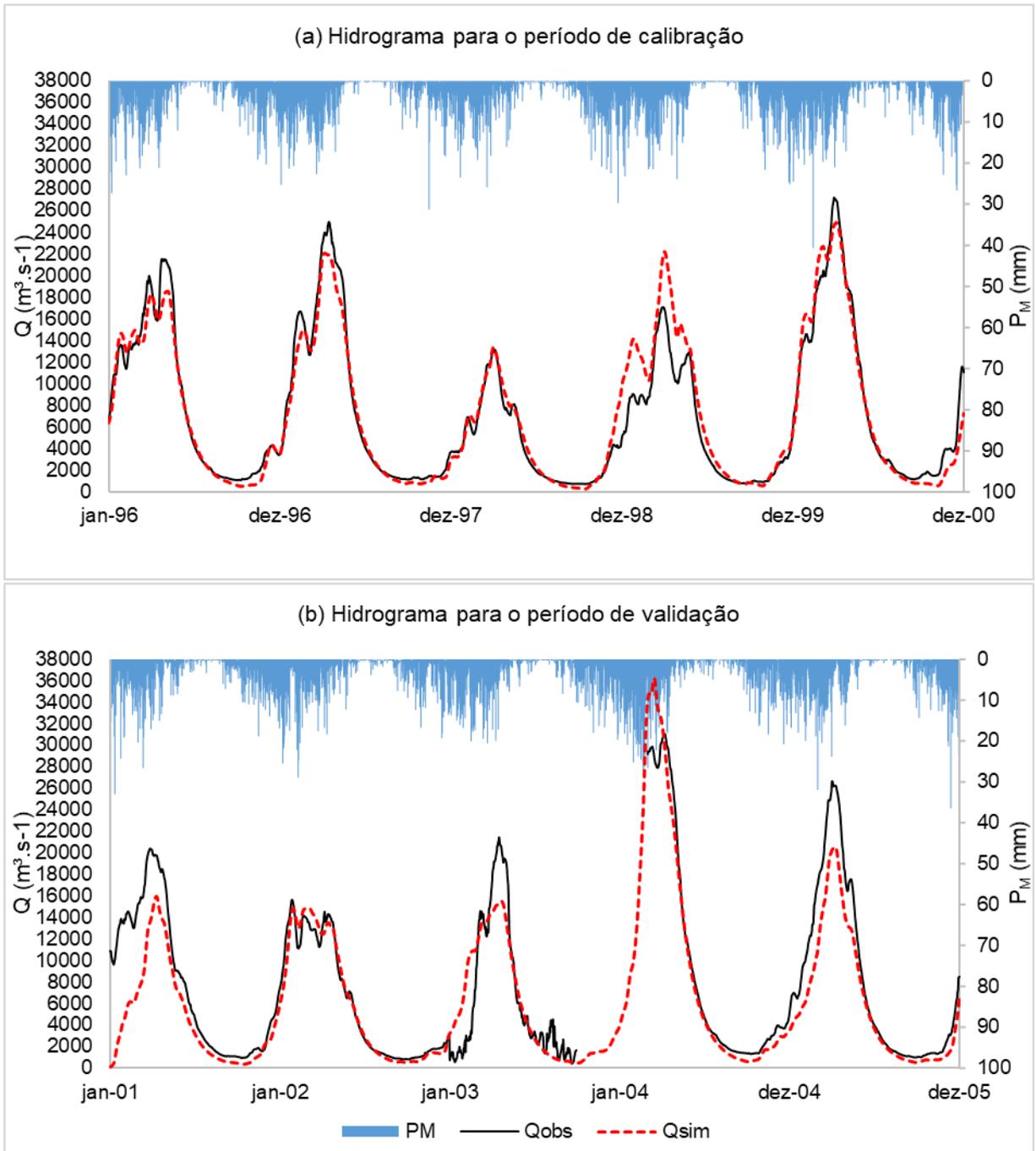


Figura 18 - Hidrogramas diários observados (Qobs) e estimados (Qsim) pelo modelo LASH e precipitação média observada ( $P_M$ ) para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Xingu.

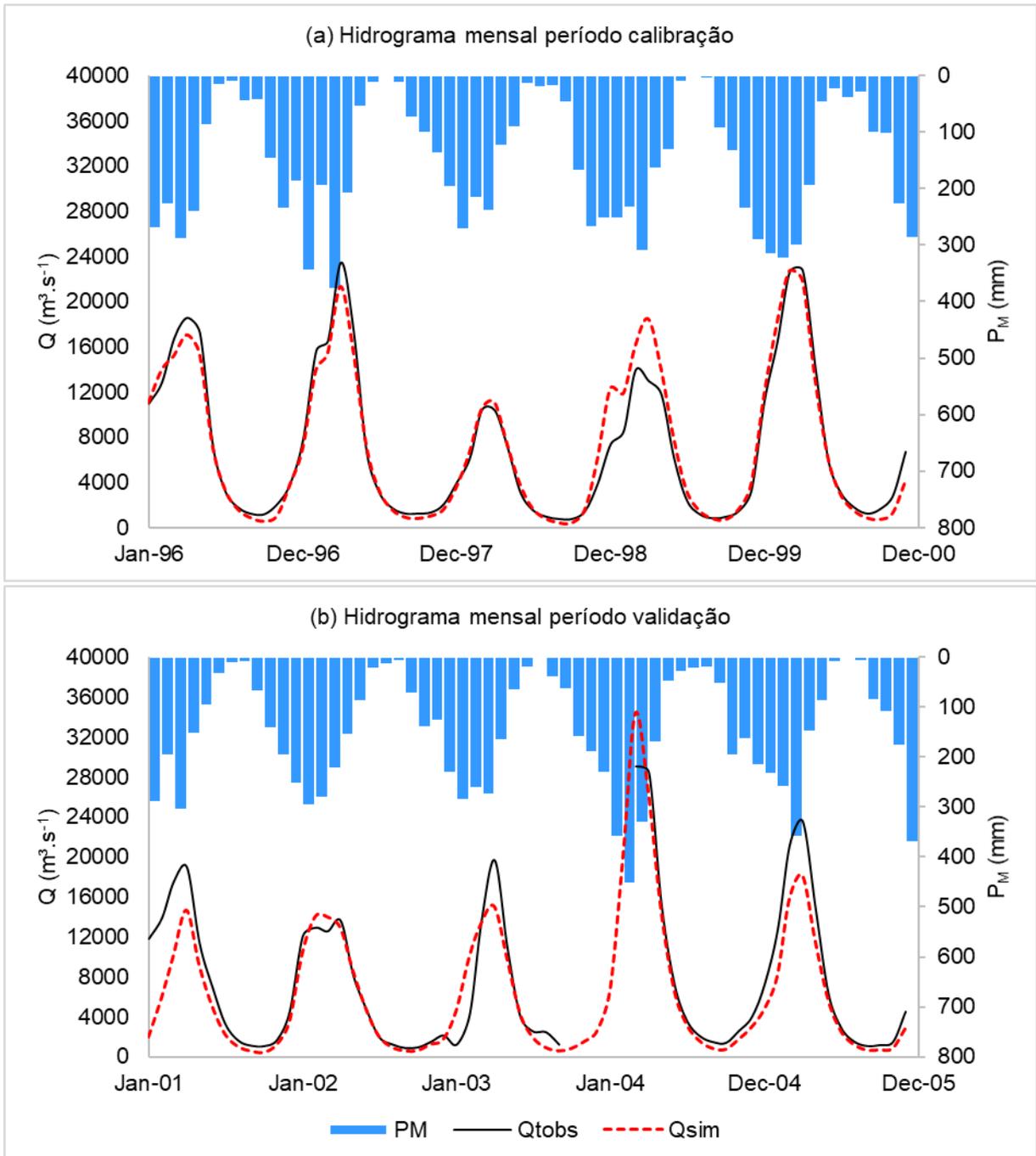


Figura 19 - Hidrogramas mensais observados ( $Q_{obs}$ ) e estimados ( $Q_{sim}$ ) pelo modelo LASH e precipitação total mensal observada (PM) para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Xingu.

Analisando os hidrogramas estimados pelo modelo LASH frente aos observados (Figuras 18 e 19), é possível observar que o modelo teve bom desempenho da representação das vazões médias diárias e mensais da BHRX. No entanto, pode-se observar, também, que nos períodos de calibração e validação, de maneira geral, ocorreram incertezas associadas a estimativa dos extremos, principalmente associadas os valores de vazões de pico. Este comportamento foi

anteriormente verificado em estudos empregando o modelo LASH bem como por outros modelos hidrológicos.

De acordo com Viola *et al.* (2009), a dificuldade na estimativa das vazões de pico pelos modelos hidrológicos pode ser justificada por alguns fatores, dentre eles, a representação adequada da variabilidade espacial da chuva, especialmente a chuva diária, e o intervalo de tempo adotado para modelagem. Caldeira (2019) descreve que estes fatores exercem influência na estimativa das vazões de pico, e, conseqüentemente, na representatividade da curva-chave. Neste sentido, a quantidade de estações de monitoramento pluviométrico ao longo da BHRX oferece baixa representatividade na variabilidade espacial da chuva, dada as dimensões da bacia e o relativamente baixo número de postos fluviométricos.

O intervalo de tempo adotado para modelagem foi determinado a partir dos dados oriundos das estações de monitoramento disponibilizados em escala temporal diária. Contudo, de acordo com Beskow *et al.* (2011), a escala diária pode afetar o desempenho da modelagem hidrológica semi-distribuída, uma vez que, o  $T_c$  das sub-bacias pode ser inferior a 1 dia. Na BHRX, em somente duas sub-bacias, das 99 empregadas na modelagem, o  $T_c$  foi inferior a 24 horas, demonstrando que o tempo diário é adequado para as simulações nas mesmas.

Além das análises com base nos hidrogramas, avaliar as vazões máximas, mínimas e médias anuais e os valores de vazões de referência para outorga extraídos na série estimada, possibilita a verificação de aplicações práticas do modelo LASH como ferramenta de gestão dos recursos hídricos para a BHRX.

Para a previsão de vazões, a modelagem hidrológica configura uma ferramenta viável para gestão de recursos hídricos. Neste sentido, o comportamento do modelo hidrológico na estimativa das vazões máximas influencia na eficácia de ferramentas para controle de cheias. Ainda, auxilia nas estimativas de vazões mínimas em múltiplas finalidades e também na análise de secas hidrológicas partindo-se de séries simuladas com base em diferentes cenários de uso do solo e de mudanças climáticas. Na figura 20, estão apresentadas as vazões máximas e mínimas anuais observadas e simuladas no modelo LASH para a BHRX.

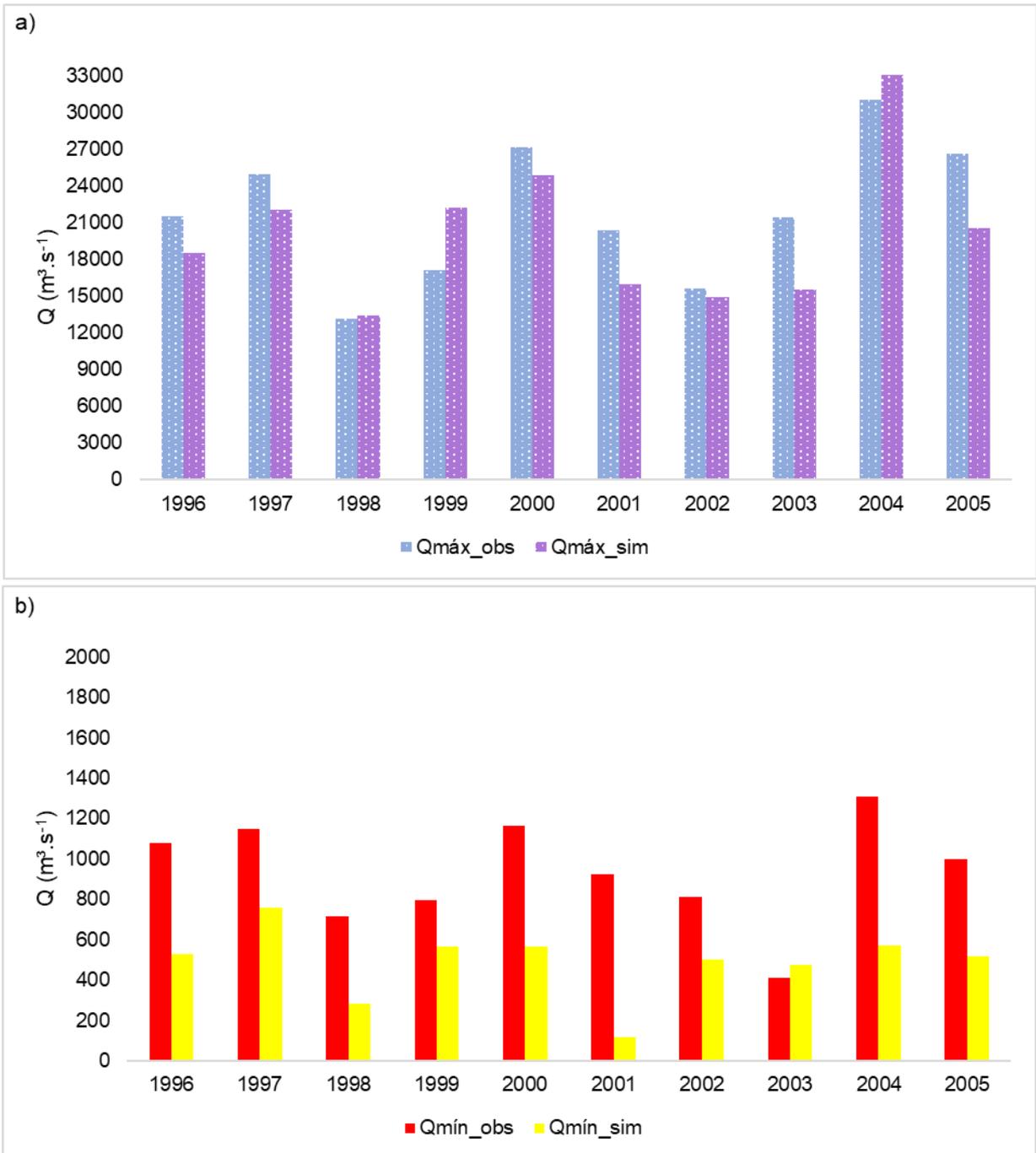


Figura 20 - Valores das vazões: (a) máximas anuais observadas ( $Q_{máx\_obs}$ ) e estimadas ( $Q_{mín\_sim}$ ) e (b) vazões mínimas anuais observadas ( $Q_{mín\_obs}$ ) e estimadas ( $Q_{mín\_sim}$ ) no modelo LASH para a bacia hidrográfica do rio Xingu.

A curva de permanência indica a frequência temporal com que determinado valor de vazão média diária é igualada ou excedida, frequentemente empregada na determinação de valores de vazões de referência. As curvas de permanência observada e estimada pelo modelo LASH na BHRX podem ser observadas na Figura 21.

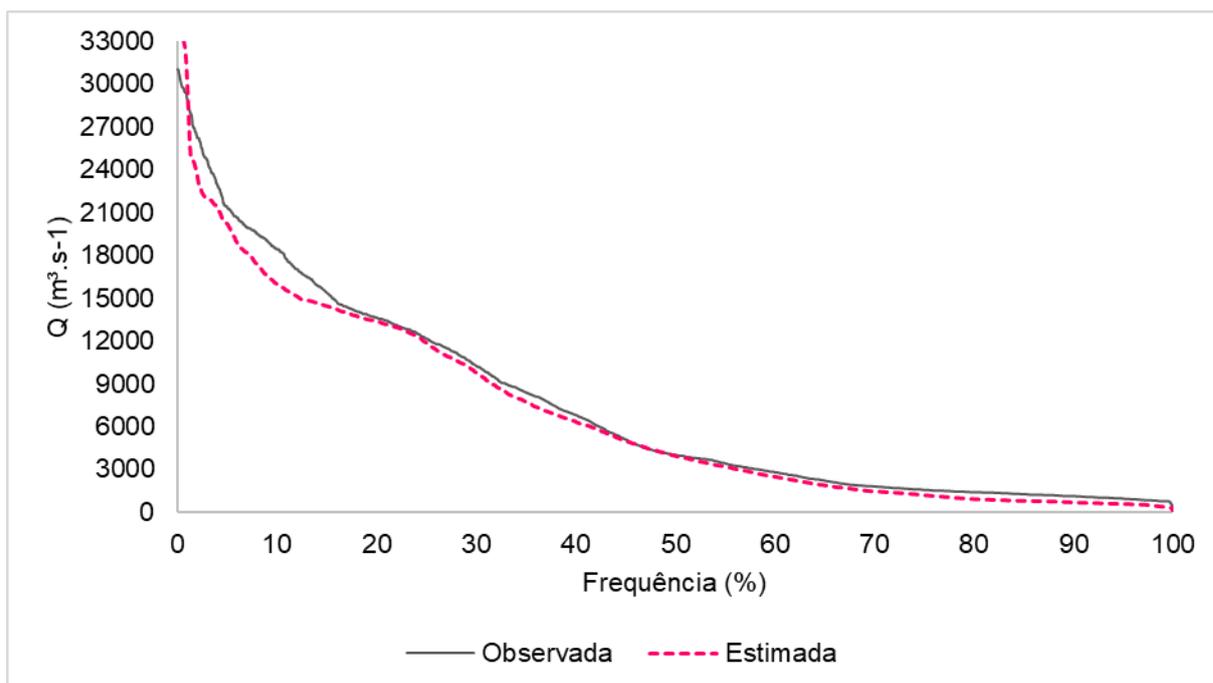


Figura 21 - Curvas de permanência observada e estimada pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

A análise visual das curvas apresentadas na Figura 21 permite constatar que, de modo geral, a curva de permanência derivada do hidrograma estimado pelo LASH foi condizente com a observada. Todavia, é possível observar que as vazões máximas simuladas se distanciaram consideravelmente das observadas. Para análise mais refinada da representatividade da curva de permanência observada, foram extraídos valores de vazões observadas e estimadas para algumas permanências de referência (Tabela 13).

Tabela 14 - Vazões de referência extraídas das curvas de permanência e seus respectivos valores de vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

Vazão de Referência	Observada (m³.s⁻¹)	Estimada (m³.s⁻¹)	Erro (%)
Q <sub>10%</sub>	18.443,6	16.011,3	-13,2
Q <sub>20%</sub>	13.609,3	13.372,3	-1,7
Q <sub>30%</sub>	10.280,2	9.796,4	-4,7
Q <sub>40%</sub>	6.789,3	6.361,1	-6,3
Q <sub>50%</sub>	3.999,9	3.948,9	-1,3
Q <sub>60%</sub>	2.793,7	2.475,1	-11,4
Q <sub>70%</sub>	1.772,2	1.446,1	-18,4
Q <sub>80%</sub>	1.382,2	901,6	-34,8
Q <sub>90%</sub>	1.098,3	670,5	-38,9
Coeficiente de vazões mínimas*	1.079,7	659,2	-38,9
Coeficiente de vazões máximas**	19.175,3	17.961,0	-6,3

\*Média de todas as vazões com excedência acima de 80%.

\*\*Média de todas as vazões com excedência menor que 20%.

Avaliando os valores apresentados na Tabela 13 e o comportamento das curvas de permanência da Figura 21, é possível notar que o modelo LASH, de maneira geral, apresentou subestimativa nos valores de vazões. Assim como nos valores dos coeficientes de vazões mínimas e máximas, tendo maior taxa de subestimativa nos valores referentes as vazões mínimas.

O modelo LASH vêm sendo avaliado em alguns estudos quanto a sua precisão na estimativa da curva de permanência, obtendo bom desempenho (Viola *et al.*, 2013; Beskow Norton; Mello, 2013; Beskow *et al.*, 2016; Caldeira *et al.*, 2019). Viola *et al.* (2013) analisaram que a correspondência da curva de permanência estimada para a BHRG pelo modelo LASH foi satisfatória, obtendo pouca discrepância nas vazões mínimas de referência. Beskow; Norton; Mello (2013) constataram que o modelo LASH teve bom desempenho na estimativa da curva de permanência da BHRJ, com pequena superestimativa da  $Q_{90\%}$ . De mesma forma, para a BHRF, Beskow *et al.* (2016) e Caldeira *et al.* (2019) encontraram bons ajustes das curvas de permanência estimadas frente a observada, com superestimativa nos valores de vazões mínimas de referência.

#### 5.4 Estimativa de componentes do ciclo hidrológico pelo modelo LASH para a BHRX

Foi possível extrair os quantitativos de alguns componentes do balanço hídrico para a BHRX quando da estimativa com o modelo LASH. Na Tabela 14, estão apresentados os valores médios mensais compreendidos nas estações chuvosa (novembro a abril) e seca (maio – outubro) do armazenamento de água no solo ( $A_t$ ), da evapotranspiração real ( $ET_r$ ), da interceptação ( $I_t$ ), do deflúvio ( $D$ ) e da vazão ( $Q$ ), simulados no modelo LASH entre os anos de 1996 a 2005.

Tabela 15 - Contribuição dos componentes do balanço hídrico mensal médio estimado pelo LASH para os períodos chuvoso e seco na bacia hidrográfica do rio Xingu. A saber: armazenamento de água no solo médio ( $A_t$ ), evapotranspiração real média ( $ET$ ), interceptação média ( $I_t$ ), deflúvio médio ( $D$ ) e vazão média ( $Q$ ).

Período	$A_t$ (mm)	$ET_r$ (mm)	$I_t$ (mm)	$D$ (mm)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
Chuvoso	230,9	102,6	24,2	56,2	9.668,3
Seco	101,6	67,9	8,6	22,8	3.852,7

Analisando os valores de D, pode-se observar que estes se aproximaram muito dos valores de D observados, iguais a 60,2mm no período chuvoso e 24,9mm no período seco. Este fato indica o bom desempenho do modelo LASH para a estimativa do escoamento na BHRX. Comportamento similar pode ser observado para os valores de Q estimados, dado que os valores de Q observados foram iguais a 10.353,8 e 4.207,6m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> para o período chuvoso e seco, respectivamente.

A região da BHRX não dispõe de dados monitorados de ET, A<sub>t</sub> e I<sub>t</sub>, o que dificulta a avaliação da acurácia do modelo na representação destas variáveis. Entretanto, pode-se observar que os componentes de maiores participações nas saídas do balanço hídrico na BHRX foram a A<sub>t</sub> e a ET. Enquanto que a I<sub>t</sub> não mostrou participação substancial, quando comparada aos demais componentes.

Os resultados deste estudo estão de acordo com Panday *et al.* (2015), uma vez que, na BHRX o comportamento da ET está relacionado com a precipitação, porém, a ET apresenta uma sazonalidade muito menor. Este fato está correlacionado com a predominância de vegetação de florestas nativas, que possuem altas taxas de ET enquanto houver umidade disponível no solo. O comportamento da ET ao longo dos meses do ano pode ser observado na Figura 22, onde ocorre um decaimento dos valores nos meses de julho, agosto e setembro, enquanto que nos meses restantes a ET se mantém estável.

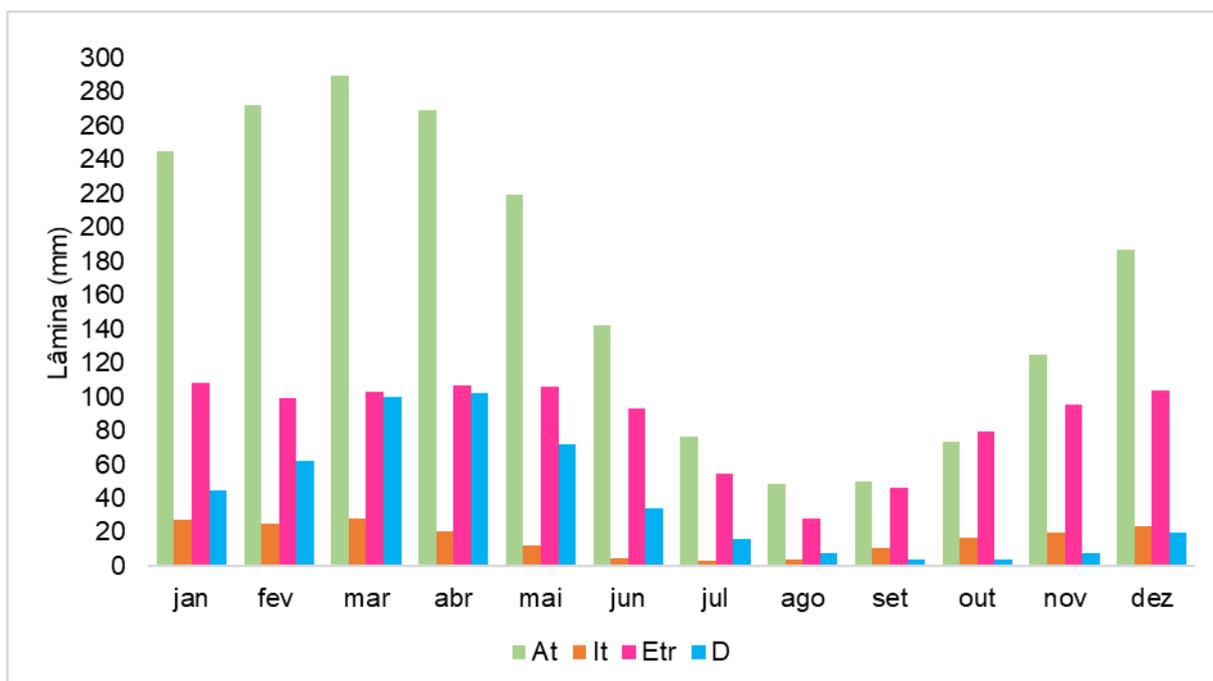


Figura 22 - Valores médios mensais estimados pelo modelo LASH entre os anos de 1996 a 2005 para os componentes do ciclo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Xingu. Armazenamento de água no solo ( $A_t$ ), interceptação ( $I_t$ ), evapotranspiração (ET) e deflúvio (D).

Dias *et al.* (2015), ao simular o comportamento da ETr em uma sub-bacia da BHRX, localizada na região de transição entre os biomas Cerrado e Floresta Amazônica, encontraram valores de ETr médios anuais de  $1.025\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  para a região de floresta e  $1.010\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  para a região de cerrado. A ETr média anual estimada pelo modelo LASH para a BHRX foi igual a  $991,3\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  entre os anos de 1996 a 2005. Este resultado corrobora com o encontrado por Dias *et al.* (2015), indicando que a ETr em florestas tropicais e cerrados é semelhante à ETr de zonas de transição, sofrendo impacto dos valores de  $A_t$ .

Assim como a ETr, o comportamento do  $A_t$  também está relacionado com a precipitação (PANDAY *et al.*, 2015). Pode ser observado pelos valores apresentados na Tabela 14 e o comportamento da  $A_t$  na Figura 22, que o  $A_t$  aumenta durante a estação chuvosa e diminui durante a estação seca, fornecendo água para as perdas por ETr. Outro fator de influência nos valores de  $A_t$  são os solos profundos encontrados na BHRX que conferem maior capacidade de armazenamento de água. Os altos valores de  $A_t$  exercem papel importante na manutenção das florestas nativas da BHRX na estação seca.

## 5.5 Validação “Proxy basin test”

Conforme descrito em Klames (1986), o teste “Proxy basin test” é aplicado para a validação de modelos hidrológicos objetivando a representação de processos estacionários com calibração e validação em bacias distintas. Neste teste são necessárias duas bacias hidrográficas com características edafoclimáticas semelhantes, sendo uma utilizada para a calibração dos parâmetros do modelo e a outra para a validação.

Neste sentido, a validação do modelo LASH com os parâmetros calibrados para a BHRX foi realizada na BHRI, considerando o período de 01/01/2001 a 31/12/2005. Os resultados das estatísticas de desempenho aplicadas na validação considerando o passo de tempo diário e mensal na BHRI estão apresentadas na Tabela 15. Na Figura 23 estão apresentados os hidrogramas das vazões médias diárias e mensais observadas no exutório da BHRI e simulados no modelo LASH para o período de validação.

Tabela 16 - Valores obtidos para as estatísticas de desempenho Coeficiente de Nash e Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e sua versão logaritimizada ( $C_{NSlog(Q)}$ ) e o coeficiente  $P_{bias}$  para a validação do modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri considerando os passos de tempo diário e mensal.

Estatística	Diário	Mensal
$C_{NS}$	0,77	0,77
$C_{NSlog(Q)}$	0,82	0,87
$P_{bias}$	12,76	12,75

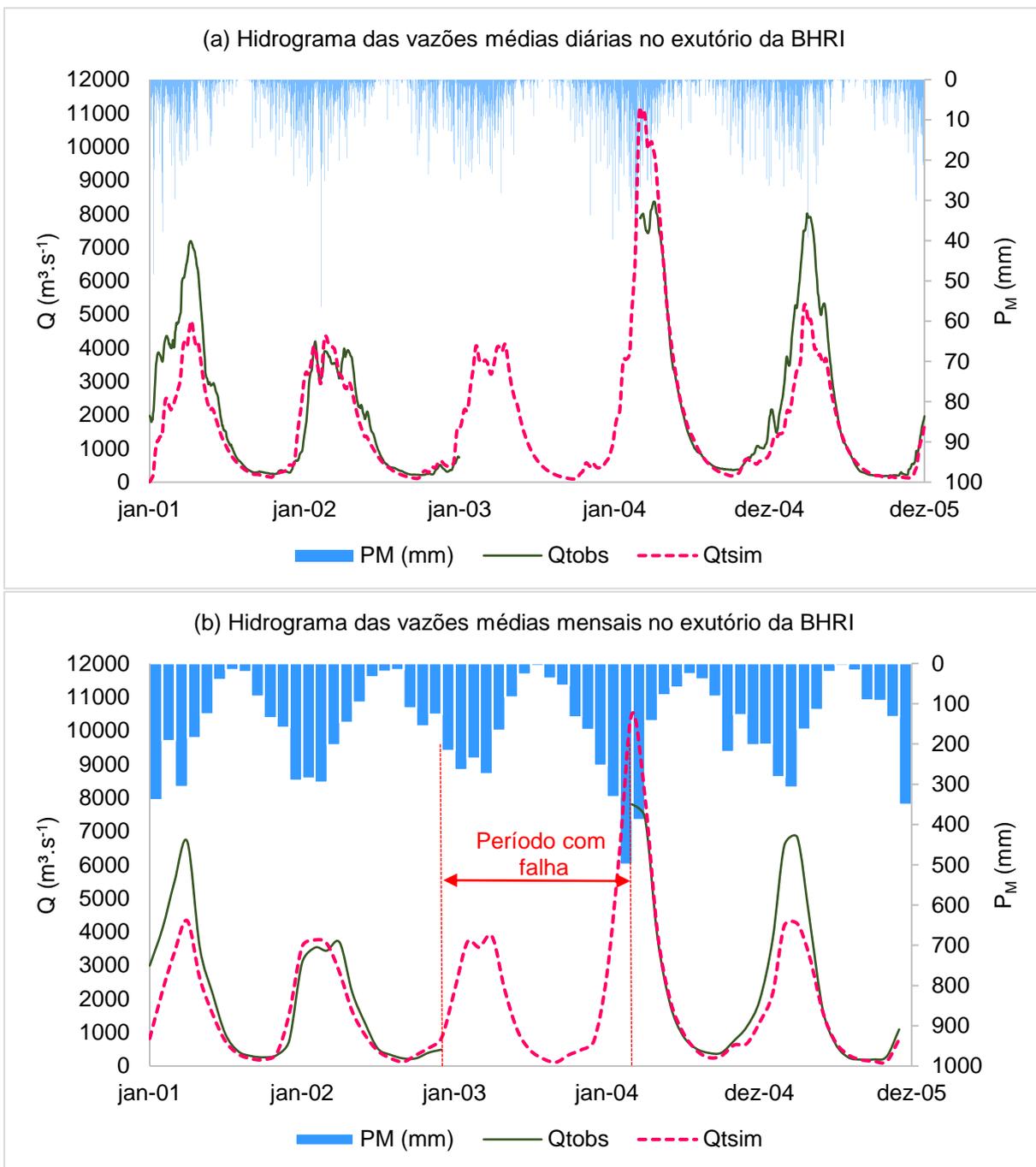


Figura 23 - Hidrogramas observados (Q<sub>obs</sub>) e simulados (Q<sub>sim</sub>) pelo modelo LASH e precipitação média observada (PM) para os períodos de validação do modelo LASH na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Iriri (BHRI), considerando o passo de tempo (a) diário e (b) mensal.

Analisando os valores da estatística  $C_{NS}$  na Tabela 15, pode-se observar que o ajuste das vazões médias diárias estimadas pelo modelo LASH às observadas no exutório da BHRI foi enquadrado como “Muito Bom” na classificação de Moriasi *et al.* (2007), assim como para os valores de vazões médias mensais. Considerando os valores de  $C_{NSlog}(Q)$ , o ajuste foi classificado como “Muito bom”, tanto na estimativa das vazões médias diárias, quanto nas vazões médias mensais (MORIASI *et al.*,

2007). Os resultados encontrados para a validação do modelo LASH na BHRI permitem inferir que este foi capaz de representar o comportamento das vazões na BHRI.

Os valores de  $P_{bias}$  apresentados na Tabela 15 para os passos de tempo diário e mensal indicaram ajuste “Bom” de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007). Além disso, ao observar o valor de  $P_{bias}$  em ambas análises, pode-se observar, pelo valor positivo, que ocorreram subestimativas dos valores das vazões estimadas frente às observadas. Este comportamento também pode ser observado na Figura 23, onde a maioria dos picos de vazão dos hidrogramas foram subestimados. A subestimativa das vazões de pico no exutório da BHRI pode estar associada à baixa densidade de estações de monitoramento hidrológico ao longo da bacia, que resultam em menor representatividade na variabilidade espacial da chuva.

Assim como realizado neste estudo, alguns autores também avaliaram o desempenho de modelos hidrológicos na validação *Proxy basin test*. Silva *et al.* (2018), ao realizar a modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia do baixo-médio São Francisco realizaram a validação em duas estações a montante. Os autores obtiveram resultados indicando que o modelo obteve melhor desempenho na representatividade de vazões mais elevadas (SILVA *et al.*, 2018).

Pereira *et al.* (2016) aplicaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio da Pomba, realizando a calibração no exutório da bacia e a validação em bacias à montante e a jusante. Na validação das três estações à montante, os valores de  $C_{NS}$  variaram entre 0,27 a 0,62,  $C_{NSlog(Q)}$  entre 0,16 a 0,67 e  $P_{bias}$  entre -27,8 a 15,3 (PEREIRA *et al.*, 2016). No estudo de Pereira *et al.* (2016), os autores também destacaram a influência da baixa representatividade da variabilidade espacial da chuva na estimativa das vazões mais altas.

Diferentemente da BHRX, a validação do modelo LASH na BHRI mostrou-se mais eficiente na simulação das vazões mínimas da bacia, dados valores de  $C_{NSlog(Q)}$  mais elevados que os de  $C_{NS}$ . Este fato pode ser justificado pelo valor do parâmetro  $C_{SS}$  do modelo, o qual pode ter sido mais representativo para a magnitude da área de drenagem da BHRI.

Para uma análise mais robusta da representatividade dos parâmetros calibrados na BHRX na estimativa das vazões no exutório da BHRI, a curva de permanência foi obtida, assim como algumas vazões de referência. As curvas de

permanência observada no exutório da BHRI e estimada no modelo LASH para o período de 2001 a 2005 estão apresentadas na Figura 24 e, na Tabela 17, estão apresentados os valores de vazão média diária observados e extraídos das curvas de permanência derivada do hidrograma estimado. Os resultados obtidos a partir da curva de permanência reforçam o comportamento incertezas associadas a estimativa dos extremos pelo modelo LASH.

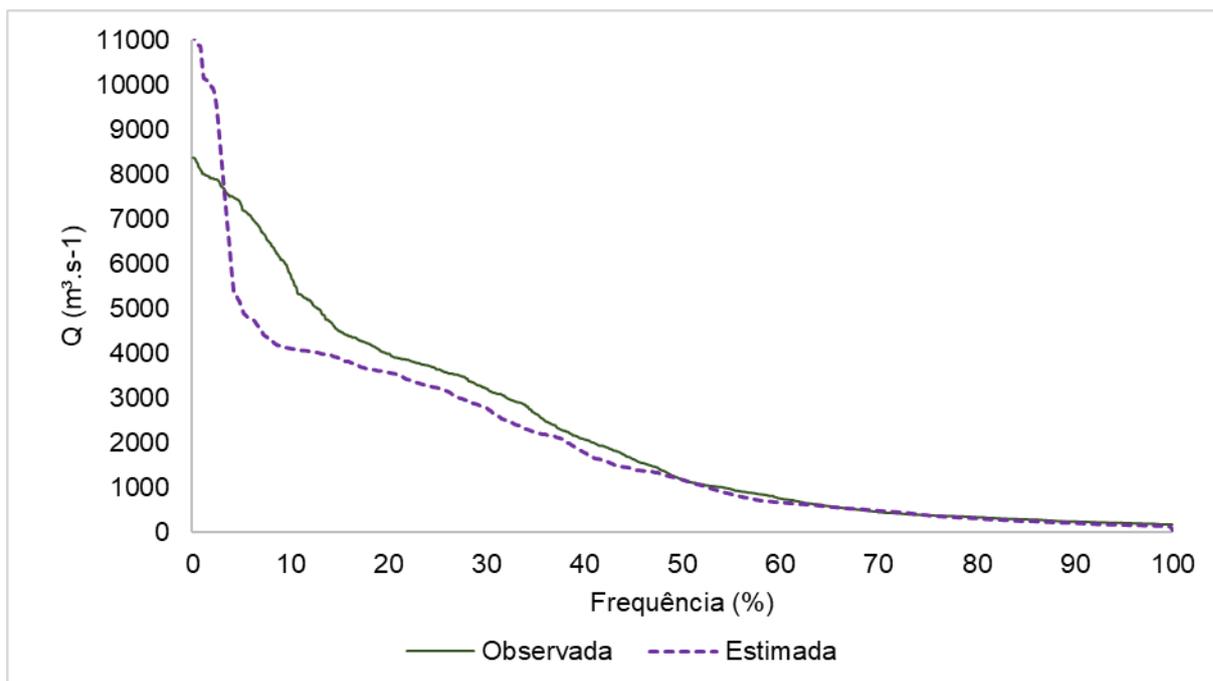


Figura 24 - Curvas de permanência observada e estimada pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri.

Tabela 17 - Vazões de referência extraídos das curvas de permanência e seus respectivos valores de vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH no exutório da bacia hidrográfica do rio Iriri.

Vazão de referência	Observada (m³.s⁻¹)	Estimada (m³.s⁻¹)	Erro (%)
Q <sub>10%</sub>	5.759,6	4.102,3	-28,8
Q <sub>20%</sub>	3.988,4	3.558,9	-10,8
Q <sub>30%</sub>	3.214,1	2.766,4	-13,9
Q <sub>40%</sub>	2.080,1	1.766,6	-15,1
Q <sub>50%</sub>	1.174,6	1.155,6	-1,6
Q <sub>60%</sub>	759,1	647,7	-14,7
Q <sub>70%</sub>	456,2	463,2	1,5
Q <sub>80%</sub>	340,6	291,9	-14,3
Q <sub>90%</sub>	245,1	188,1	-23,2
Coeficiente de vazões mínimas*	252,7	189,4	-25,1
Coeficiente de vazões máximas**	5911,3	5.175,2	-12,5

\*Média de todas as vazões com excedência acima de 80%.

\*\*Média de todas as vazões com excedência menor que 20%.

A validação dos parâmetros calibrados no modelo LASH para a BHRX no exutório da BHRI permitiu inferir que estes foram representativos para a BHRX como um todo. Neste sentido, a utilização destes parâmetros em uma bacia com condições edafoclimáticas semelhantes à BHRX, desprovida de monitoramento hidrológico, pode ser uma alternativa satisfatória no gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente no tocante às vazões mínimas.

## **5.6 Simulação hidrológica dos cenários de mudanças no uso do solo**

Com as simulações dos cenários, foi possível observar que as principais influências das mudanças de usos do solo no ciclo hidrológico estão associadas as mudanças na parametrização da vegetação, tais como, albedo ( $\alpha$ ), profundidade das raízes das plantas para acesso a água no solo ( $Pr$ ), índice de área foliar (IAF), resistência estomática ( $Re$ ) e altura da vegetação ( $h$ ). Estes parâmetros interferem em processos importantes no ciclo hidrológico, podendo aumentar ou diminuir a  $Q$ , a  $Et$ , a  $It$  e o  $At$ .

Os hidrogramas simulados para os cenários C1 e C2 em comparação com o hidrograma simulado para o cenário atual podem ser observados na Figura 25. Já os hidrogramas simulados para os cenários C3 e C4 frente ao hidrograma do cenário atual estão apresentados na Figura 26. Enquanto que, o hidrograma simulado para o C5 frente ao hidrograma do cenário atual está ilustrado na Figura 27.

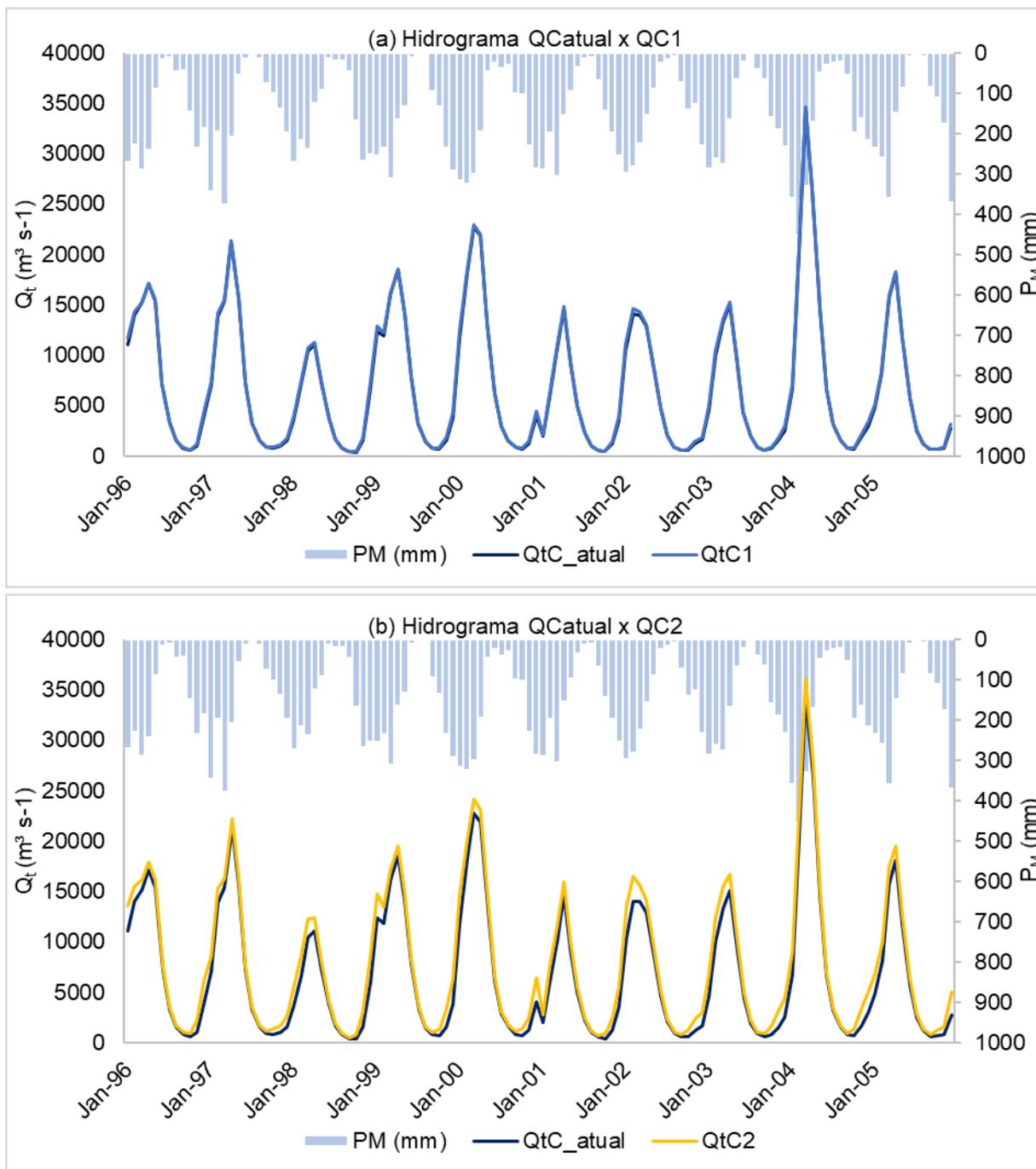


Figura 25 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catural) em comparação com (a) cenário 1 (C1) e (b) cenário 2 (C2) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

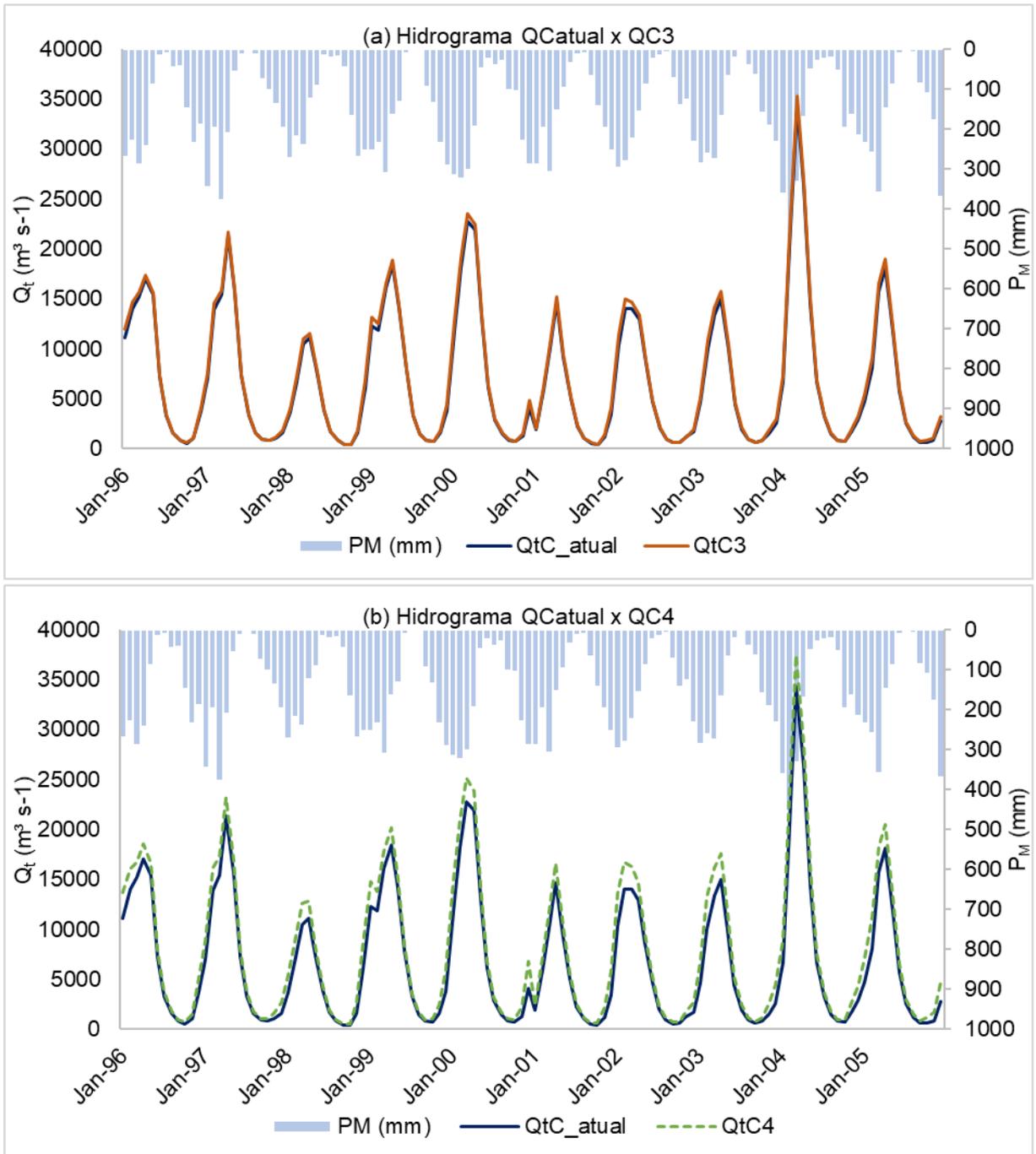


Figura 26 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catual) em comparação com (a) cenário 3 (C3) e (b) cenário 4 (C4) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

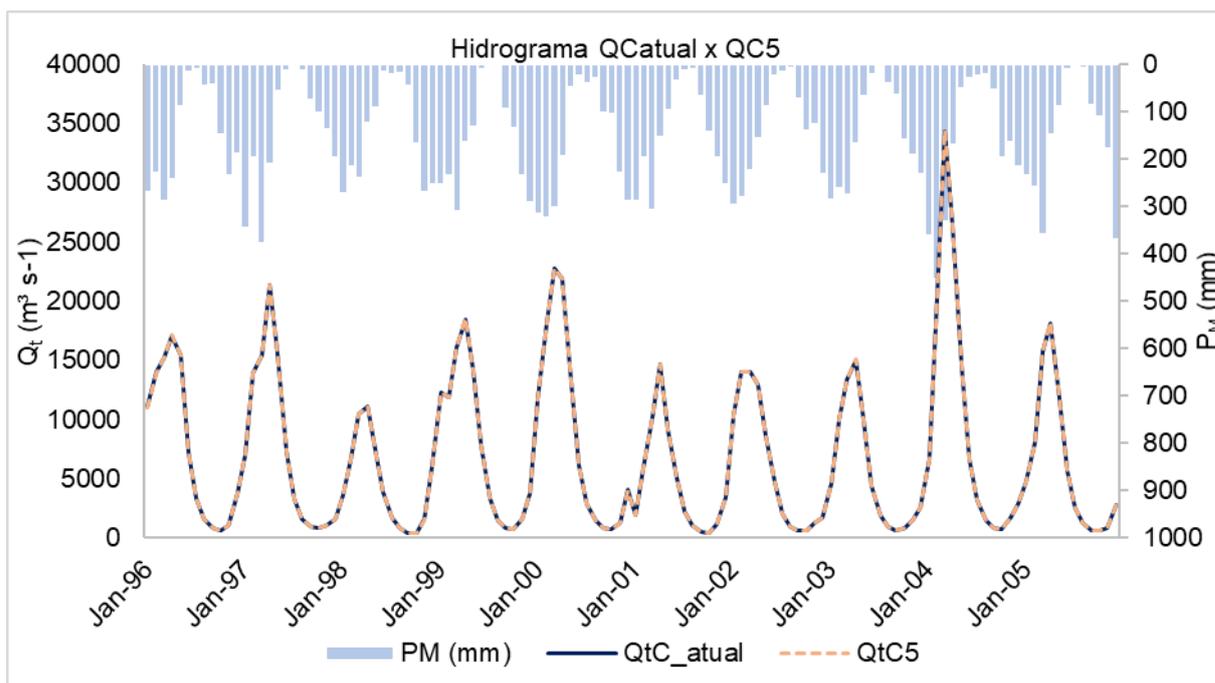


Figura 27 - Hidrogramas simulados pelo modelo LASH para o cenário atual (Catural) em comparação com o cenário 5 (C5) no exutório da bacia hidrográfica do rio Xingu.

Analisando os hidrogramas apresentados nas Figuras 25, 26 e 27, pode-se observar que, de maneira geral, as modificações nos usos do solo na BHRX produziram aumento nas vazões. Ademais, pode-se observar que os aumentos foram mais evidentes nas vazões de pico, ou seja, sobre o ESD. Viola *et al.* (2014) relatam que quando florestas nativas são retiradas a infiltração e o volume de água no solo são reduzidos, o que conduz em um aumento das vazões.

Para melhor avaliação do efeito das mudanças no uso do solo da BHRX no deflúvio, as curvas de permanência para os cenários simulados foram computadas e estão apresentadas na Figura 28. Ademais, na Tabela 18, estão descritos os valores das vazões de referência extraídos para cada cenário.

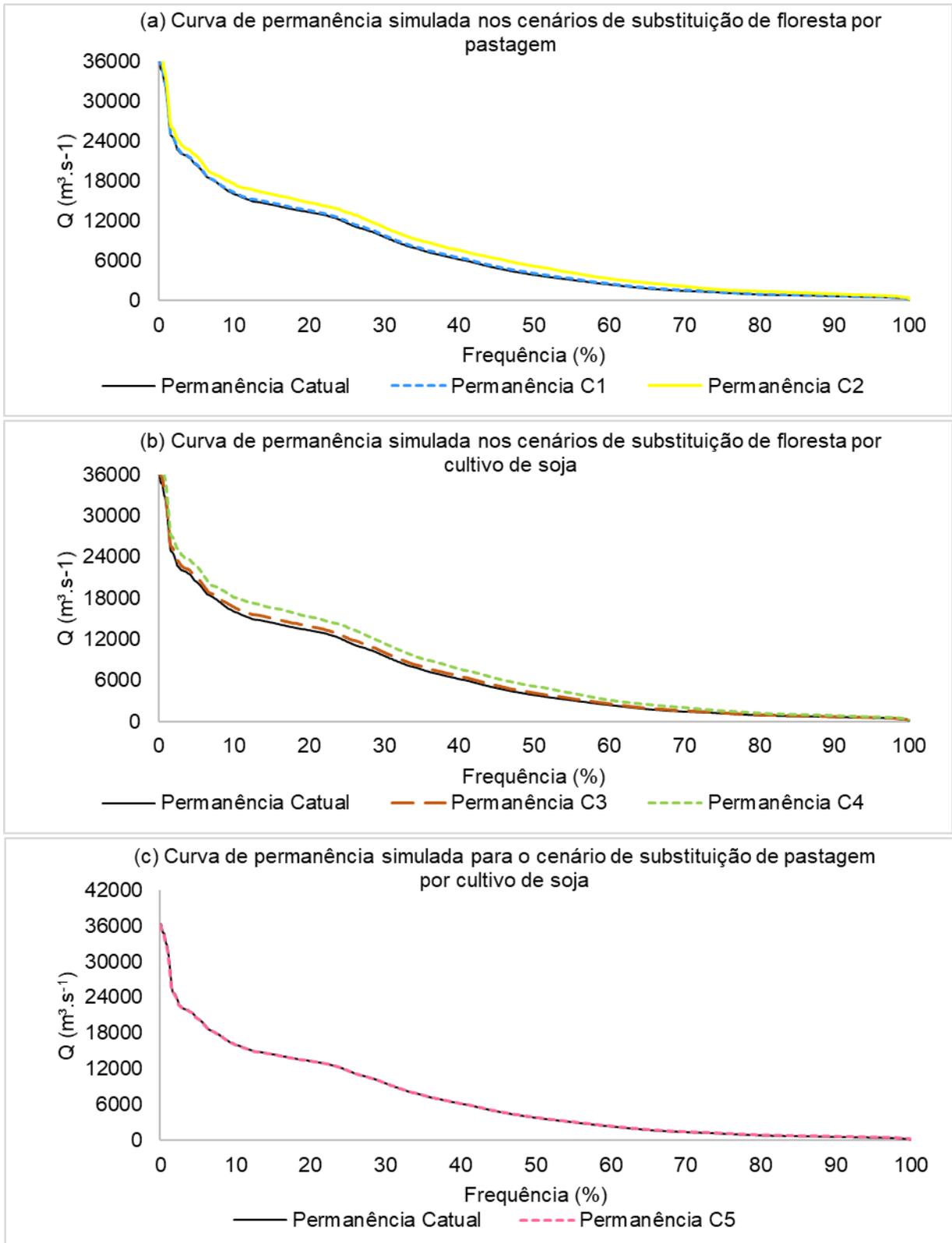


Figura 28 - Curvas de permanência simuladas pelo modelo LASH para os cenários de mudança no uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu: a) cenários de mudanças de 50% (C1) e 100% (C2) da floresta nativa para pastagem; b) cenários de mudanças de 50% (C1) e 100% (C2) da floresta nativa para cultivo de soja; e c) cenário de mudança de 100% das áreas de pastagem para cultivo de soja (C5).

Tabela 18 - Vazões de referência extraídas das curvas de permanência simuladas para o cenário atual e os cenários de mudanças no uso do solo da bacia hidrográfica do rio Xingu.

Vazão de Referência	Catual (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	C1 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	C2 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	C3 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	C4 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	C5 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
Q <sub>10%</sub>	16.066,5	16.314,6	17.600,2	16.701,2	18.138,0	16.070,2
Q <sub>20%</sub>	13.334,9	13.585,8	14.760,9	13.914,3	15.321,3	13.336,5
Q <sub>30%</sub>	9.590,3	9.852,2	11.056,4	10.125,1	11.462,7	9.610,0
Q <sub>40%</sub>	6.203,9	6.456,0	7.643,5	6.584,0	7.711,8	6.189,7
Q <sub>50%</sub>	3.865,9	4.101,9	5.171,4	4.192,0	5.149,8	3.862,4
Q <sub>60%</sub>	2.417,2	2.560,1	3.299,5	2.613,7	3.150,2	2.407,5
Q <sub>70%</sub>	1.456,3	1.586,0	2.157,4	1.574,2	2.060,2	1.451,5
Q <sub>80%</sub>	917,4	958,8	1.401,9	982,2	1.250,8	917,7
Q <sub>90%</sub>	672,4	720,8	1.005,5	719,1	880,8	671,8
Coefficiente de vazões mínimas*	661,3	707,3	994,0	709,4	862,7	661,4
Coefficiente de vazões máximas**	18.055,4	18.256,6	19.503,4	18.684,3	20.250,5	18.063,1

\*Média de todas as vazões com excedência acima de 80%.

\*\*Média de todas as vazões com excedência menor que 20%.

Ao observar as curvas de permanência da Figura 28a e b, é possível analisar que, de maneira geral, os cenários de troca de floresta para pastagem e para cultivo de soja superestimaram os valores de vazão frente ao cenário atual. Para o C5, não houve diferenças significativas. Resultados semelhantes foram encontrados por Farinosi *et al.* (2019), onde os autores relatam que a introdução do desmatamento ocasiona em um aumento constante de todas as magnitudes de vazão, exceto as vazões muito baixas (> 95% de excedência) na bacia hidrográfica do rio Tapajós.

Viola *et al.* (2014), ao analisar o impacto de cenários de desmatamento na hidrologia da BHRG utilizando o modelo LASH, também encontrou resultados indicando aumento nas vazões, principalmente devido à redução da ETr e It. Assim como neste estudo, Cristina *et al.* (2015) também destacaram maior impacto no aumento das vazões da BHRX em áreas de desmatamento para cultivo de soja. Dias *et al.* (2015), constataram que nas pequenas sub-bacias da BHRX que analisaram, a conversão de florestas para o cultivo de soja trouxe um aumento médio na vazão de quase 100%.

Foram computados os valores médios anuais dos componentes do balanço hídrico no período de 1996 a 2005 para os 5 cenários. Os componentes calculados foram a chuva, a Et, a It, o At, o deflúvio superficial ( $D_{sup}$ ) e o deflúvio de base ( $D_{base}$ ) e estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores médios anuais de chuva, evapotranspiração ( $E_t$ ), interceptação ( $I_t$ ), armazenamento atual ( $A_t$ ), deflúvio superficial ( $D_{sup}$ ) e deflúvio de base ( $D_{base}$ ) computados para o cenário atual ( $C_{atual}$ ) e para os cinco cenários de mudanças no uso do solo na bacia hidrográfica do rio Xingu.

mm.ano <sup>-1</sup>	$C_{atual}$	C1	C2	C3	C4	C5
Chuva	1826.3	1826.3	1826.3	1826.3	1826.3	1826.3
$E_t$	1023,0	1030.2 (+0.7 %)	998.0 (-2.4 %)	1015.7 (-0.7 %)	973.0 (-4.9 %)	1023.8 (+0.1 %)
$I_t$	196.5	187.4 (-4.6 %)	173.4 (-11.7 %)	186.7 (-5.0 %)	174.6 (-11.1 %)	196.1 (-0.2 %)
$A_t$	166.3	152.5 (-8.0 %)	129.9 (-21.9 %)	153.1 (-7.9 %)	138.1 (-16.9 %)	166.1 (-0.1 %)
$D_{sup}$	38.6	39.6 (+2.6 %)	44.8 (+16.1 %)	40.5 (+5.1 %)	45.8 (+18.6 %)	38.6 (+0.0 %)
$D_{base}$	1.5	1.5 (-2.5 %)	1.4 (-7.5 %)	1.5 (-1.6 %)	1.5 (-3.6 %)	1.5 (-0.1 %)

A atividade de desmatamento afeta estes efeitos e ameaça o abastecimento dos ecossistemas, como por exemplo, a redução da  $I_t$  aumenta o escoamento superficial e a erosão do solo, enquanto que, a redução da  $E_t$  diminui a umidade do ar e interfere no comportamento da chuva (CASAGRANDE *et al.*, 2020). Neste sentido, analisando os valores dos componentes do balanço hídrico da Tabela 19, pode-se observar que, de maneira geral, os cenários de desmatamento na BHRX resultaram em reduções nas taxas de  $E_{Tr}$ ,  $I_t$ ,  $A_t$  e  $D_{base}$ , enquanto que, para o  $D_{sup}$  houve aumento nos valores. No entanto, ao observar os valores de  $E_t$ , pode-se observar que em relação ao  $C_{atual}$ , houve um aumento no C1 e C5.

O aumento da  $E_{Tr}$  no C1 e C5 pode ser justificado pelos valores dos índices de vegetação adotados na modelagem hidrológica. Os índices utilizados, principalmente no tocante a  $Re$ , podem não ter sido representativos para as condições da vegetação presente na BHRX, uma vez que a escolha destes índices na literatura é subjetiva. Viola *et al.* (2014), ao realizar uma análise de sensibilidade para entender a influência dos índices da vegetação no modelo LASH, concluíram que a  $Re$  causa efeitos perceptíveis na evapotranspiração. Assim como, Casagrande *et al.* (2020) relatam que a magnitude das diferenças na  $E_t$  nos diferentes tipos de vegetação depende do conjunto de dados utilizados e da formulação do modelo hidrológico utilizado.

De acordo com Wang-Erlandsson *et al.* (2014), as florestas são caracterizadas por maiores taxas de transpiração e interceptação. Neste sentido, na troca de florestas nativas para pastagens é esperado que ocorra a diminuição da  $E_{Tr}$ , uma vez que, segundo Viola (2008), em áreas de pastagem a  $Re$  reduz substancialmente o processo de transpiração. Ademais, outro fator de influência na redução da  $E_{Tr}$  é o aumento de  $\alpha$  causado pela redução de florestas, uma vez que a vegetação mais densa de florestas nativas reflete menos radiação solar do que as vegetações menos

densas de pastagens e cultivos de soja (CARAM, 2010). Entretanto, as áreas de pastagens são caracterizadas por maiores taxas de evaporação de água do solo (WANG-ERLANDSSON *et al.*, 2014).

O cultivo de pastagem e de soja na região da BHRX possui a dinâmica de plantio durante o período úmido (novembro - abril) e colheita durante o período seco (maio - outubro). Durante o período seco, os solos das áreas de pastagem e cultivo de soja tendem a ficar com características mais próximas ao solo exposto. Neste período é esperado ocorra diminuição na taxa de  $E_t$ , uma vez que há o aumento da  $R_e$  e a redução dos valores de IAF. Este comportamento foi observado nas simulações dos cenários C1, C2, C3, C4 na BHRX, conforme observado na Figura 29, onde a  $E_t$  reduziu no período de seca da BHRX (maio – outubro). Todavia, para o C5 este comportamento não foi verificado, uma vez que não houve diferenças significativas quando analisadas frente ao cenário atual (Figura 29c).

Analisando os valores de  $I_t$  apresentados na Tabela 19, é possível observar que nos cinco cenários esta variável diminuiu, no entanto, o C2 obteve maior diferença frente o C atual, com diminuição dos valores equivalendo a 11,7%. Este comportamento é devido aos valores de IAF da pastagem serem menores que os valores considerados para o cultivo de soja. No entanto, os valores de redução na  $I_t$  nos cenários de mudanças de floresta para cultivo de soja (C3 e C4) foram bem próximos aos cenários de mudanças de floresta para pastagem.

Na Figura 30 está apresentado o comportamento médio mensal da  $I_t$  nas simulações dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 em comparação com a  $I_t$  do C atual no período de 1996 a 2005. O comportamento observado na Figura 30 ilustra a influência da redução dos valores de IAF na simulação da  $I_t$ . No entanto, diferentemente da  $E_t$ , as reduções nos valores de  $I_t$  simulados foram mais acentuadas no período chuvoso da região.

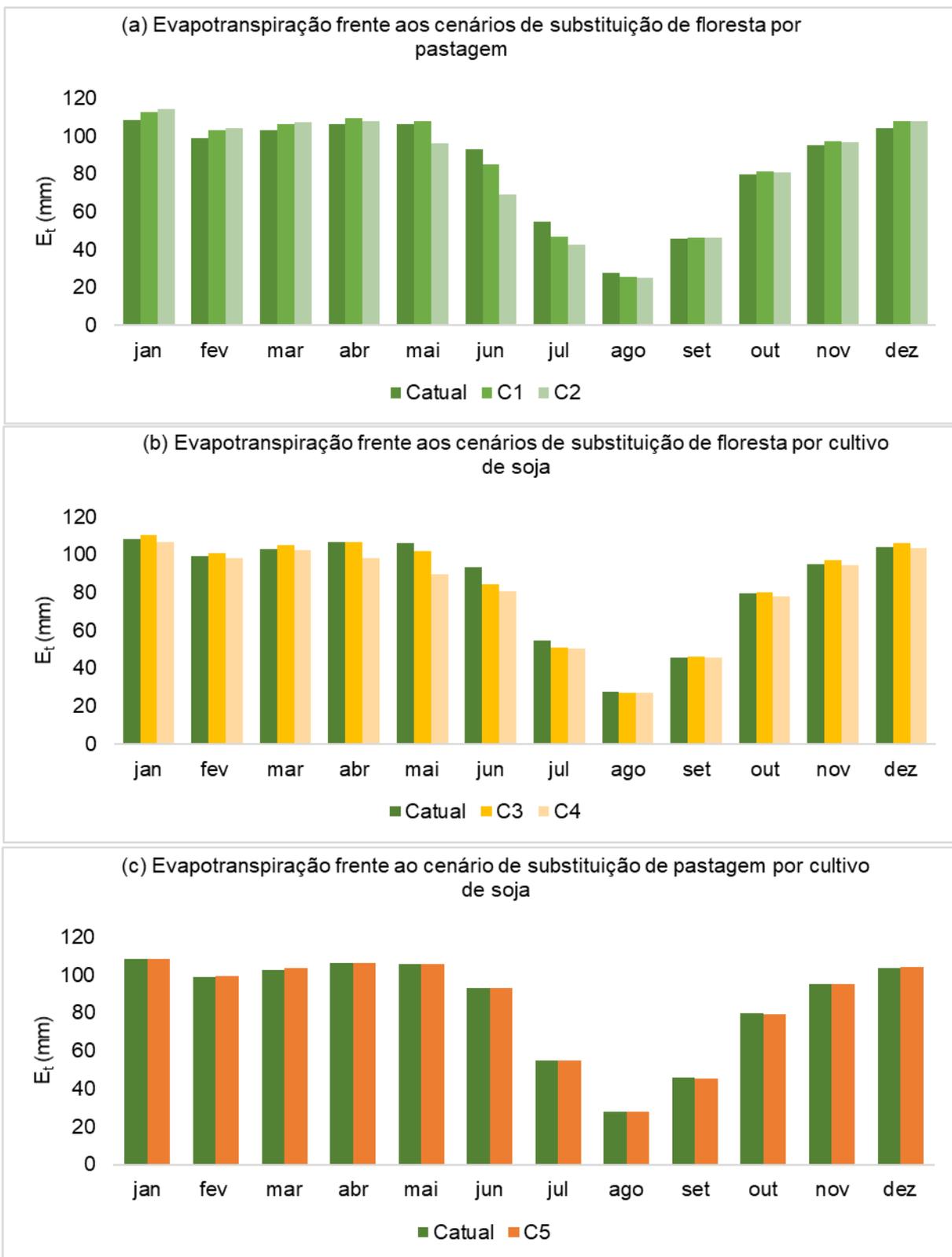


Figura 29 - Evapotranspiração ( $E_t$ ) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu.

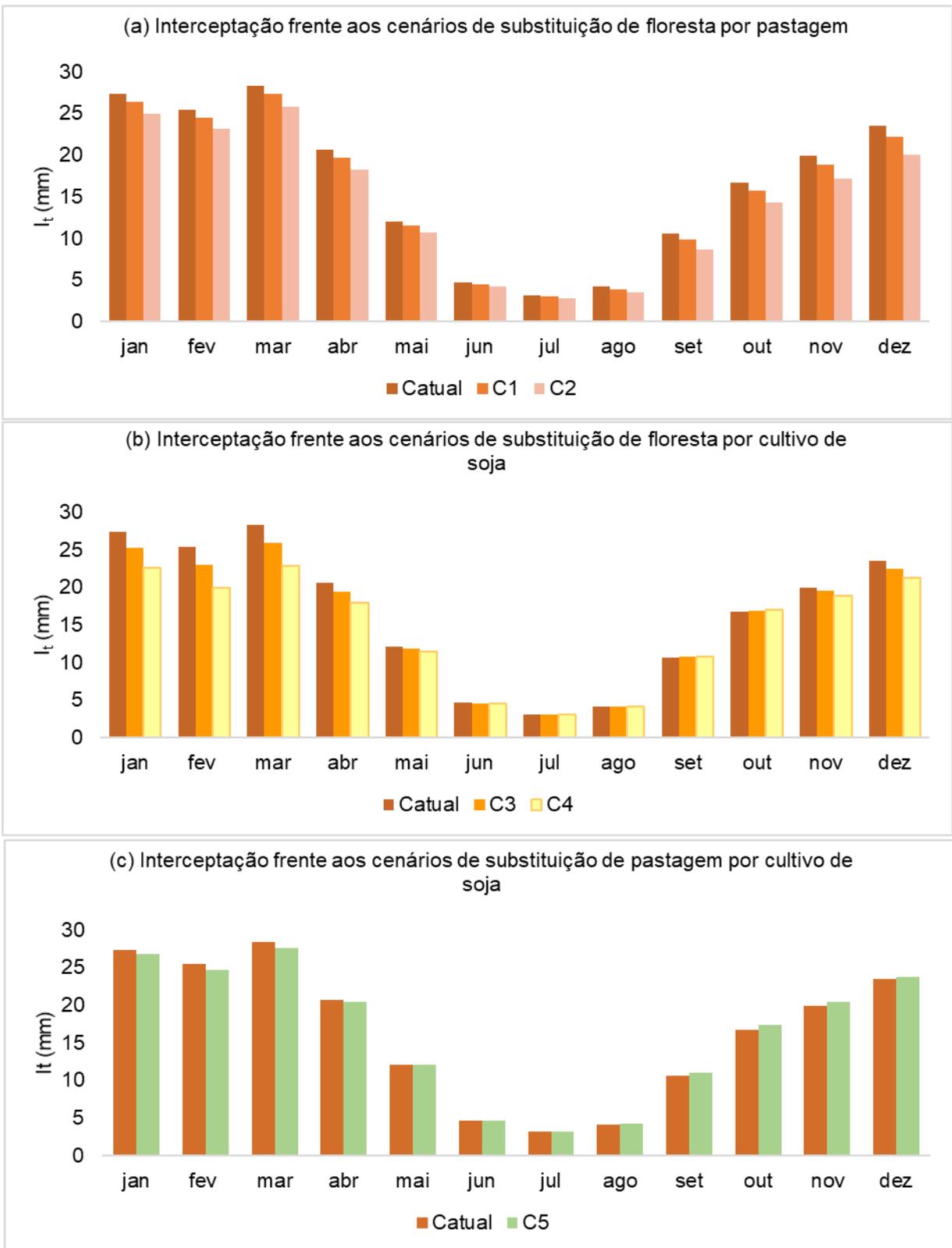


Figura 30 – Intercepção ( $I_t$ ) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu.

Santos *et al.* (2018) relatam que a redução das áreas de florestas nativas reduz a  $E_t$  e aumenta simultaneamente o deflúvio, porque as raízes profundas das árvores lhes permitem captar água armazenada em camadas profundas do solo e manter a taxa de  $E_t$  elevada mesmo nas estações secas. Neste sentido, além da  $E_t$  e  $I_t$ , a troca substituição de florestas nativas por pastagens e por plantio de soja também influencia no  $A_t$ , uma vez que a profundidade das raízes das pastagens e da soja são menores. Ademais, de acordo com Casagrande *et al.* (2020), a troca de floresta para pastagem e cultivo de soja aumenta a evaporação de água do solo, reduzindo o  $A_t$ .

Os valores apresentados na Tabela 19 indicam que houve reduções nos valores de  $A_t$  em todos os cenários, com destaque de maior redução no C2 (-21,9%). Além da redução na profundidade das raízes, outro fator de influência na redução de  $A_t$  neste cenário foram as classes de solo presentes nas áreas de ocorrência das mudanças de floresta para pastagem. As áreas de mudanças no C2 compreenderam majoritariamente regiões de ocorrência de Argissolos e Neossolo, os quais são caracterizados por possuírem profundidades média e baixa e menores umidades de saturação e ponto de murcha permanente. Por outro lado, os solos compreendidos nos cenários de mudanças da floresta para cultivo de soja (C3 e C4) foram predominantemente Latossolos, com alta profundidade e Cambissolos. Apesar do Cambissolo não possuir alta profundidade, as áreas de mudanças dos cenários C3 e C4 são caracterizados por maiores valores de umidade de saturação e de ponto de murcha permanente.

O comportamento médio mensal do  $A_t$  nas simulações dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 em comparação com a  $I_t$  do Catual no período de 1996 a 2005 pode ser observado na Figura 31. É perceptível a diminuição dessa variável ao longo dos meses do ano, tanto na estação chuvosa quanto na estação seca. Na Figura 31c, os valores de  $A_t$  estimados para o C5 quase não se diferenciam dos observados.

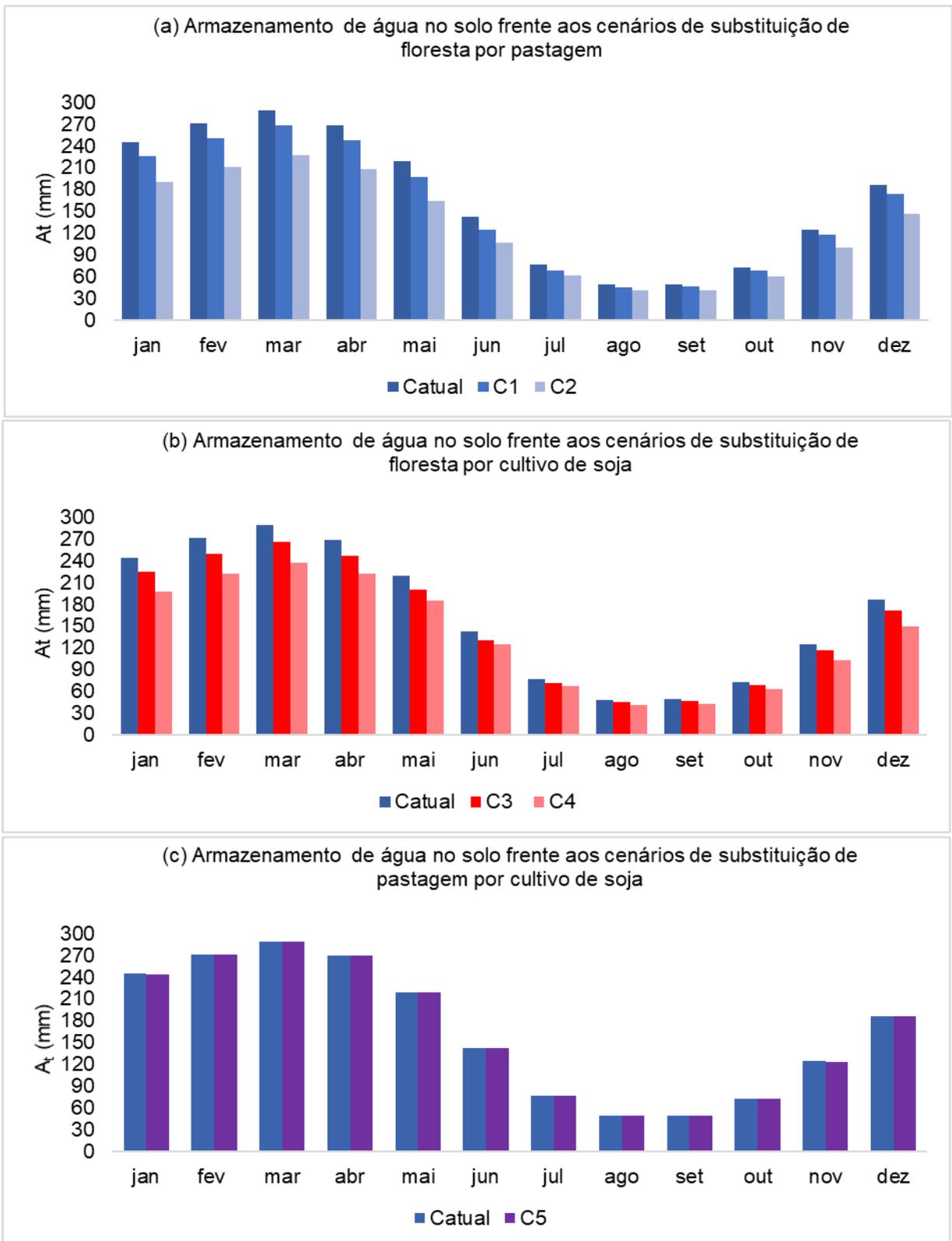


Figura 31 – Armazenamento de água no solo ( $A_t$ ) simulada para os cenários de substituição de 50% (C1) e 100% (C2) das áreas de floresta nativa por áreas de pastagem, substituição de 50% (C3) e 100% (C4) das áreas de floresta nativa para áreas de plantio de soja e substituição de 100% das áreas de pastagem para plantio de soja (C5) nas áreas em que esta atividade vem ocorrendo com maior intensidade na bacia hidrográfica do rio Xingu.

Analisando os valores de  $D_{base}$  apresentados na Tabela 19 pode-se observar que houve diminuição nos valores em todos os cenários, enquanto que, para os valores de  $D_{sup}$  houve incrementos para os cenários C1, C2, C3 e C4. Segundo Souza *et al.* (2018), a remoção da floresta nativa gera uma resposta rápida nos valores de  $D_{sup}$  devido a diminuição dos processos de interceptação e infiltração, reduzindo o escoamento base.

Considerando os cenários de troca de florestas nativas para pastagem, os valores de  $D_{sup}$  aumentaram 2,6% para o C1 e 16,1% para o C2. Segundo Santos *et al.* (2018), o aumento do  $D_{sup}$  nas áreas de pastagem é causado pela menor cobertura vegetal e maior compactação do solo pelo gado em pastejo, que reduz a capacidade de infiltração. Em pequenas sub-bacias da BHRX, compreendidas nas áreas de cabeceira, com presença de Latossolos, Scheffler *et al.* (2011) mediram uma redução na infiltração de  $1.258 \text{ mm.h}^{-1}$  para  $100 \text{ mm.h}^{-1}$  após a conversão da floresta nativa para pastagem. Santos *et al.* (2018) encontraram um aumento anual no  $D_{sup}$  de 6,6% e 183,1%, considerando projeções de mudanças de floresta nativa para pastagem para 2020 e 2050 na BHRX, utilizando o modelo SWAT.

Os cenários de troca de floresta nativa para áreas de cultivo de soja foram os que resultaram em maiores incrementos de  $D_{sup}$ , correspondendo a 5,1% para o C3 e 18,6% para o C4. Este fato pode estar associado com a diminuição de ETr nesses cenários, ocasionado pelos valores mais altos de Re do cultivo de soja. Da mesma forma, a leve redução no valor de  $D_{sup}$  para o C5 pode estar associado com o leve aumento na ETr ocorrida neste cenário.

Os resultados encontrados para estimativa do  $D_{sup}$  nos cenários de desmatamento na BHRX corroboram com o estudo de Guimberteau *et al.* (2017), que encontraram um aumento de 8% no  $D_{sup}$  da BHRX com o aumento do desmatamento. Stickler *et al.* (2013) encontraram um aumento de 10 a 12% no  $D_{sup}$  devido ao desmatamento de agricultura de 40% na BHRX.

O comportamento dos componentes do balanço hídrico entre os cenários de mudanças no uso do solo pode ser influenciado, além dos motivos já discutidos, pela diferença na resposta das plantas as oscilações das variáveis meteorológicas. Farinosi *et al.* (2019) elucidam que áreas agrícolas são mais vulneráveis à diminuição da precipitação e ao aumento da temperatura e radiação solar, resultando em condições geralmente mais secas. Em contrapartida, as florestas são relativamente resistentes

às variações nestas variáveis, principalmente devido à capacidade de extrair água das camadas mais profundas do solo (FARINOSI *et al.*, 2019).

A avaliação do papel das florestas no ciclo hidrológico tem sido amplamente discutida na literatura, principalmente, considerando a perspectiva de demanda de água para consumo, geração de energia, irrigação, entre outros (Garcia-Prats *et al.*, 2016). Todavia, as análises considerando esta perspectiva podem indicar de maneira errônea que as florestas tendem a reduzir a quantidade de água disponível para as atividades de demanda a jusante, em comparação a outros usos do solo, como pastagem e soja. Nos cenários de desmatamento (C1, C2, C3, C4) pode-se observar redução do escoamento base, significando redução do processo de infiltração e recarga.

Neste sentido, é importante ressaltar que as florestas são responsáveis pela intensificação do ciclo hidrológico em diferentes escalas espaciais. São imprescindíveis para a manutenção do clima, uma vez que o vapor d'água fornecido para a atmosfera influencia substancialmente o regime de chuvas (CASAGRANDE *et al.*, 2020). Conforme Van Der Ent *et al.* (2010), na Floresta Amazônica a ET das florestas sustenta mais de 70% da precipitação anual. A reciclagem da chuva, por sua vez, contribui para a manutenção dos próprios ecossistemas florestais e da agricultura (CASAGRANDE *et al.*, 2020).

Desta forma, as taxas de desmatamento atuais têm o potencial de alterar significativamente a magnitude dos componentes do ciclo hidrológico na Floresta Amazônica. De acordo com Lovejoy; Nobre (2018), os níveis de desmatamento na região amazônica podem levar a alterações do ciclo hidrológico provocando transição da floresta para a savana. Portanto, preservar a extensão e a integridade da floresta amazônica e do Cerrado é cada vez mais crucial para garantir o funcionamento sustentável do ciclo hidrológico.

A maioria dos modelos hidrológicos utilizados para a simulação adequada dos impactos das mudanças no uso do solo na hidrologia de bacia hidrográficas apresentam limitações. De acordo com Mello *et al.* (2016), estas limitações estão associadas as simplificações adotadas nas estruturas do modelo, como por exemplo: i) basear o impacto das mudanças para diferentes usos do solo somente em parâmetros relacionados a vegetação, como  $R_e$ , IAF, Pr, entre outros; e ii) a incapacidade dos modelos em descrever a realidade, principalmente considerando a

escala temporal, e a dinâmica de infiltração e seu impacto de acordo com cada uso do solo.

Ademais, Casagrande *et al.* (2020) discutem que modelos hidrológicos com diferentes escalas espacial (local, mesoescala ou global) ou temporal (diária, sazonal, anual ou plurianual) podem fornecer resultados significativamente diferentes, principalmente na simulação da ET. Os autores relatam que devido à variabilidade espaço-temporal dos processos de ET, as análises na mesoescala são consideradas mais adequadas para a simulação em comparação com estudos realizados em grande escala geográfica. Assim como descrito em Sousa *et al.* (2018), a sensibilidade em estimar os impactos hidrológicos provenientes de mudanças no uso do solo pode sofrer influência pelo tamanho da área da bacia hidrográfica.

## 6 Conclusão

Neste estudo, foi feita uma análise de desempenho do modelo LASH calibrado e validado na BHRX, e, posteriormente, o modelo foi aplicado em uma sub-bacia na etapa de validação. Ademais, o modelo LASH foi empregado para a simulação dos hidrogramas do cenário atual de uso do solo e dos cenários criados com base na crescente atividade de desmatamento na BHRX. Foram avaliados os impactos gerados no ciclo hidrológico da BHRX frente a possíveis cenários de desmatamento ao longo da bacia. Para avaliação do efeito dos cenários, foram avaliados além da produção de escoamento, o comportamento dos componentes Et, It e At.

Na modelagem hidrológica, os resultados obtidos permitiram inferir que o modelo LASH foi capaz de compreender o comportamento hidrológico de uma bacia com condições edafoclimáticas e de porte muito diferentes das anteriormente testadas. Os resultados encontrados para a calibração e validação do modelo, tanto para o passo de tempo diário, quanto mensal, foram considerados muito bons, apesar de algumas incertezas associadas a estimativa dos valores extremos. Principalmente, ao avaliar a magnitude da bacia, a disponibilidade de dados e a diversidade de características da bacia, tais como tipos de solos, vegetação, relevo, clima, etc.

A validação "*Proxy basin test*" realizada aplicando os parâmetros calibrados no exutório da BHRX no exutório da BHRI também alcançou bons resultados, dado que, os hidrogramas estimados tiveram boa concordância com os hidrogramas observados. Os resultados permitem concluir que os parâmetros calibrados pelo modelo LASH são representativos para a BHRX como um todo. Portanto, espera-se que a utilização destes parâmetros em uma bacia com condições edafoclimáticas semelhantes à BHRX seja satisfatória.

Neste sentido, as análises das simulações dos cenários permitiram concluir que, de maneira geral, as mudanças nos usos do solo com base no desmatamento na BHRX acarretaram em um aumento de vazões. Todavia, este aumento foi mais significativo nas análises do C4, o qual considera que 100% das áreas de florestas serão convertidas para áreas de cultivo de soja nas áreas em que esta atividade ocorre mais frequentemente. Quanto às análises das simulações dos cenários de uso do solo com base em outros componentes do ciclo hidrológico, é possível concluir que

o desmatamento na BHRX tende a acarretar em reduções na ET, na  $I_t$  e no  $A_t$ , em até 4,9%, 11,7% e 21,9%, respectivamente.

## Referências

ABE, C. A.; LOBO, F. L.; DIBIKE, Y. B.; COSTA, M. P. F.; SANTOS, V. NOVO, E. M. L. M. Modelling the Effects of Historical and Future Land Cover Changes on the Hydrology of an Amazonian Basin; **Water**, v. 10, 2018.

ADHIKARY *et al.* Effect of Calibration and Validation Decisions on Streamflow Modeling for a Heterogeneous and Low Runoff–Producing River Basin in India. **J. Hydrol. Eng.**, v. 24, n. 7, 2019.

ALLEN, R. G *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V.; Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, v. 20, n. 1, p. 129 – 137

ALTAF, F.; MERAJ, G.; ROMSHOO, D. A. Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Hindawi Publishing Corporation Geography Journal**, 2013.

ALVARES *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Floresta Amazônica Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, p. 423 - 434, 2012.

AMORIM, T. X.; SENNA, M. C. A.; CATALDI, M. Impactos do desmatamento progressivo da Floresta Amazônica na precipitação do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

ANDRADE, N. P. V.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T.L.; GUO, L.; MELLO, C.R. Assessment of Spatial and Temporal Soil Water Storage Using a Distributed Hydrological Model. **Water Resources Management**, 2020. doi: /10.1007/s11269-020-02711-4

ANDREW, R.; DYMOND, J. A distributed model of water balance in the Motueka catchment, New Zealand. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 10, p. 1519-1528, 2007. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.10.006.

ARIAS, M. E.; FARINOSI, F.; LEE, E.; LIVINO, A.; BRISCOE, J.; MOORCROFT, P. R. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. **Nature Sustainability**, 2020.

ARNOLD, J. G *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. **Journal of American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American water resources association**, v. 34, n. 1, 1998.

ARTAXO, P.; DIAS, M. A. F. S.; NAGY, L.; LUIZÃO, F. J.; CUNHA, H. B.; QUESADA, C. A. N.; MORENGO, J. A.; KRUSCHE, A. Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da Floresta Amazônica. **Floresta Amazônica sem fronteiras**, 2014.

AZEVEDO, J. H. **Fluxos subterrâneos e recarga do sistema aquífero Alter do chão em lateritos amazônicos: estudo de caso em Porto Trombetas, Pará.** Tese. Universidade de Brasília. Doutorado em Hidrogeologia e Meio Ambiente. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, 2019.

BANDEIRA, M. N.; CAMPOS, F. I. Bioma Cerrado: relevância no cenário hídrico brasileiro. **Anais do IX Simpósio Nacional de Ciência e Meio Ambiente**, 2018.

BARROS, Claudia Alessandra Peixoto de *et al.* **Dinâmica dos escoamentos na modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia rural.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

BATHURST, J. *et al.* Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 2: Model analysis. **Journal of Hydrology**, v. 400, n. 3-4, p. 292-304, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.001.

BESKOW, S *et al.* 2016. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, p. 2567–2578, 2016. DOI: 10.1080/02626667.2015.1133912.

BESKOW, S *et al.* Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, p. 160–171, 2011. DOI: 10.1016/j.catena.2011.03.010.

BESKOW, S. 2009. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265–274, 2011. DOI: 10.1590/S0103-90162011000300001.

BESKOW, S.; NORTON, L.D.; MELLO, C.R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341–363, 2013. DOI: 10.1007/s11269-012-0189-8.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 1ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BRASIL ESCOLA. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/bacias-hidrograficas.htm>> Acesso em: janeiro de 2021.

BRAVO, J. M. *et al.* Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. **Climatic change**, v. 127, p. 27-41, 2014. Doi: 10.1007/s10584-013-0816-2.

CALDATO, S. L.; SCHUMACHER, M. V. O uso de água pelas plantações florestais – uma revisão. **Revista Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 507-516, 2013.

CALDEIRA, T. L *et al.* ArcLASH: uma ferramenta em SIG para automatizar o processamento da base de dados espaciais do Modelo Hidrológico LASH. In: XVII Encontro de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pelotas, 2015.

CALDEIRA, T. L. *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.10.009.

CALDEIRA, T. L. 2016. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul** (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas). 2016. 247f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

CALDEIRA, T. L. **Impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo**. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CALETKA *et al.* Improvement of SCS-CN Initial Abstraction Coefficient in the Czech Republic: A Study of Five Catchments. **Water**, v. 12, 2020.

CAMPOS, J. O.; CHAVES, H. M. L. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 157-169, 2020.

CÂNDIDO *et al.* O clima atual e o futuro da Floresta Amazônica nos cenários do IPCC: a questão da Savanização. **Mudanças Climáticas**, 2007.

CARAM, R. O. **Mudança no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. Tese. Universidade de São Paulo. Doutorado em Ciências. Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem. Universidade de São Paulo, 2010.

CASAGRANDE *et al.* Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. **Ecological Indicators**, 2020.  
CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill Book Company, 1998. 571 p.

COLLISCHONN, W. 2001. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese (Doutorado em Engenharia)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 194.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 336 p. ISBN 9788588686342.

COPERTINO, M.; PIEDADE, M. T. F.; VIEIRA, I. C. G.; BUSAMANTE, M. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Floresta Amazônica. **Tendências**, 2019.

CPRM. **Bacia do rio Xingu – Características**. Disponível em: <[https://www.cprm.gov.br/sace/xingu\\_caracteristicas.php](https://www.cprm.gov.br/sace/xingu_caracteristicas.php)> Acesso em: março, 2020.

CRISTINA, L.; DIAS, P.; MACEDO, M.N.; HEIL, M.; COE, M.T.; NEILL, C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p.108–122, 2015.

CRUZ, D. C.; BENAYAS, J. M. R.; FERREIRA, G. C.; SANTOS, S. R.; SCHWARTZ, G. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. **New Forests**, 2020.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v, 7, n, 2, p, 205-230, 1969.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; RITSEMA, C. J. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. **Hydrological Processes**, v. 10, p. 1107-1 117, 1996.

DEMATTE, J. L. I.; DEMATTE, J. A. M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da Floresta Amazônica e do Cerrado do Brasil Central. **Sci. Agric.**, v. 50, p. 272-286, 1993.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

DIAS *et al.* Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 108-122, 2015.

DIAS, L. C. P. **Efeito da mudança na cobertura vegetal na evapotranspiração e vazão de microbacias na região do Alto Xingu**. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa). 2013. 103f, Dissertação (Mestrado em Ciência) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2013.

DJEBOU, D. C. S. Streamflow Drought Interpreted Using SWAT Model Simulations of Past and Future Hydrologic Scenarios: Application to Neches and Trinity River Basins, Texas. **J. Hydrol. Eng.**, v. 24, n. 7, 2019.

DOMINGUES, M. S. BERMANN, C.; MANFREDINI, S. A produção de soja no Brasil e sua relação com o desmatamento na Floresta Amazônica. **RPGeo**, n. 1, 2014.

DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: current developments and applications. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 5, 2010.

DU *et al.* Hydrological Simulation by SWAT Model with Fixed and Varied Parameterization Approaches Under Land Use Change. **Water Resources Management**, v. 27, p. 2823–2838, 2013.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. DOI: 10.1029/91WR02985.

ECKHARDT, K.; ARNOLD, J. G. Automatic calibration of a distributed catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 103-109, 2001. Doi: 10.1016/S0022-1694(01)00429-2.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**, 2014.

FAGUNDES, J. L. *et al.* Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2006.

FAGUNDES, J. L. *et al.* Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2006.

FARINOSI *et al.* Future Climate and Land Use Change Impacts on River Flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, 7, p. 993-1017, 2019.

FRANCO *et al.* Climatologia e previsão hidrológica de cheia sazonal do rio Xingu, Altamira-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

FREEPIK. **Water cycle diagram Free Vector**. Disponível em: <[https://www.freepik.com/free-vector/water-cycle-diagram\\_838306.htm#page=1&query=water%20cycle&position=10](https://www.freepik.com/free-vector/water-cycle-diagram_838306.htm#page=1&query=water%20cycle&position=10)>. Acesso em: janeiro de 2021.

GARCIA-PRATS, A., DEL CAMPO, A.D., PULIDO-VELAZQUEZ, M. A hydroeconomic modeling framework for optimal integrated management of forest and water. **Water Resour. Res.**, v. 52, p. 8277–8294, 2016.

GASSMANN, P. W.; SADEGHI, ALI. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. **Journal of Environmental Quality**, v. 43, p. 1 – 8, 2014.

GIANDOTTI, M. Previsione empirica delle piene in base alle precipitazioni meteoriche dei bacini. **Comission de Potamologie**, 1940.

GOMES, E. P.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Identification of homogeneous precipitation regions via Fuzzy c-means in the hydrographic region of Tocantins–Araguaia of Brazilian Amazonia. **Applied Water Science**, v. 9, 2019.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 137-153, 2004.

GUERRERO, J. V. R.; SILVA, E. V. E.; CHAVES, E. D.; MATAVELI, G. A. V.; BOURSCHEIDT, V.; OLIVEIRA, G.; PICOLI, M. C. A.; SHIMABUKURO, Y.; MOSCHINI, L. E. Assessing Land Use and Land Cover Changes in the Direct Influence Zone of the Braço Norte Hydropower Complex, Brazilian Amazonia; **Forests**, v. 11, 2020.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação dos métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidrelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

GUIMBERTEAU *et al.* Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover changes scenarios. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 21, p. 1455–1475, 2017.

GUPTA, H.V.S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of**

**Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135).

IBGE. **Mapa de Solos da Floresta Amazônica Legal 1:250.000 - 2012**. Disponível em: < [https://dados.gov.br/dataset/cren\\_pedologiaamazonialegal\\_250](https://dados.gov.br/dataset/cren_pedologiaamazonialegal_250) >

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **DETER**. Disponível em: < <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter>>. Acesso em: setembro de 2020.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 4,96x**, Utrech: Utrecht University, 2018, 255p.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4th ed. London: Charles Griffin, 1975.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, v.13, n.5, p.3915-3925, 2014.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, p. 13-24, 1986.

KLEMESŠ, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986. DOI: 0.1080/02626668609491024.

KLEMESŠ, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986.

KOOL, D.; AGAM, N.; LAZAROVITCH, N.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; BEN-GAL, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 56– 70, 2014.

LAMPARTER *et al.* Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. **Reg Environ Change**, v. 18, 2018.

LEE, T. Mann-Kendall with Missing Values and Same Values (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70408-mann-kendall-with-missing-values-and-same-values>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 5, 2019.

LEIVAS *et al.* Variação diária do albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS-RS. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Aracajú, 2007.

LIESENFELD, M. V. A.; MIRANDA, I. P. A. Ecologia do fogo e o impacto na vegetação da Floresta Amazônica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2016.

LIGHTHILL, M. J; WHITHAM, G. B. On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 229, n. 1178, p. 281-316, 1955a. DOI: 10.1098/rspa.1955.0088.

LIGHTHILL, M. J; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 229, n. 1178, p. 317-345, 1955b. DOI: 10.1098/rspa.1955.0089.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do Cerrado. **Cerrado**, 2011.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Applied Hydrology**. New York: **Tata McGraw-Hill**, 1975. 689 p.

LOUZADA, V. M.; RIBEIRO, C. B. M. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. **Ambiente & Água**, 2019.

LOVEJOY, T.E., NOBRE, C. Amazon tipping point. **Sci. Adv.**, v. 4, 2018.

MANFRON, P. A. B. O. O. S. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, v.13, n. 3, p. 245-259, 1945.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, p. 245-259, 1945.

MAPBIOMAS, **Relatório Anual do Desmatamento do Brasil – 2019**. Disponível em: < <http://alerta.mapbiomas.org/relatorios> > Acesso em: março de 2020.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org>> Acesso em: julho de 2019.

MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; COSTA, H. C. Sazonalidade e Distribuição Espaço-Temporal das Chuvas no Bioma do Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 1, 2012.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARQUES FILHO, A. O.; DALLAROSA, R. G.; PACHÊCO, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta – Reserva Biológica do Cuieiras – ZF2, Manaus. **ACTA Amazônica**, 2005.

MATLAB – MATrix LABoratory. The Mathworks, 2019. Disponível em: <https://www.mathworks.com>

MCCULLOCH, J.S.G. E ROBINSON, M. “History of forest hydrology.” **Journal of Hydrology**, 150, 189-216, 1993.

MELLO, C. R. *et al.* Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. *Catena*, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008. DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.002.

MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 1, 2016.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. **Hidrologia de Superfície: princípios e aplicações**. 2ª Edição. 531p. Editora UFLA, 2020.

MIRANDA, A. C. *et al.* **Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in central Brazil**. In: GASH, J. H. C., et al. Amazonian deforestation and climate. New York: Wiley, 1996. p. 353-364.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. D. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.  
MISHRA, S. K. *et al.* A modified SCA-CN method: Characterization and testing. **Water Resources Management**, v. 17, n. 1, p. 37-68, 2003.  
DOI:10.1023/A:1023099005944.

MORELLO *et al.* Queimadas e incêndios florestais na Floresta Amazônica brasileira: porque as políticas públicas têm efeito limitado? **Ambiente e Sociedade**, p. 19-38, 2017.

MORIASI, D. N *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.  
DOI: 10.13031/2013.23153.

MUHAMMAD *et al.* Impact of model structure on the accuracy of hydrological modeling of a Canadian Prairie watershed. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 21, p. 40-56, 2019.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NORTE ENERGIA S. A. **UHE Belo Monte, a maior usina hidrelétrica 100% brasileira**. Disponível em: < <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/norte-energia>>. Acesso em: setembro de 2020.

O'COFFEE. **Mapeamento de solos e interpretações para o manejo nas áreas da O'coffee**. 2019.

OLIVEIRA *et al.* Hydrological calibration and validation of the MGB-IPH model for water resource management in the upper Teles Pires River basin in the Amazon-Cerrado ecotone in Brazil. **Acta Amazonica**, v. 49, n. 1, 2019b.

OLIVEIRA *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, 2019a.

OLIVEIRA, F. A. **Impacto do pastejo na condutividade hidráulica de latossolo sob pastagens e cerrado nativo**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Brasília. Graduação em agronomia. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, 2005.

~~OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. S. Land-use change impacts on the hydrology of the upper grande river basin, Brazil. **CERNE**. v. 24, n. 4, p. 334-343, 2018.~~

OTTONI, M. V. *et al.* Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, v.17, n.1, 170095, 2018. DOI: 10.2136/vzj2017.05.0095.

OZDEMIR, H.; BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental Geology**, v. 56, p. 1405–1415, 2009.

PAIVA *et al.* Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, p. 1226-1243, 2013.

PANDAY, P. K.; MACEDO, M. N. LEFEBVRE, P. CASTANHO, A. D. A. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 822 – 829, 2015.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do ribeirão Concórdia – SC. **Revista Árvore**. v. 37, n. 5, p. 859-869, 2013.

PEREIRA *et al.* Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14-37, 2016.

PEREIRA, D.R. *et al.* Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14-37, 2016. DOI: 10.1016/j.ejrh.2016.05.002.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Edição. Universidade Estadual de Goiás. 540p. 2006.

PRUSKI, F. F. *et al.* A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8-12, 1997. ISSN 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(8).

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology**: Principles, Analyses and Design. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p.

RAWLS, W. J *et al.* Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. Cap. 50-07-039732-5, p. 1-51.

ROCHA *et al.* Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, V. 114, 2009.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; GOMES, W. B. Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima na Precipitação da Floresta Amazônica Utilizando o Modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2051-2065, 2019.

RUHOFF, A. *et al.* Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658-1676, 2013. DOI: 10.1080/02626667.2013.837578.

SALOMÃO *et al.* As florestas de Belo Monte na grande curva do rio Xingu, Floresta Amazônica Oriental. **Ciências Naturais**, v. 2, n. 3, p. 57-153, 2007.

SANCHES, R. A.; VILLAS-BÔAS, A. Planejando a gestão em um cenário socioambiental de mudanças: o caso da bacia do rio Xingu. **RAP Rio de Janeiro**. v. 39, n. 2, p. 365-380, 2005.

SANTOS, C. A. dos; LIMA, A. M. M. de; SERRÃO, E. A. O.; FARIAS, M. H. C. S.; WANZELER, R. T. S.; ARAUJO, I. B. de. Modelo de previsão fluviométrica para o rio Xingu na cidade de Altamira – PA. **Revista Internacional de Ciências**. v. 06, n. 02, p. 230-243, 2016.

SANTOS, V.; LAURENT, F.; ABE, C.; MESSNER, F. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. **Water**, v. 10, 2018.

SCHEFFLER *et al.* Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 144, p. 281-289, 2011.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SHAW, E. M. **Hydrology in Practice**. 3ª. ed. London: Chapman & Hall, 1994. 613 p.

SHI *et al.* Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, p. 1-7, 2009.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1-53.

SILVA, E. M. D. et al. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

SILVA, V. P. R. S.; SILVA, M. T.; SINGH, V. P.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M.; ALMEIDA, R. S. R.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. C. R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**, v. 162, p. 166-176, 2018.

SOUZA, R. C.; RIZZA, N. E.; RANZINI, M.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; SILVA, L. R. Interceptação pluviométrica pelo dossel de floresta ombrófila mista alto-montana no Parque Estadual De Campos Do Jordão, SP, Brasil. **Floresta**, v. 26, n. 2, p. 243-250, 2016.

SOUZA *et al.* Dinâmica do desmatamento na Floresta Amazônica e seus impactos na hidrologia: bacia do Rio Machado – Rondônia / Brasil. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1004-1018, 2019.

STICKLER *et al.* Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 23, 2013.

TEIXEIRA, G. G.; SOARES-FILHO, B. S. Simulação da tendência do desmatamento nas Cabeceiras do Rio Xingu, Mato Grosso – Brasil. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. p. 5483-5490, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 9788570258236.

TY *et al.* Scenario-based Impact Assessment of Land Use/Cover and Climate Changes on Water Resources and Demand: A Case Study in the Srepok River Basin, Vietnam—Cambodia. **Water Resources Management**, v. 26, p. 1387–1407, 2012.

USACE – US Army Corps of Engineers. Hec-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's manual. 2013.

VARGAS, M. M *et al.* SYHDA—System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019b. DOI: 10.1590/2318-0331.241920180152.

VARGAS, Marcelle Martins. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB®**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

VENTURIERI, A.; MONTEIRO, M. de A.; MENEZES, C. R. C. **ZEE: zoneamento ecológico-econômico da zona Oeste do Estado do Pará**. Embrapa Floresta Amazônica Oriental, 2010.

VILLAS-BÔAS, A. (Org). **De olho na bacia do Xingu**. São Paulo: Instituto Socioambiental. 2012. 61 p.

VIOLA *et al.* Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581–590, 2009.

VIOLA, M. R. 2008. **Simulação hidrológica na região do Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 286. 2011.

VIOLA, M.R. *et al.* Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande river basin headwaters, Southeastern, Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, p. 4537–4550, 2014. DOI: 10.1007/s11269-014-0749-1.

WANG-ERLANDSSON, L., VAN DER ENT, R.J., GORDON, L.J., SAVENIJE, H.H.G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. **Earth Syst. Dyn.** V, 5, p. 441–469, 2014.

XINGU+. Sistema de Indicação por Radar de Desmatamento (Sirad). Disponível em: < <https://xingumais.org.br/siradx>>. Acesso em: Julho de 2020.

WWAP - WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (UNITED NATIONS). **Water for People, Water for Life: A Joint Report by the Twenty-three UN Agencies Concerned with Freshwater.** Unesco, 2003.