

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA
NA PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Campina Grande, Abril de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

TESE DE DOUTORADO

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA NA
PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO

Campina Grande-PB
Fevereiro-2022

EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA NA
PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese de Doutorado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Sub-área: Hidrometeorologia (Modelagem Hidrológica)

Orientador: Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa

Campina Grande-PB
Fevereiro-2022

S487i Serrão, Edivaldo Afonso de Oliveira.
Impactos das mudanças climáticas e do uso da terra na produção hidrelétrica na Amazônia Oriental / Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão. – Campina Grande, 2022.
131 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.
"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva; Coorientação: Prof. Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa".

Referências.

1. Meio Ambiente – Impactos Ambientais. 2. Mudanças Climáticas. 4. Mudanças no Uso da Terra. 5. Energia Hidrelétrica. 6. Modelagem Hidrológica. I. Silva, Madson Tavares. II. Sousa, Francisco Assis Salviano de. III. Título.

CDU 502/504(043)

EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA NA
PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

TESE APROVADA EM 21/02/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de
Campina Grande



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de
Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. a. ALINE MARIA MEIGUINS DE LIMA

Instituto de Geociências
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. PAULO RÓGENES MONTEIRO PONTES

Instituto Tecnológico Vale
Desenvolvimento Sustentável

*A minha querida avó,
a maestrina de minha vida.*

Eu dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar saúde e força para alcançar meus objetivos e por me guiar neste caminho que tenho enorme satisfação em seguir.

A minha avó (Francisca Serrão⁺) por me criar, me instruir, me dar amor e carinho e sempre me guiar para os melhores caminhos da vida.

A minha mãe (Edilsa Serrão) por me dar todo apoio do mundo para alcançar meus objetivos, por me orgulhar e fazer de sua vida um lindo exemplo a ser seguido.

Aos meus familiares que apoiaram-me em todos os momentos e se fizeram presentes sempre. Em especial, minhas tias, tios e primos (Elisa Serrão, Edilea Serrão, Elivaldo Serrão, Edinaldo Serrão, Bruno Serrão e Andrey Serrão).

A minha noiva e meu filho (Lorena Ataide e César Serrão) por fazerem da minha vida algo mais que especial, algo que vale a pena lutar e acreditar sempre. Vocês são a razão dos meus esforços e conquistas. O amor de minha vida.

Ao professor Dr. Madson Tavares Silva por me Orientar na Tese e sempre repassar seus conhecimentos na modelagem com SWAT, o que foi de suma importância na realização desse trabalho. Por todos seus ensinamentos acadêmicos e sobre a vida, conselheiro e amigo. Muito obrigado por tudo meu amigo.

Ao professor Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa por ser meu Coorientador no Mestrado e sempre estar à disposição para tudo, seus ensinamentos foram fundamentais, além da amizade.

Ao professor Dr. Paulo Rógenes Monteiro Pontes pela oportunidade concedida no ITV, por seus ensinamentos e paciência frente aos desafios da modelagem, auxílios nos papers e conselhos diversos. E por fazer parte da minha banca de defesa de Doutorado. Muito obrigado pela amizade e cuidado.

A professora Dra. Aline Meiguins da UFPA por sempre está disposta a ajudar, auxiliando em meu crescimento científico e profissional. Minha orientadora, conselheira e amiga. Obrigado por todos os ensinamentos.

Os professores e funcionários em geral do PPGMET-UFPA que de alguma forma me ajudaram a adquirir conhecimento necessário e experiência do Mestrado até esta etapa final do Doutorado em meteorológica, em especial (Prof. Vicente Silva, Prof. Bernardo Barbosa, Prof. Carlos Santos, Prof. Enilson Cavalcanti). Obrigado pela amizade e momentos felizes

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos durante todo o curso.

Aos meus amigos (Thomás Ferreira, Wanderson Costa, Leydson Galvíncio, Eric Baia, Eric Peuriclepes, Eduardo Rodrigues, Thiago Rodrigues, Cleber Assis, Romero Wanzeler e Pamela Ávila). Por me apoiarem, torcerem e acreditarem em mim. Com vocês vivi momentos inesquecíveis. Obrigado pela Amizade.

Aos meus amigos de Campina Grande, Raoni Oliveira, João neto, Joab, Soraya e vários outros que tornaram a vida em CG mais agradável, obrigado pela camaradagem e momentos de descontração.

E a todos que de alguma forma influenciaram para que eu chegasse até aqui. Obrigado!

*“However bad life may seem, there is always
something you can do and succeed.
While there is life, there is hope”.*

Stephen William Hawking.

RESUMO

Em um mundo antropogênico da atualidade a natureza é vista cada vez mais como um recurso, a água e o solo são fortemente utilizados, moldados e rearranjados em benefício do desenvolvimento socioeconômico mundial. Porém, os impactos dessas alterações desenfreadas no meio ambiente podem contradizer seu benefício. Neste estudo o objetivo foi quantificar os impactos da mudança do uso e cobertura da terra (LULCC) e Mudanças Climáticas (MC) em alguns processos hidrológicos: vazão, escoamento superficial e evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia (BHTA). E ainda, investigar esses impactos na produção de energia hidrelétrica a partir da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) na BHTA. Por fim, identificar se haverá implicações dessas mudanças no faturamento hidrelétrico. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), a partir do modelo calibrado e validado para a BHTA, foi construído quatro cenários isolados de LULCC e quatro cenários de mudanças climáticas mais um cenário acoplado de LULCC e MC para avaliar os impactos dessas atividades antrópicas na hidrologia, geração de energia e receitas monetárias. Para esse fim, foi utilizado dois Modelos de Circulação Geral (GCM), HadGEM2-ES e MIROC5 com forçamento radiativo moderado ($+4,5 \text{ W/m}^2$) e severo ($+8,5 \text{ W/m}^2$) a partir de emissões do dióxido de carbono na atmosfera (Representative Concentration Pathways). Para cenários de LULCC substituímos as áreas de florestas por pastagem, depois por agricultura, em seguida por vegetação de reflorestamento e, finalmente retorna a floresta. Os resultados indicaram que haverá um aumento de 36% na vazão da BHTA até a metade do século, em virtude de um aumento de 15% no escoamento superficial e redução de 3.5% na evapotranspiração, de acordo com os cenários isolados de LULCC. Porém o excedente de água não poderá ser convertido em energia pela UHT e haverá uma redução de até 65% na produção anual de energia. Para os cenários de MC e MC+LULCC, é esperado uma diminuição anual de 74% na vazão e sazonal de 98% durante o inverno, em comparação com baseline no cenário mais pessimista, ocasionando um déficit de 135% ao ano na receita da UHT para este cenário. O cenário com menor impacto na receita monetária arrecadaria US \$ 8.4 milhões, enquanto estima-se a receita atual da UHT em US \$ 3.1 bilhões. Por fim, concluímos que a longo prazo a MC podem ter impacto maior que as LULCC regional, sobre a hidrologia e produção de energia na BHTA, em virtude da redução na entrada de água no sistema, ou seja, a precipitação.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças Climáticas; Mudanças no uso da terra; Energia hidrelétrica; Modelagem hidrológica

ABSTRACT

In today's anthropogenic world, nature is increasingly seen as a resource, water and soil are heavily used, shaped, and rearranged for the benefit of global socioeconomic development. However, the impacts of these unbridled changes on the environment may contradict their benefit. In this study our objective was to quantify the impacts of land use and land cover change (LULCC) and Climate Change (CC) on some hydrological processes: streamflow, runoff and evapotranspiration in the Tocantins-Araguaia Watershed (TAW). And further, to investigate these impacts on the production of hydropower from the Tucuruí Hydropower Plant (THP) in the TAW. Finally, to identify whether there will be implications of these changes on hydropower revenues. To this end, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model was used, from the model calibrated and validated for the TAW, four isolated LULCC and four climate change scenarios plus a coupled LULCC and CC scenario were constructed to assess the impacts of these anthropic activities on hydrology, power generation and monetary revenues. For this purpose, we used two General Circulation Models (GCM), HadGEM2-ES and MIROC5 with moderate (+4.5 W/m²) and severe (+8.5 W/m²) radiative forcing from carbon dioxide emissions in the atmosphere (Representative Concentration Pathways). For LULCC scenarios we replaced forest areas with grassland, then agriculture, then reforestation vegetation, and finally returns to forest. The results indicated that there will be a 36% increase in the flow of the TAW by mid-century, due to a 15% increase in runoff and a 3.5% reduction in evapotranspiration, according to the isolated LULCC scenarios. However, the surplus water cannot be converted into energy by the THP and there will be a reduction of up to 65% in annual energy production. For the CC and CC+LUCC scenarios, a 74% annual decrease in flow is expected and a 98% seasonal decrease during winter compared to baseline in the most pessimistic scenario, causing a 135% annual deficit in revenue for the THP for this scenario. The scenario with the smallest impact on monetary revenue would raise \$8.4 million, while current THP revenue is estimated at \$3.1 billion. Finally, we conclude that in the long-term CC can have a greater impact than regional LULCC, on hydrology and energy production in the TAW, because of the reduction in water input to the system, i.e., rainfall.

KEYWORDS: Climate Change; Land Use Change; Hydropower; Hydrological Modeling

SUMÁRIO

CAPÍTULO 0 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Problemática	3
1.2. Hipótese	4
1.3. Objetivo geral	4
1.4. Objetivos específicos	4
1.5. Estrutura da Tese	5
1.6. Referências	6
CAPÍTULO 2 (Artigo 1) - Modelagem hidrológica em larga escala de vazão e produção hidrelétrica, em uma bacia hidrográfica brasileira	8
2.1. Introdução	8
2.2. Material e Métodos	10
2.3. Resultados e Discussão	19
2.4. Conclusões	26
2.5. Referências	27
CAPÍTULO 3 (Artigo 2) – Cenários de mudanças no uso da terra e seus efeitos na energia hidrelétrica na Amazônia	32
3.1. Introdução	32
3.2. Material e Métodos	34
3.3. Resultados	46
3.4. Discussão	54
3.5. Observações, sugestões e pesquisas futuras	59
3.6. Conclusões	61
3.7. Referencias	62
CAPÍTULO 4 (Artigo 3) – Impactos futuros da mudança climática e do uso da terra na energia hidrelétrica e na receita para a Amazônia	79
4.1. Introdução	79
4.2. Material e Métodos	81
4.3. Resultados e Discussão	87
4.4. Conclusões	100
4.5. Referências	102
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS	114
5.1. Limitações do SWAT	116
ANEXO A (Artigos publicados e Artigo extra)	111
ANEXO B – Documentação complementar do SWAT para BHTA	117

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Espera-se que a conversão da terra e as mudanças climáticas alterem significativamente os processos hidrológicos das florestas tropicais. Onde o desenvolvimento econômico está aumentando a demanda pela exploração dos recursos naturais é maior. Conseqüentemente, muitas bacias hidrográficas tropicais foram fortemente antropizadas, com a floresta primária sendo substituída por usos agropecuários (Lewis et al., 2015). Desta maneira, o acoplamento dos impactos antropogênicos diretos, e as mudanças climáticas, afetam o ciclo hidrológico e assim, alterem as características hídricas naturais em bacias tropicais. Impactando os usos múltiplos de água destas bacias, como a exploração energética, por exemplo. Desencadeando outro grande problema, uma vez que o aumento de fontes renováveis é uma tendência mundial, e se dará com a exploração dos recursos naturais nas regiões mais abundantes em água, vento e radiação solar, sendo estas as regiões tropicais e subtropicais.

No Brasil, há um crescente aumento no uso de energia eólica e solar, porém a maior matriz elétrica brasileira são as hidrelétricas e a área de maior exploração será a Amazônia e o Cerrado (EPE, 2018). A viabilidade das hidrelétricas como fontes confiáveis de eletricidade tem sido um foco de debate, especialmente em áreas onde a precipitação e a vazão são altamente sazonais (Chou et al., 2012). A este respeito, um aspecto importante para a viabilidade e manutenção de uma hidrelétrica que recebeu relativamente pouca atenção, é a dependência do regime hidrológico em função das florestas nas quais os complexos de barragens estão embutidos. Até que ponto a produção de energia hidrelétrica será afetado à medida que as florestas sejam limpas?

As mudanças no balanço de água e energia funcionam em uma variedade de escalas de tempo e espaço e as influências combinadas na descarga do rio são complexas, por dependerem de diversos fatores. As observações nas escalas espaciais micro ($<1 \text{ km}^2$) ou meso (100 km^2) nos trópicos globais e extra trópicos indicam que o desmatamento reduz a evapotranspiração e aumenta o escoamento superficial devido ao menor índice de área foliar, à diminuição da densidade e profundidade da raiz, e aumento da compactação do solo (Sahin e Hall, 1996, Costa, 2005, Scanlon et al., 2007, Stickler et al., 2013).

Nesse sentido, o monitoramento hidrológico deveria ser uma forma de antecipar tais eventos, porém dada as dimensões das bacias brasileiras e os custos de logística para a manutenção continuada das estações, a atual rede não consegue atender e aferir de forma homogênea espacialmente as demandas das bacias. A consequência direta está na dificuldade de gerar alertas

preventivos para as comunidades e cidades que possam ser afetadas tanto pelos eventos mais chuvosos quanto pelos de escassez hídrica (Seyler et al., 2009).

Visto isso, entender os processos envolvidos no ciclo hidrológico na Amazônia e no Cerrado tem grande relevância. Neste quesito entende-se a dificuldade em mensurar e avaliar cada processo do ciclo hidrológico, uma vez que cada parte do ciclo tem suas peculiaridades. Assim os modelos hidrológicos vêm para suprir e auxiliar na avaliação dos processos físicos envolvidos no ciclo hidrológico, sendo uma ferramenta de grande suporte nas pesquisas hídricas no mundo.

Dentre os vários modelos hidrológicos existentes, o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) vem se destacando na literatura mundial (Arnold et al., 1998, Abbaspour et al., 2004, Balkhair e Rahman, 2017, Abera et al., 2018, Silva et al., 2018, Silva et al., 2018, Serrão et al., 2019). Este modelo foi desenvolvido em 1996, nos USA, pelo Agricultural Research Service no Texas A&M University. É um modelo contínuo, semi-distribuído, projetado para incorporar dados de entrada de origem numérica e vetorial (Arnold et al., 1998, Gassman et al., 2014) e objetiva prever os aspectos quantitativos e qualitativos de impactos do uso e cobertura da terra sobre o ciclo hidrológico, transporte de sedimentos, qualidade da água em bacias hidrográficas.

Com a aplicação de modelos hidrológicos, é possível estimar cenários futuros de uso e cobertura da terra ou mudanças climáticas e analisar a demanda de recursos hídricos da bacia em estudo (Pagliero 2014). Sobre isso, o modelo SWAT é amplamente utilizado no mundo na aplicação de cenários futuros de uso e cobertura da terra e seus impactos no ciclo hidrológico (Abbaspour et al., 2015, Pereira et al., 2016, Serrão et al., 2019), aporte de sedimentos (Silva et al., 2018, Silva et al., 2018), transporte de pesticidas (Wang et al., 2019) e disponibilidade de água doce (Schuol et al., 2008), com tudo, em relação a cenários de uso e cobertura da terra ou de mudanças climáticas na produção energética de uma bacia hidrográfica isso pouco se aplica. Estudos referente a produção de energia elétrica em uma bacia com o modelo SWAT são descritos por Kusre et al., 2010, Pandey et al., 2015, Kumar e Sharma, 2016, Balkhair e Rahman, 2017 e Abera et al., 2018.

A bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia (BHTA) é uma bacia tropical de larga-escala e se encontra na transição entre dois biomas brasileiros, a Amazônia e o Cerrado e têm todo seu território dentro o Brasil, abrangendo parte das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do país, ocupando 11% do território do nacional. As altas taxas de precipitação na Amazônia e os grandes volumes de fluxo de água no rio fazem partes do grande ciclo hidrológico da região que auxilia outros ecossistemas do Brasil, como o Cerrado (Malhi et al., 2008). Para Demarty e Bastien (2011) esses fluxos são essenciais para um alto produção na geração de eletricidade através de hidrelétricas.

1.1. Problemática

A energia é um fator preponderante no desenvolvimento dos povos, e sua obtenção ao longo da história, sempre representou um aumento na utilização de recursos naturais, como, lenha, petróleo, carvão, quedas d'água, e outros, acarretando em alterações no meio ambiente, sendo estas, muitas vezes, negativas (Stickler et al., 2013). Dentre muitas opções para a geração de energia, a hidráulica se firmou no Brasil, sendo responsável por 71% da matriz energética (energia elétrica) nacional (EPE, 2018). De maneira geral, os reservatórios são construídos pelo barramento artificial de um vale natural ou pela formação artificial de lagos, não associados a uma bacia de drenagem natural e com vazões sujeitas a controle, no caso das barragens artificiais (Tucci, 2009).

A superfície terrestre da Amazônia e Cerrado são acopladas a seus rios, córregos e a atmosfera úmida, através de processos hidrológicos. A cobertura terrestre antropizada e as mudanças no uso da terra influenciam a quantidade de recursos hídricos superficiais, mudando a forma como a precipitação e a radiação são divididas entre fluxos de calor sensíveis e latentes, escoamento e descarga do rio (Li et al., 2007) e alterando os padrões de precipitação em escala regional e continental (Dickinson e Sellers, 1988; Malhi et al., 2008; Nobre et al., 1991).

A descarga de um rio é basicamente a diferença entre a entrada de água na bacia hidrográfica (precipitação) e a exportação de água através da evapotranspiração (ET). A produção hidrelétrica está diretamente associada à descarga e, portanto, geralmente aumenta quando as florestas são substituídas por culturas e pastagens porque as florestas tendem a liberar mais vapor para a atmosfera através de ET, deixando menos água para descarga (Spracklen et al., 2012). Com tudo, Stickler et al., 2013, avaliou os impactos de alterações no uso e cobertura do solo na produção energética da bacia hidrográfica do rio Xingu e observou existe uma dependência da eficiência do sistema em gerar energia, ou seja, apesar do escoamento superficial aumentar e com isto a vazão, não necessariamente a produção de energia hidrelétrica irá seguir esse padrão. Diante desse pressuposto, este trabalho visa analisar se existe impactos negativos ou positivos na produção energética da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) na BHTA.

1.2. Hipótese

Testando a hipótese que as ações antrópicas no uso e cobertura da terra e conseqüentemente no clima, irão impactar no balanço hídrico e por sua vez alterar a vazão para a bacia do Tocantins-Araguaia e assim influenciar na produção energética da UHT, tem-se os objetivos descritos a seguir.

1.3. Objetivos Gerais

Esse estudo tem como ênfase a análise da vazão na bacia hidrográfica dos rios Tocantins-Araguaia (BHTA), para a estimativa da produção de energia na usina hidrelétrica de Tucuruí (UHT), e sua possível alteração associada a cenários de mudanças de uso e cobertura da terra e mudanças climáticas na região, utilizando o modelo SWAT como suporte.

1.4. Objetivos Específicos

- 1) Analisar a série histórica de vazão entregue a UHT e analisar a atual produção de energia elétrica na UHT;
- 2) Utilizar o modelo SWAT para simular a vazão da BHTA entregue a UHT; fazer a análise de sensibilidade, calibrar e validar o modelo; utilizar a vazão simulada para gerar a produção energético da UHT;
- 3) Construir cenários de uso e cobertura da terra a partir do modelo SWAT e analisar seus impactos em alguns processos hidrológicos e na produção de energia na UHT;
- 4) Investigar se existe limitações estruturais na UHT para a produção de energia excessiva;
- 5) Aferir os impactos isolados das mudanças climáticas na produção energética da UHT, segundo os cenários do IPCC;
- 6) Construir um cenário acoplado de uso e cobertura da terra a um cenário de mudanças climáticas a partir do modelo SWAT e analisar as alterações na vazão, produção energética e no faturamento de energia na BHTA.

1.5. Estrutura da Tese

Este estudo está estruturado nos seguintes aspectos: **Capítulo 1**, em que é apresentada a introdução geral do trabalho, justificativa e hipótese. No **Capítulo 2** é apresentada a simulação da vazão com o modelo SWAT para a BHTA, a análise de sensibilidade e calibração do modelo a partir do SWAT-CUP, a validação do modelo de acordo com indicadores estatísticos, bem como a produção hidrelétrica para a UHT. Para o **Capítulo 3**, apresentaremos uma modelagem dinâmica de quatro cenários de uso e cobertura da terra através do SWAT e analisaremos através de teste estatísticos não paramétricos como essas mudanças impactarão nas variáveis hidrológicas da BHTA e como cada cenário influencia na produção energética de UHT. O **Capítulo 4** será apresentado quatro cenários de mudanças climáticas segundo as projeções do IPCC e um cenário acoplado de mudanças climáticas (IPCC) e de uso e cobertura da terra (SWAT) para a BHTA e analisaremos as mudanças na produção energética da UHT e uma perspectiva econômica do faturamento energético arrecadado com a venda de energia na UHT. Por fim, no **Capítulo 5** apresentaremos as conclusões gerais da Tese e sugestões para trabalhos futuros, A seguir temos o fluxograma da estrutura da Tese.

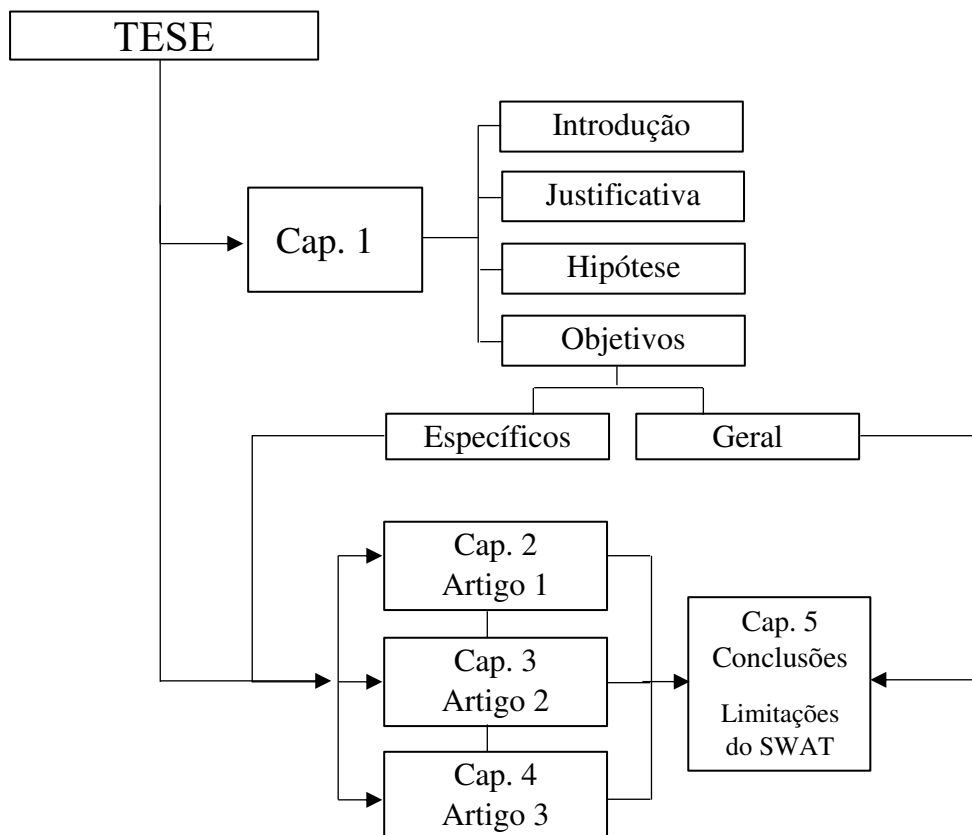


Figura 1. Diagrama de fluxo da estrutura da Tese.

1.6. REFERÊNCIAS

- Abbaspour, K.C, Rouholahnejad. E, Vaghefi. S, Srinivasan. R, Yang. H, Klove. B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.*, 524 (2015), pp. 733–752, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Coe. M. T, Costa. M. H, Soares Filho. B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369 (2009), pp. 165–174, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Cohen. J.C, Beltrão. J.C, Gandu. A.W, Silva. R.R. Influência do Desmatamento Sobre o Ciclo Hidrológico na Amazônia. *Ciência e Cultura.*, 59 (2007), pp. 36-39.
- Costa, M.H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: Bonell. M., Bruijnzeel, L.A. (Eds.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press, New York, (2005), p. 590–597.
- Chou. C, Chen. C.A, Tan. P.H, Chen. K.T. Mechanisms for global warming impacts on precipitation frequency and intensity. *Journal of Climate.*, 25 (2012), pp. 3291-3306, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00239.1>
- Demarty. M, Bastien. J. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy.* 39 (2011), pp. 4197-4206, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.033>
- Dickinson. R.E, Sellers. A.H. Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.*, 114 (1988), pp. 439-462, <https://doi.org/10.1002/qj.49711448009>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. DF, Brasil, 345p (em Português)
- Fearnside. P.M, Graça. P.M.L.A. BR-319: Brazil's Manaus-Porto velho highway and the potential impact of linking the arc of deforestation to central Amazonia. *Environmental Management.*, 38 (2006), pp. 705-716, <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0295-y>
- Lewis, S. L., Edwards, D. P., & Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests., *Science*, 349(6250), 827–832. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
- Li. K.Y, Coe. M.T, Ramankutty. N, DE Jong. R. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology.*, 337 (2007), pp. 258–268, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.038>
- Malhi. Y.J, Roberts. T, Betts. R.A, Killeen. T.J, Li. W, Nobre. C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science.*, 319 (2008), pp. 169-172, [10.1126/science.1146961](https://doi.org/10.1126/science.1146961)
- Marcon. I. R. Modelagem e cenários hidrológicos em bacia representativa da mata atlântica no sul do Brasil. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

- Nepstad, D.C, Stickler, C.M, Almeida, O.T. Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation. *Conservation Biology*., 20 (2006), pp. 1595-1603, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00510.x>
- Nobre, C.A, Sellers, P.J, Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*., 4 (1991), pp. 957–988, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
- Oliveira, M. Q. C. Impacto de Mudanças no Uso do Solo nas Características Hidrossedimentológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Joanes e Sua Repercussão na Zona COSTEIRA. 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.
- PRODES. Taxas anuais de desmatamento. Estatística. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/increments, Acesso em 26.07.2019.
- Pagliero, L, Bouraoui, F, Willems, P, Diels, J. Large-scale hydrological simulations using the soil water assessment tool, protocol development and application in the Danube Basin. *Journal of Environmental Quality*., 43 (2014), pp. 145-154, [doi:10.2134/jeq2011.0359](https://doi.org/10.2134/jeq2011.0359)
- Pereira, D.R, Martinez, M.A, Pruski, F.F, Silva, D.D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *J. Hydrol. Regi. Stud.* 7 (2016), pp. 14–37, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Sahin, V, Hall, M.J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*., 178 (1996), pp. 293–309, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02825-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02825-0)
- Schuol, J, Abbaspour, K.C, Srinivasan, R, Yang, H. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J. Hydrol.* 352 (2008), pp. 30-49, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>
- Scanlon, B.R, Jolly, I, Sophocleous, M, Zhang, L. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water resources research*., 43 (2007), pp. 1-18, [10.1029/2006WR005486](https://doi.org/10.1029/2006WR005486)
- Serrão, E.A.O, Silva, M.T, Sousa, F.A.S, Lima, A.M.M, Santos, C.A, Ataíde, L.C.P. Four decades of hydrological processes simulation in the watershed of the Itacaiúnas river, Southeast of the Amazon. *Bull. Geodetic. Scien.* 25 (2019), no prelo
- Silva, V.P.R, Silva, M.T, Braga, C.C, Singh, V. P, Souza, E.P, Sousa, F.A.S, Holanda, R.M, Almeida, R.S.R, Braga, A.C.R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*. 162 (2018), pp. 166-176, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>
- Silva, A.K.L, Sousa, A.M.L, Santos, J.T.S, Villela, J.M, Martorano, L.G, Crestana, S. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 22 (2018), pp. 344-348, <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>

- Spracklen. D.V, Arnold. S.R, Taylor. C.M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature.*, 489 (2012), pp. 282–285, <https://doi.org/10.1038/nature11390>
- Stickler. C.M, Coe. M.T, Costa. M.H, Nepstad. D.C, McGrath. D.G, Dias. L.C.P, Rodrigues. H.O, Soares-Filho. B.S. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110 (2013), pp. 9601–9606, <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Seyler. F, Muller. F, Cochonneau. G, Guimarães. L, Guyot. J.L. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. *Hydrological Processes.*, 23 (2009), pp. 3173-3185, <https://doi.org/10.1002/hyp.7397>
- Tucci. C.E.M. *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. Porto Alegre, RS. 4 ed. (2009). 943p.
- Wang. R, Yongping. Y, Yen. H, Grieneisen. M, Arnold. J, Wang. D, Wang. C, Zhang. M. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns. *Science of the Total Environment.*, 669 (2019), pp. 512–526, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.141>

*CAPÍTULO 2 – ARTIGO – 1***MODELAGEM HIDROLÓGICA EM LARGA ESCALA DE VAZÃO E PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA, EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA BRASILEIRA**

(Artigo no formato da revista: Ecohydrology & Hydrobiology – ISSN: 1642-3593)

<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.09.002>

RESUMO

Área de estudo: Bacia hidrográfica dos rios Tocantins-Araguaia.

Foco do estudo: Em função do grande fluxo de descarga dos rios da Bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) e com isso, um grande potencial para a geração de energia hidrelétrica, utilizamos o modelo SWAT para simular a vazão da BHTA e investigamos sua produção energética.

Novas abordagens para a hidrologia local: O objetivo é usar a vazão estimada pelo SWAT para simular o potencial energético da usina hidrelétrica de Tucuruí no rio Tocantins-Araguaia, Pará, Brasil. Identificamos que na calibração do SWAT alguns parâmetros são mais sensíveis aos processos hídricos do que outros, permitindo assim o aprimoramento da simulação no BHTA. A validação do modelo mostrou que os resultados simulados foram consistentes com os dados observados na reprodução dinâmica da sazonalidade das vazões. Foi possível gerar potencial hidrelétrico no BHTA e avaliar seu potencial quando a vazão SWAT foi calibrada e validada. Este estudo pode ser útil para o planejamento de gestão sustentável e tomada de decisão para a criação de políticas públicas de bacias hidrográficas localizadas em regiões tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia Tropical, Vazão simulada, Hidrelétrica, Potencial de Energia.

2.1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos, de acordo com a disponibilidade de água e a produção de energia elétrica, é a principal preocupação para o futuro de países extremamente dependentes da energia hidrelétrica, como o Brasil. Portanto, mudanças no regime hidrológico, devido à variabilidade climática e à dinâmica de uso e cobertura da terra, tornam esses países altamente vulneráveis. O Brasil depende de seus recursos hídricos para gerar energia elétrica, pois quase 71% de toda a energia elétrica é produzida por usinas hidrelétricas (EPE, 2018; Oliveira et al., 2017).

A produção de energia elétrica a partir de recursos renováveis é uma tendência mundial. Portanto, a matriz energética renovável mundial está aumentando, assim como a dependência da geração de energia das variáveis climáticas (Queiroz et al., 2019). Isso compromete futuros processos operacionais e de planejamento nos sistemas de energia e aumenta a necessidade do monitoramento hidroclimático das bacias que mantêm as usinas hidrelétricas. As usinas hidrelétricas são as fontes de energia renovável mais utilizadas no mundo e representam cerca de 16% da matriz energética mundial e mais de 65% da atual capacidade global de produção de energia (Balkhair e Rahman, 2017; IEA, 2019).

Comparada a outras fontes de energia renovável, a energia hidrelétrica é confiável, econômica, altamente eficiente, com baixo custo de manutenção e grande capacidade de armazenamento (Yuksel et al., 2010). Além disso, pode fornecer energia em grande escala com mais facilidade e com menos interrupções do que a energia eólica e solar (Delucchi e Jacobson, 2011), e fornece energia elétrica com níveis mais baixos de emissões de gases de efeito estufa, em comparação a energia termoelétrica (Demarty; Bastien, 2011).

Em contra partida, impactos sobre a população ribeirinha, migração e piracema de peixes e a produção de metano a partir da decomposição de matéria orgânica na área represada, possa contrariar o benefício das hidrelétricas (Fearnside; Pueyo, 2012; Santos et al., 2020). Nesse contexto, as perspectivas de novas hidrelétricas no Brasil para os próximos 20 a 30 anos serão de aproveitamento do potencial hidrológico da Amazônia e do Cerrado (EPE, 2018).

Nesta conjuntura atual, modelos hidrológicos calibrados e validados são uma importante ferramenta que pode ajudar a estabelecer uma rede de monitoramento, incluindo o potencial energético de uma bacia. O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) tem sido usada globalmente (Arnold et al., 1998; Abbaspour et al., 2004; Schuol et al., 2008; Arnold et al., 2012; Gassman et al., 2014; Abbaspour et al., 2015; Pereira et al., 2016; Silva et al., 2018; Silva et al., 2018; Serrão et al., 2019; de Oliveira Serrão et al., 2020). O SWAT é um modelo contínuo, semi-distribuído,

projetado para incorporar dados de entrada de origem numérica e vetorial (Arnold et al. 1998, Gassman et al. 2014). Que visa prever os aspectos quantitativos e qualitativos dos impactos do uso e cobertura da terra sobre o ciclo hidrológico, transporte de sedimentos, crescimento vegetal e qualidade da água em bacias hidrográficas.

Nesse contexto, a pesquisa sobre o potencial energético de hidrelétricas no Brasil começou a ganhar destaque nos últimos anos com Sticler et al., (2013), utilizando o modelo IBIS; Mendes et al., (2017), utilizando modelagem estocástica auto-regressiva, e Queiroz et al., (2019), usando o MGB. No mundo, muito já foi feito utilizando o SWAT para este fim, com Kusre et al., (2010); Pandey et al., (2015); Kumar e Sharma (2016); Balkhair e Rahman (2017); Oliveira et al., (2017); Aber et al., (2018) e de Oliveira Serrão et al., (2020). No entanto, no Brasil apenas estudos conduzidos por Oliveira et al., (2017) e de Oliveira Serrão et al., (2020) utiliza o modelo SWAT para investigar o potencial hidrelétrico em uma bacia no Cerrado e na Amazônia. Portanto, esta pesquisa vem apoiar esse tema tão importante, que é o monitoramento dos recursos hídricos e do potencial e produção energética de barragens.

A bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) é uma bacia tropical de grande escala no Brasil localizada na transição entre dois biomas, Amazônia e Cerrado. As regiões de floresta tropical têm potencial para geração de energia hidrelétrica e se destacam nas estratégias de crescimento energético de muitas nações (Stickler et al., 2013). As altas taxas de precipitação na Amazônia e os grandes volumes de fluxo de água no rio fazem partes do grande ciclo hidrológico da região que auxilia outros ecossistemas do Brasil, como o Cerrado (Malhi et al., 2008). Para Demarty e Bastien (2011), esses fluxos são essenciais para um alto potencial de geração de eletricidade por meio de usinas hidrelétricas. Para tanto, focamos em duas linhas de pesquisa: (I) entender a dinâmica da vazão da BHTA através da modelagem, calibrar e validar o SWAT e (II) avaliar a produção da usina hidrelétrica de Tucuruí (jusante da BHTA) usando a vazão simulada.

Tais etapas são necessárias para determinar a eficiência do modelo SWAT na simulação de vazão em grandes bacias tropicais e se esta vazão é eficaz na simulação da produção energética de uma usina hidrelétrica. Isso apoiará futuros trabalhos sobre esse tema e ajudará futuras usinas hidrelétricas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo

A bacia do Tocantins-Araguaia (BHTA) drena cerca de 918,822 km², abrangendo parte das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do país, ocupando 11% do território do brasileiro (Fig. 1). O rio Tocantins, formado pelos rios Maranhão e das Almas, nasce no estado de Goiás, próximo a Capital Federal do Brasil, a cerca de 1000m de altitude, e flui para o norte por cerca de 2,640 km. Seu principal afluente, o rio Araguaia, flui 1,670 km antes de sua confluência com o Tocantins (MMA, 2005). Delimitamos os limites da bacia até o município de Itupiranga (a jusante), onde está localizado o medidor de vazão, utilizado para calibrar e validar o SWAT. Assim, a área de estudo passa a ter 764.000 km², que corresponde a cerca de 9% do território nacional.

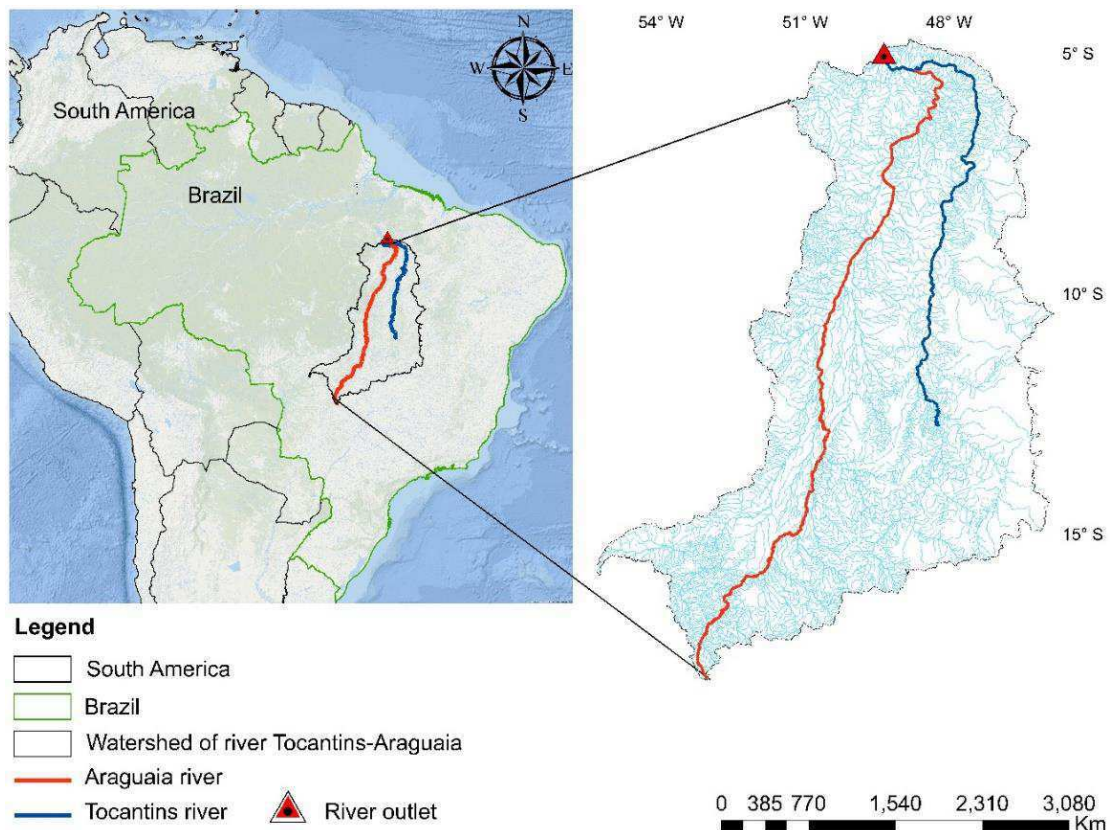


Fig. 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia.

A topografia da bacia à jusante varia de 200 a 500m de altitude e as regiões à montante são superiores a 1000m de altitude com máximo de 1,674m. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média varia entre 26,1°C a 27,4°C a montante da bacia, e a jusante a temperatura máxima varia de 31,8°C a 33,6°C. A precipitação anual acumulada na bacia é superior a 2.000 mm (MMA,2005; Falck et al., 2015). Devido à sua extensão territorial, o

BHTA é influenciado por sistemas meteorológicos de várias escalas (Fig. 2), como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistemas frontais (SF) e sistemas convectivos de mesoescala (SCM), que auxiliam na recarga de água que começa em setembro e outubro (Kodama, 1992; Reboita et al., 2010; Falck et al., 2015). Observamos a distribuição espacial da precipitação para o BHTA e os principais sistemas de precipitação atmosférica (Fig. 2), sendo que na região oeste da bacia ela precipita mais do que na porção leste. Com base no uso e cobertura da terra, a região oeste corresponde às reservas florestais da Amazônia.

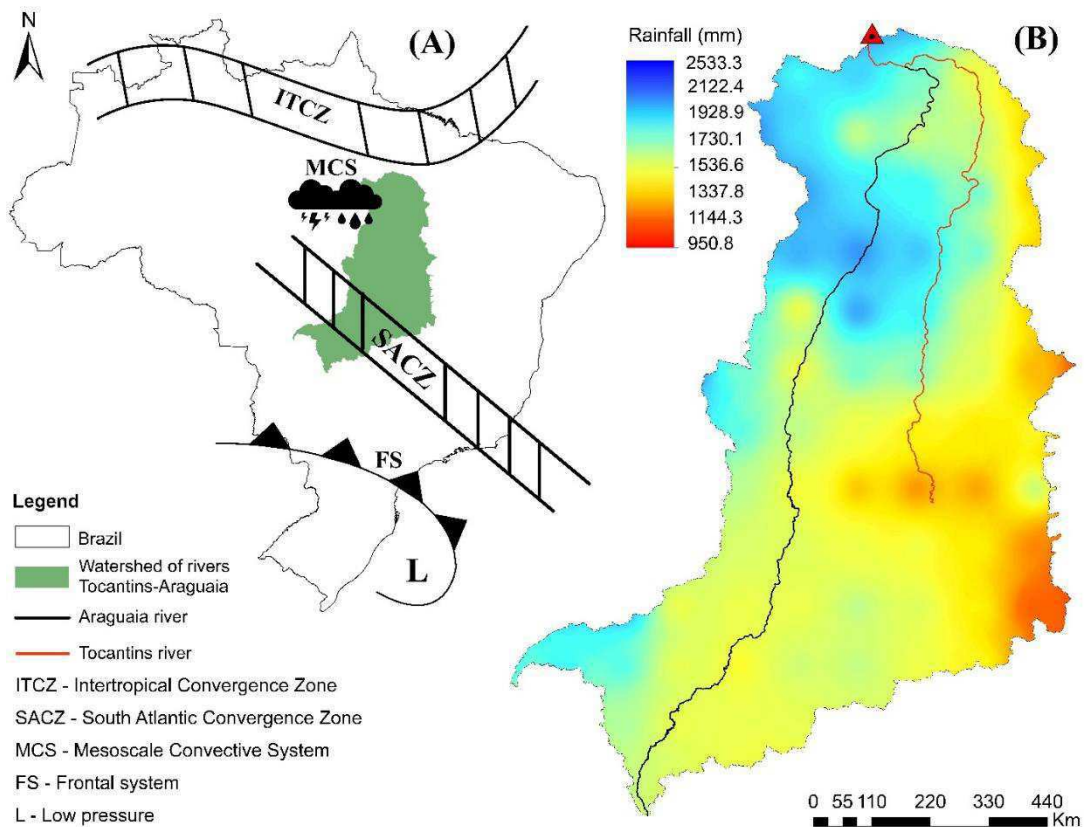


Fig. 2. Sistemas climáticos de precipitação na região (A) e distribuição espacial das chuvas na Bacia do Rio Tocantins-Araguaia (B).

2.2.2 Usina Hidrelétrica de Tucuruí

Projetos hidrelétricos podem ser classificados de várias maneiras: por tamanho (grande, médio, pequeno), por finalidade (simples ou multiusos), pelo tipo de barragem (terra, enrocamento, gravidade) e como os fluxos de entrada do rio são regulados para gerar energia (armazenamento e a fio d'água, que segue o fluxo do rio) (Pandey et al., 2013).

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) é uma usina de grande porte, com múltiplos usos, com barragem do tipo gravidade e regula a geração de energia pelo armazenamento (EPE, 2018).

Ela foi construída e operada pela Eletrobras-Eletronorte, está situada no rio Tocantins, no estado do Pará, a montante da cidade de Tucuruí e atualmente é a quinta maior Hidrelétrica do mundo. Distante cerca de 300 km, em linha reta, de Belém (capital do estado). A UHT, em termos de geração de energia, é a terceira maior do Brasil (13%), perdendo apenas para a gigante ITAIPU-Binacional (23%), no Rio Paraná, e a recém-construída Usina Belo Monte na Amazônia Ocidental (16%) segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL 2018).

No entanto, em termos de faturamento, a UHT em BHTA é a maior do Brasil (já que a receita de Itaipu é dividida com o Paraguai). Somente em 2019 a UHT faturou R\$ 1,5 bilhão (moeda brasileira) e, ao longo de seus mais de 30 anos, a UHT já gerou mais de R\$ 52 bilhões ou US\$ 10 bilhões para os cofres públicos brasileiros. O objetivo principal da usina é suprir o mercado de energia elétrica representado pela região metropolitana de Belém, sudeste do estado do Pará, estados do Maranhão e Tocantins, e outras regiões, por meio das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (EPE, 2018).

2.2.3 O modelo SWAT

O modelo SWAT foi desenvolvido com capacidade para desenvolver simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, crescimento vegetal, nutrientes e pesticidas nas práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água (Dhar, 2009, Neitsch et al., 2011, Lironga e Jianyuna, 2012, Silva et al., 2018). O SWAT é um modelo matemático e contínuo, semidistribuído, determinístico e com base física. Ou seja, é um modelo que por meios de equações matemáticas simula os processos físicos e suas variações no espaço e no tempo para uma determinada área de estudo (Arnold et al., 2012). O ciclo hidrológico no modelo SWAT e determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Eq. 1, também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que: SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm); t é o tempo (dias); P é a precipitação pluvial (mm); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm); ET é a evapotranspiração (mm); W_a é a percolação (mm) e Q_{sub} é o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

2.2.4 Dados de entrada do SWAT

2.2.5. Modelo de elevação digital (MDE)

O primeiro passo a ser executado com o modelo SWAT é calcular o acúmulo de fluxo, redes de drenagem, declive e delineamento de bacias hidrográficas, para isso é necessário o MDE da área de estudo. Utilizou-se a resolução de grade do MDE de 30 m por 30 m, em formato raster e projetada para o Transverse Mercator (UTM) no sistema de referência espacial WGS84, este dado foi obtido através do site do USGS (United States Geological Survey) e é apresentado na Fig. 3B, juntamente com a delimitação da bacia de acordo com o MDE e suas sub-bacias (Fig. 3A).

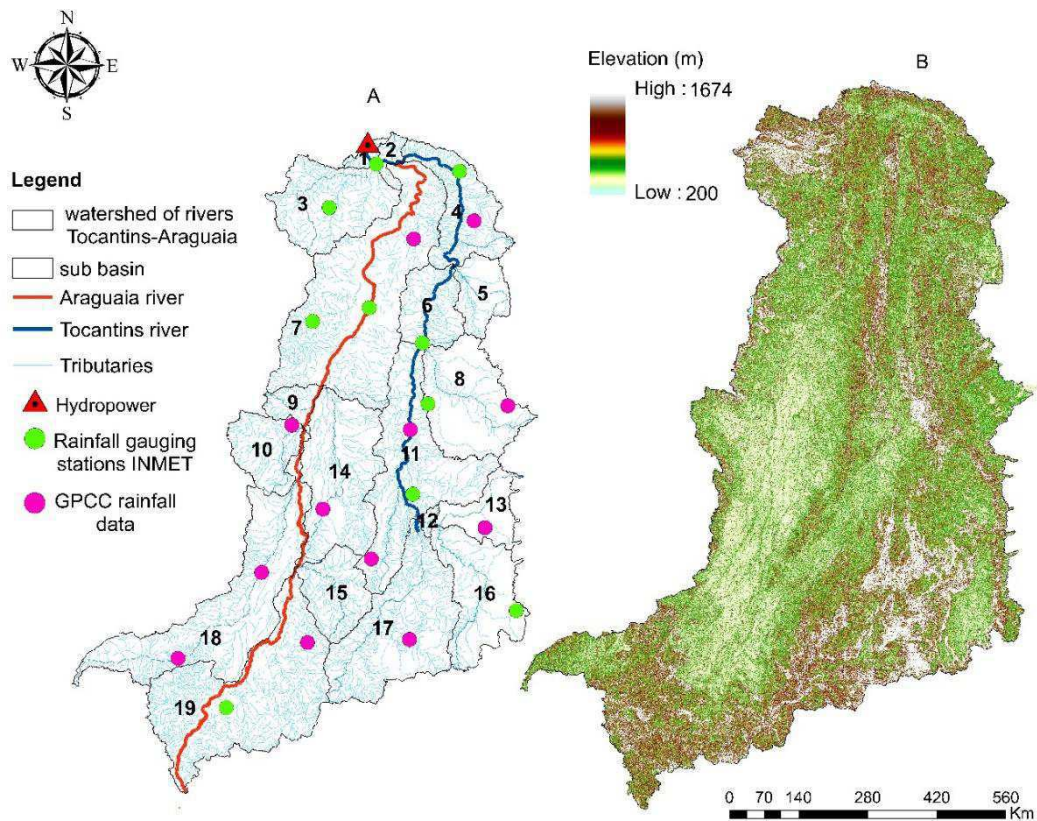


Fig. 3. (A) sub-bacias definidas pelo SWAT e (B) MDE da área de estudo.

2.2.6 Dados de solo e uso e cobertura da terra

Os dados de solo da bacia são referentes ao banco de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), através do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, para o ano de 2018. O SWAT necessita das informações das propriedades físicas e químicas do solo – textura, o conteúdo de água, condutividade hidráulica, densidade, pH, conteúdo de carbono orgânico, profundidade horizontal, e percentuais de areia, silte e argila para cada horizonte do solo

(Desta e Lamma, 2017), estas variáveis de solo foram extraídas de Silva (2014) e Silva et al., (2018C), pois suas áreas de estudos detêm os mesmos tipos de solo que a BHTA.

Foram encontrados para a BHTA os seguintes solos: Cambissolo (CAM), Latossolo vermelho-amarelo (CLVA), Neossolo flúvico (CNF), Plintossolo (FFC), Gleissolo (Gxdb), Luvisso (LUV) e Argissolo (PVAd). Os tipos CLVA, CNF e FFC são os solos dominantes na BHTA com 26,4 %, 22,2 % e 21,3% respectivamente da área total (Fig.4^a). Para o uso e cobertura da terra foram utilizados os dados referente ao projeto MapBiomias (MapBiomias, 2018), que é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação que utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica (30 anos) de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (MapBiomias, 2018). Nesse estudo utilizou-se o uso e cobertura da terra referente ao ano de 2017, sendo pastagem (48%) e floresta (40,6%) são os usos da terra predominantes na BHTA (Fig. 4B), seguidos de áreas agrícolas (8,8%) e áreas úmidas (1,3%).

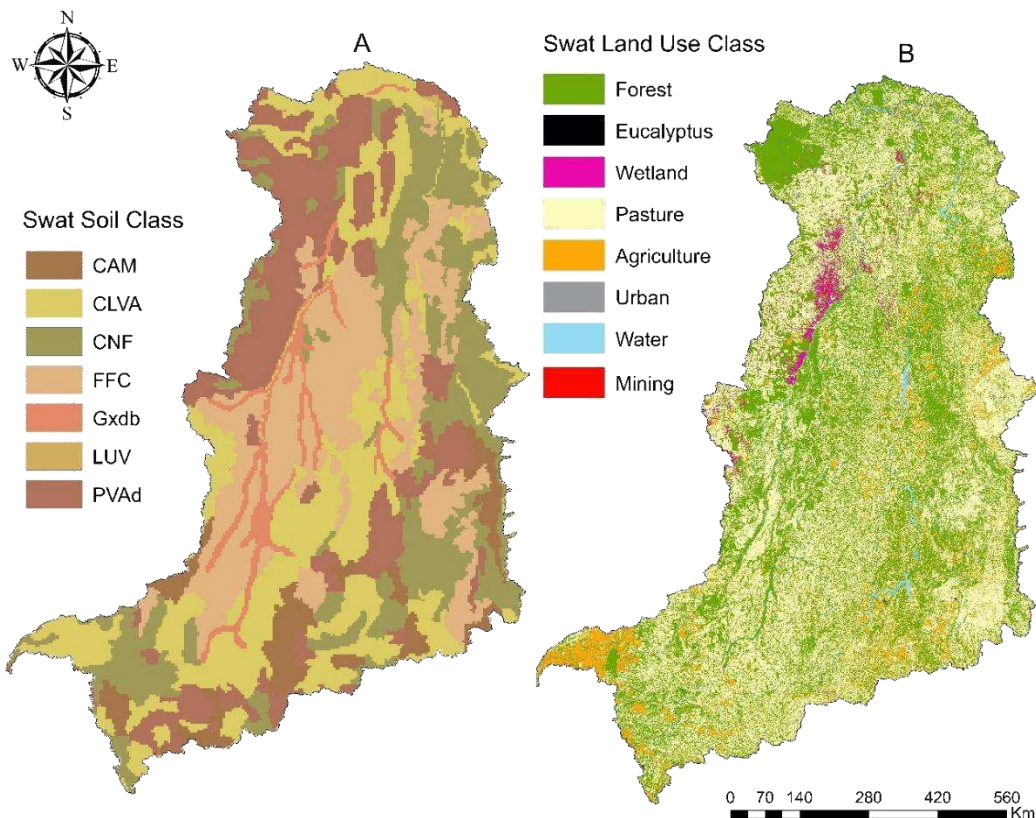


Fig. 4. (A) Tipos de solo e (B) tipos de uso e cobertura da terra utilizados como entrada no SWAT.

É necessário ressaltar a importância dos dados apresentados na Fig. 3 e 4 para a modelagem com o SWAT, uma vez que ao depender das características de cada variável (DEM, solo e uso e

cobertura da terra), o modelo realizará combinações entre estas variáveis, produzindo as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Estimativa de evapotranspiração, bem como escoamento superficial, é prevista separadamente para cada HRU, permitindo uma melhor representação física dos processos hidrológicos (Strauch et al., 2012). Em seguida a produção de água de cada HRU é computada para a rede de drenagem até o Exutório principal.

2.2.7 Dados Hidrometeorológicos

Neste estudo três (CFSR, INMET e GPCC) fontes de dados meteorológicos foram aplicados: precipitação (Prp), velocidade do vento (w), radiação solar (Sr), umidade relativa (rh), temperatura (t) e temperatura do ponto de orvalho (dewp). Para as variáveis de (w, Sr, rh, t e dewp) foi usado o banco de dados do Climate Forecast System Reanalises (CFSR), no período de 1979 a 2013, disponibilizados através do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Para a precipitação (Prp), foi utilizado os dados de dez estações meteorológicas pertencente ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), tendo sido adotada para caracterizar o clima local com maior eficiência. Por fim, para uma melhor representação da Prp, utilizou-se os dados do Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), referentes a 7.000 estações ao redor do mundo que são interpoladas, e é gerado uma série de precipitação global de 1901 a 2016 (Schneider et al., 2017).

Os dados de vazão são referentes a estação de Itupiranga a montante da hidrelétrica de Tucuruí, referentes às séries históricas da Agência Nacional de Água (ANA) com 48 anos de dados de 1969 a 2017. Utilizaram-se dados de 1969 a 1979 no warm up, de 1979 a 1995 para a rodagem do SWAT, de 1995 a 2000 para a calibração e por fim de 2000 a 2017 para a validação. Para calibrar o modelo com maior eficiência e precisão devido ao tamanho da bacia, foram utilizadas 9 estações no sentido montante-jusante do BHTA.

2.8 Calibração e Validação do SWAT

Na calibração do modelo foi utilizado o software SWAT-CUP 5.2.1.1 versão de 2019, aplicando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) e como função objetivo foi usado o coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (NS). O algoritmo SUFI-2 mapeia todas as incertezas (parâmetro, modelo conceitual, entrada e outros) nos parâmetros (expressos como distribuições ou intervalos uniformes) e tenta capturar a maioria dos dados medidos dentro da incerteza de predição de 95% (95PPU) do modelo em um processo iterativo (Abbaspour et al., 2015). A faixa do 95PPU é calculada nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de

uma variável de saída (vazão) obtida por Amostragem Hipercúbica Latina (Abbaspour et al., 2015; Abbaspour et al., 2017; Andrade et al., 2018).

A quantificação do ajuste entre os resultados da simulação e os dados observados pode ser realizada por dois índices estatísticos calculados pelo SWAT-CUP: o P-fator e o R- fator. O fator-P é a porcentagem dos dados observados dentro da incerteza da predição do modelo, varia de 0 a 1, onde 1 indica 100% de ajuste dos dados medidos dentro da incerteza modelo de predição (ou seja, um modelo perfeito de simulação considerando a incerteza), enquanto o fator- r (equação no Anexo b) é a incerteza média dos 95 PPU. As funções P-fator e R- fator são amplamente discutidas por Abbaspour et al., 2004, Abbaspour et al., 2015, Abbaspour et al., 2018, Andrade et al., 2018.

A análise de sensibilidade foi executada no SUFI-2 do SWAT-CUP, assumindo uma análise de sensibilidade global de 22 parâmetros relacionados aos processos de vazão, evapotranspiração, percolação, recarga de aquífero raso e profundo, infiltração, fluxo de base e outros processos hídricos. Realizamos análise de sensibilidade global com 4 iterações de 700 execuções do modelo para extrair os parâmetros mais sensíveis. Após cada iteração, o SWAT-CUP mostra ao modelador (usuário) novos intervalos de cada parâmetro selecionado, geralmente menores que a iteração anterior, para reduzir a incerteza e melhorar o desempenho do modelo. Esses novos parâmetros foram usados para a próxima iteração.

Este processo foi repetido até a quinta iteração, quando nenhuma melhoria adicional no desempenho do fluxo simulado foi alcançada. Assim, calibramos as principais sub-bacias (3, 5, 7, 17, 19) por possuírem estações hidrológicas com medições de vazão no período total do estudo e, por fim, calibramos a foz. Isso nos dá um excelente ajuste entre o fluxo simulado e o real. Durante a análise de sensibilidade dos parâmetros o SWAT-CUP aplica-se o t-test, que é utilizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro, e quanto maior valor do parâmetro (em termos absolutos), mais sensível ele será. O p-value determina a significância da sensibilidade e valores próximos de zero indicam os parâmetros mais significantes (Abbaspour, 2015).

A validação dos resultados de vazão, se deu a partir dos indicadores estatísticos recomendados pelo International Precipitation Working Group (IPWG) e descritos por Liu et al., 2013, Abbaspour et al., 2015, Serrão et al., 2016, Desta e Lemma 2017, Abbaspour et al., 2018, Silva et al., 2018 e Serrão et al., 2019. Assim serão utilizados seis índices estatísticos sendo: o coeficiente de correlação de Pearson ao, o coeficiente de determinação (r^2), o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) (Nash-Sutcliffe, 1970), o índice de concordância (IC), com base em Willmott (1985), na análise qualitativa dos dados empregou-se o coeficiente de qualidade (U), segundo Theil (1966) e o coeficiente de massa residual CRM (Blainski et al., 2017), tais equações são apresentadas a seguir.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (2)$$

$$IW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (3)$$

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}} \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - O_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

Em que, S_i é a vazão estimada pelo SWAT e O_i é a vazão observada, \bar{O}_i é o valor médio da vazão. O NS pode variar de $-\infty$ a 1 valores próximos a 1 indicam um melhor desempenho do modelo. O desempenho do modelo foi considerado satisfatório se $NE > 0,7$. IC varia de zero a um, sendo zero, nenhuma concordância e um, concordância perfeita, nesse estudo consideramos o IC satisfatório se $IC > 0,7$. O coeficiente de U (Theil), compara os dados estimados com o observado. Assim quando $U > 1$, o modelo superestima o observado e quando $U < 1$, o modelo subestima o observado, assim quando $U \cong 0$, melhor será o resultado dos dados estimados em relação ao medido, o CRM mede a tendência média entre valores simulados e medidos. $CRM=0$ indica uma relação perfeita entre os dados, valores positivos indicam uma tendência de subestimativa do modelo, enquanto que valores negativos sinalizam para a superestimativa da variável simulada.

2.2.9 Produção de Energia Elétrica a partir da vazão simulada

Nesse estudo foi obtido a produção de energia para a bacia do rio Tocantins-Araguaia, na Amazônia oriental. Para o cálculo da produção de energia foi utilizada Eq 6. (Stickler et al., 2013, Mendes et al., 2017 e Queiroz et al., 2019):

$$E(Q) = \rho g \eta_p \int_0^{\Delta t} H_{(t)} \eta_t Q_{(t)} dt \quad 6$$

em que $E(Q)$ [MW] é a produção de energia elétrica (mensal); $H_{(t)}$ [m] é a diferença entre as alturas do nível máximo a montante e o nível mínimo a jusante da barragem (mensal), $Q_{(t)}$ [$m^3 s^{-1}$] é a vazão real e simulada (mensal), ρ [$kg m^{-3}$] é a densidade da água, g [$m s^{-2}$] é a aceleração da gravidade, η_t é o coeficiente de eficiência da turbina, η_p é a eficiência da planta. A produção energética foi gerada utilizando a vazão real na estação de Itupiranga e o potencial de acordo com a vazão simulada pelo modelo SWAT, a fim de verificar a eficiência do potencial energético simulado. A Figura 5 apresenta as etapas percorridas em neste estudo.

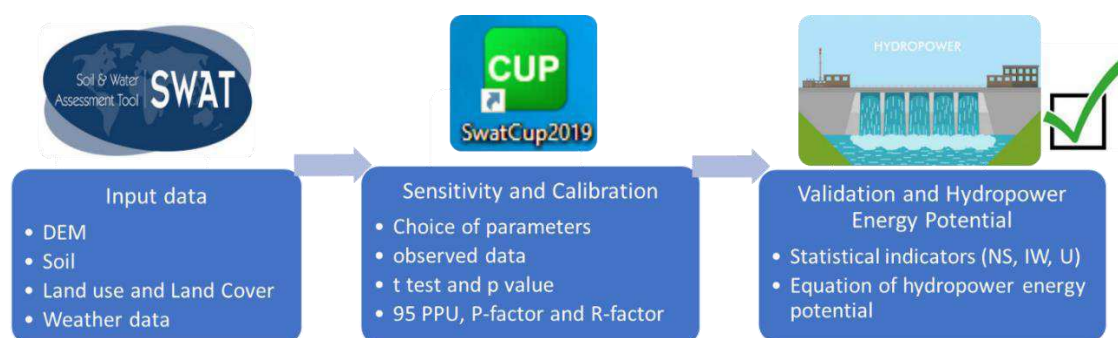


Fig. 5. Diagrama das etapas percorridas do SWAT até a estimativa de faturamento.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Análise de sensibilidade e calibração da vazão

Durante a análise de sensibilidade, escolhemos 11 parâmetros para o processo de calibração. De acordo com Arnaldo et al., (2012); Abbaspour et al., (2015) e Abbaspour et al. (2018). O sucesso da calibração se deve a dois fatores principais, o primeiro diz respeito aos fatores físicos da bacia, ou seja, os dados de entrada do modelo (tipos de solo, clima, uso da terra). O segundo ponto, é a dependência da análise de sensibilidade e calibração do modelo. De acordo com Gassman et al., (2007) e Arnold et al., (2012), o balanço hidrológico geral é simulado para cada HRU, incluindo a interceptação da precipitação do dossel, escoamento superficial, infiltração e redistribuição da água no perfil do solo. Todos esses processos são representados pelos parâmetros que podem ser calibrados no SWAT, por isso apresentamos na Tabela 1 os parâmetros utilizados para calibrar o modelo.

O ranking de sensibilidade (Figura A1 e A2 do Anexo B) é definido pela avaliação de dois coeficientes: o índice t-stat, obtido dividindo-se o coeficiente do parâmetro encontrado na análise de regressão múltipla pelo erro padrão, e o teste de hipótese do valor p (teste de Student) (Abbaspour et al., 2004). O índice t-stat é uma melhor escolha para o usuário entender a magnitude da sensibilidade, enquanto o valor p é melhor para determinar quais parâmetros são mais sensíveis (Abbaspour et al., 2015, Brighenti et al., 2019). Foi utilizado o valor p para definir os parâmetros mais sensíveis, sendo um valor p baixo ($\leq 0,5$) indica que a hipótese nula pode ser rejeitada, com um valor de p de 0,5, há apenas 5% de chance de que os resultados tenham aparecido em uma distribuição aleatória, com 95% de probabilidade de estar correto que a variável está tendo algum efeito no resultado da simulação (Abbaspour et al., 2004, Me et al., 2015, Brighenti et al., 2019).

Tabela 1. Parâmetros utilizados para calibrar a BHTA, bem como suas faixas e valores finais.

Parâmetro	Descrição	Variação		Valor Final
		Min	Max	
v_ESCO	Soil evaporation compensation Coefficient	0.5	0.95	0.70
r_CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	-0.1	0.1	-0.098
a_GW_DELAY (days)	Groundwater delay time	-30	60	17.02
a_GWQMN (mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	-1000	1000	-983.56
v_GW_REVAP	Groundwater “revap” Coefficient	0.02	0.2	0.032
a_REVAPMN (mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer for “revap” or percolation to the deep aquifer to occur	-1000	1000	-263
v_SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0.01	24	3.71
v_CANMX (mm)	Maximum canopy storage	0	30	16.90
v_ALPHA_BF	The baseflow recession constant	0.005	0.015	0.009
v_CH_N2	Manning’s “n” value for the main channel	-0.01	0.2	0.036
v_CH_K2 (mm h ⁻¹)	Effective hydraulic conductivity in main channel	0	10	8.58

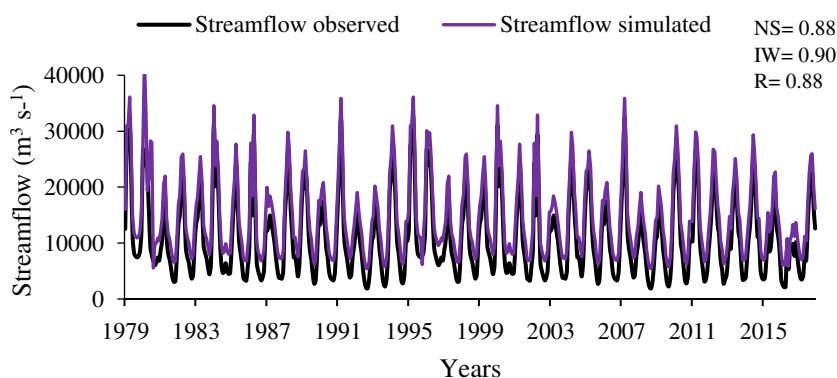
Os métodos usados para ajustar os valores dos parâmetros no SUFI-2 são representados como a primeira letra antes do nome dos parâmetros (R, V e A), sendo a letra V a substituição do valor do parâmetro existente, A está adicionando um determinado valor ao valor do parâmetro existente e R está multiplicando (1 + um determinado valor) pelo valor do parâmetro existente.

Os parâmetros relevantes nas sub-bacias no sentido montante-jusante são parametrizados com base nos dados disponíveis, literatura e experiência do modelador. Este procedimento resulta na regionalização dos parâmetros. Assim, seguimos os processos de calibração recomendados por (Arnold et al., 2012); Abbaspour et al., 2015; Abbaspour et al., 2018), utilizando os parâmetros descritos na Tabela 1 para análise de sensibilidade e calibração do modelo, e em seguida apresentamos a Tabela 2, desenvolvida por Abbaspour et al. (2015) para a Europa e adaptado à realidade do BHTA.

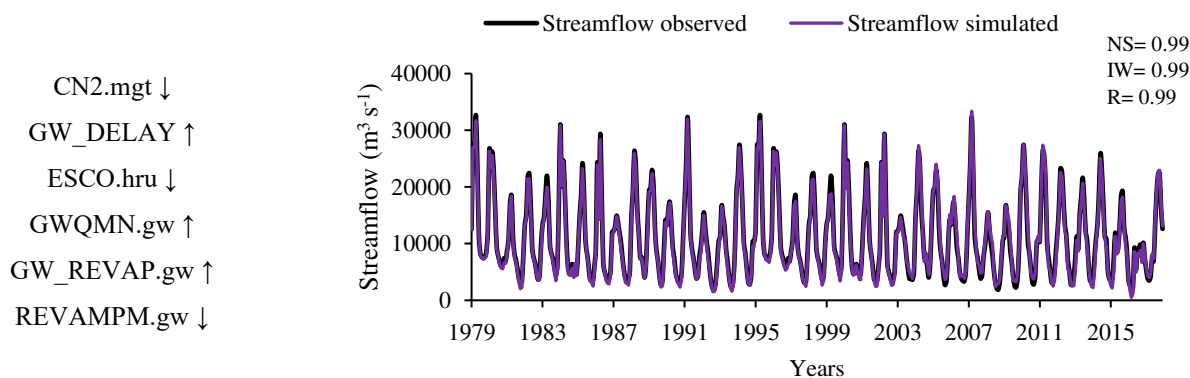
Tabela 2. Sugestão para regionalização de parâmetros em bacias de grande porte. A seta para cima ↑ indica que o parâmetro deve aumentar seu valor e a seta para baixo ↓ indica que o parâmetro deve diminuir seu valor.

[topo] Condição simulada
(complicação) e [abaixo]
parâmetros significativos
(solução)

Antes (em cima) e depois (abaixo) da regionalização de parâmetros



Vazão de base muito alta
Vazão de pico muito alta



Neste momento, conseguimos reduzir o volume total do fluxo (ESCO; CN2; CANMX) e o fluxo subterrâneo (ALPHA_BF; GWQMN; GW_REVAP; GW_DELAY). Este procedimento foi realizado durante 4 iterações de 700 execuções do modelo, para que as novas faixas de parâmetros sugeridas sejam modificadas conforme descrito na Tabela 1, e então outra iteração é realizada. O procedimento continua até que resultados satisfatórios sejam alcançados (em termos de fator P e fator R) ou nenhuma melhoria adicional seja observada na função objetivo (Abbaspour et al., 2015). Os parâmetros ESCO, CN2 e CANMX são importantes, pois a aproximação das curvas simuladas e observadas reflete diretamente a variação desses parâmetros, uma vez que a redução da produção de água é reflexo da redução do valor desses parâmetros (Kannan et al., 2007, Silva et al., 2018).

E ainda, estes parâmetros são importantes para a simulação da evapotranspiração real (Arnoud et al., 2012), bem como as simulações do escoamento superficial que influencia diretamente na calibração mensal do escoamento superficial e nas características sazonais da bacia (Abbaspour et al., 2004, Arnold et al., 2012, Abbaspour et al., 2015, Anand et al., 2018, Serrão et al., 2019). Já os parâmetros ALPHA_BF; GWQMN; GW_REVAP; GW_DELAY, refletem diretamente nas vazões mínimas, pois controlam o fluxo de base. Estes são de grande importância para a BHTA devido a sazonalidade hidroclimática da região, ou seja, durante o período de menor precipitação na bacia a vazão de base mantém os rios perenes (Abbaspour et al., 2004; Arnoud et al., 2012; Anand et al., 2018; de Oliveira Serrão 2020).

Essa metodologia foi utilizada por Silva et al., (2018) para calibrar uma sub-bacia amazônica, onde NS = 0,99 foi alcançado quando os autores diminuíram a vazão de base e o número da curva. Oliveira et al., (2019) calibraram o modelo para a bacia do Alto Rio Paranaíba, no Cerrado, e observaram que os parâmetros mais sensíveis na região foram CN2, GW_DELAY, ESCO relacionados ao fluxo subterrâneo e superficial. Na Índia, Anand et al., (2018) obteve

sucesso na calibração do SWAT, alterando os parâmetros CN2, SOL_AWC, ESCO, GW_DELAY e GW_REVAP.

2.3.2. Validação da vazão simulada para a BHTA

Na Figura 6 é apresentada a vazão observada e simulada para a BHTA, e sua validação. É notável que o SWAT conseguiu descrever bem a vazão simulada ao longo da série temporal observada, no entanto é perceptível que existe uma amplitude de erro entre as vazões mínimas.

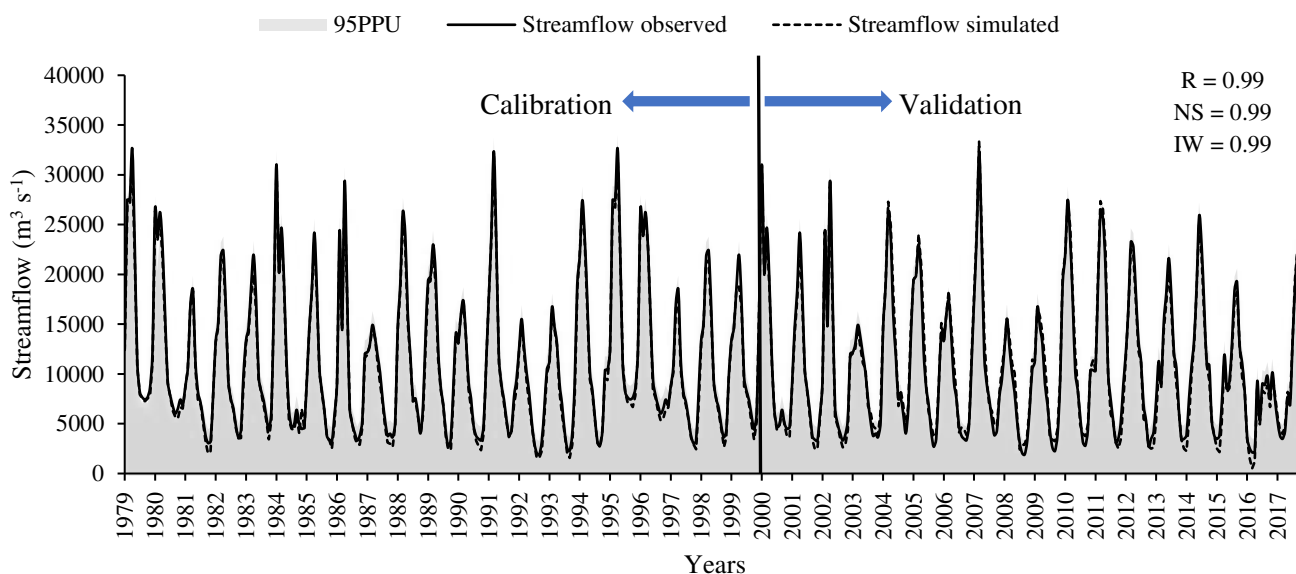


Fig. 6. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia destacando os períodos de calibração e validação.

Na validação da vazão pelas equações descritas em 2.2.8, observamos que os coeficientes de correlação e determinação apresentaram bom desempenho entre as vazões, ambos acima de 0,95. Para o coeficiente de Nash–Sutcliffe e índice de concordância de Willmott, a estimativa apresentou excelente desempenho, com NS = 0,99 e IW = 0,99. O coeficiente U de Theil teve um valor muito próximo de zero (0,02) e o CRM (-0,02). Para os fatores P e R foram obtidos valores de 0,82 e 0,62, respectivamente. Portanto, o desempenho do modelo foi considerado excelente, apesar da maior incerteza (fator R).

Alguns estudos revelam altos índices estatísticos associados a bacias com altas vazões. Silva et al., (2018 a) usaram o modelo SWAT para estimar vazão, escoamento e fluxo de sedimentos para uma pequena bacia no nordeste da Amazônia, e observaram os melhores resultados entre as vazões estimadas e observadas na estação fluviométrica que teve a maior vazão (com NS 0,98 em o escapamento). Também no Brasil, Silva et al., (2018 b) modelaram o fluxo e

o fluxo de sedimentos com o SWAT para a bacia do rio São Francisco, a terceira maior bacia do Brasil. Eles destacaram que a SWAT estima a vazão de forma mais eficiente em bacias com altas vazões nos rios. Os autores indicaram $R = 0,97$, $NS = 0,93$ e $IW = 0,98$ para as estações com as maiores vazões. Da mesma forma, Dos Santos et al., (2018) mostraram excelentes resultados com o modelo SWAT para uma sub-bacia amazônica, no rio Iriri, a oeste da bacia aqui estudada. Em resumo, esses levantamentos mostram que o modelo SWAT é capaz de simular eficientemente as vazões de bacias com alta disponibilidade hídrica, apresentando excelentes índices estatísticos. Para a Europa, Abbaspour et al., (2015) utilizaram o modelo SWAT para simular o balanço hídrico do continente e observaram que os melhores ajustes (R , NS) foram para rios com maior vazão.

Observa-se ainda o a maioria dos valores simulados pelo SWAT estão dentro da faixa do 95PPU indicando uma boa calibração dentro da incerteza do modelo. Neste sentido, Abbaspour et al. (2015) afirmam a importância da largura da banda dos 95PPU quando relata sobre os índices estatísticos p -factor e r -factor. Estudos semelhantes de validação gráfica (comparando hidrogramas) e estatística do SWAT são amplamente relatados na literatura, desde bacias hidrográficas áridas e semi-áridas (Meaurio et al. 2015, Silva et al., 2017) a bacias tropicais florestais (Desta e Lemma et al., 2017, Silva et al., 2018, Serrão et al., 2019, Brighenti et al., 2019).

2.3.3. Produção de energia

Esta seção apresenta capacidade de geração de energia para a UHT tendo como base a vazão simulada pelo SWAT. No intuito de averiguar a se a produção de energia simulado se equipara com a produção real da bacia. Na Figura 7 é apresentado a produção de geração de energia mensal observado e simulado e a vazão mensal simulada.

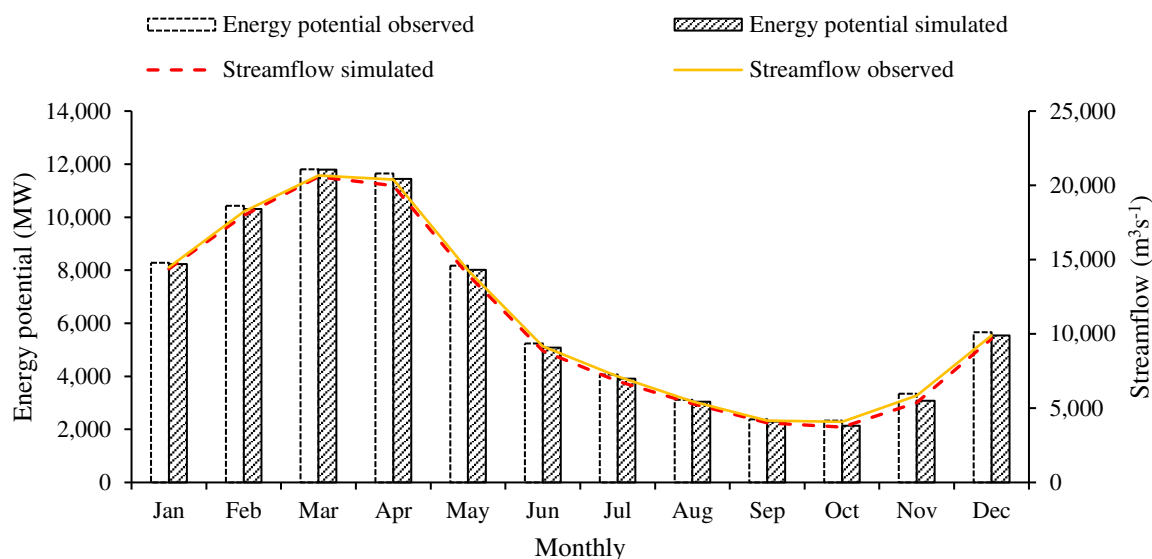


Fig 7. Geração de energia mensal observada e geração de energia mensal simulada para BHTA.

O potencial hidrelétrico está diretamente associado à vazão; portanto, geralmente segue sua sazonalidade. A sazonalidade dos corpos d'água amazônicos tem sido amplamente discutida (Coe et al., 2009; Dias et al., 2015; Falck et al., 2015; Panday et al., 2015). Nesse contexto, o potencial de geração de energia é maior nos períodos de verão e outono (estações chuvosas). Março e abril são os meses de maior potencial de geração de energia, de acordo com os resultados observados, com 11.808 MW e 11.647 MW, respectivamente. Além disso, esses meses têm potencial simulado de geração de 11.793 MW e 11.447 MW, respectivamente. Por outro lado, os meses de menor produção de energia são setembro e outubro, período de menor vazão em que se inicia o ano hidrológico na região. Além disso, observamos que há uma pequena diferença entre os potenciais simulados e observados, onde o simulado subestimou o observado em 15 MW em média. Este estudo não avalia as perdas durante o processo de geração de energia (discutido por Furtado e Fernandes, (2015); em vez disso, avaliamos o potencial máximo da geração. A avaliação da geração de eletricidade não é nova, e a maioria dos estudos utiliza modelos estocásticos (Guo et al., 2018; Dumitru e Gligor, 2019; Hussain et al., 2019). No entanto, a análise de modelos dinâmicos e físicos ou a inserção de forçantes climáticas precisa ser mais estudada, visando um melhor desenvolvimento econômico e sustentável das regiões que possuem esses sistemas energéticos.

Na atual conjuntura frente aos desafios da gestão ambiental, em relação aos impactos das mudanças climáticas, tornaram mais urgente a necessidade de desenvolver tecnologias em busca de resultados mais acessíveis e prontos para o uso da sociedade (Brouziyne et al., 2017). O adequado monitoramento, análise e gestão dos recursos naturais (especialmente a água) requerem

a implementação de uma abordagem multidisciplinar conjunta, de modo a criar estratégias racionais e políticas aplicadas para melhores cenários de gestão (Cau et al., 2015). A Figura 08 apresenta a relação entre a produção de energia simulada e observado para BHTA, bem como sua validação.

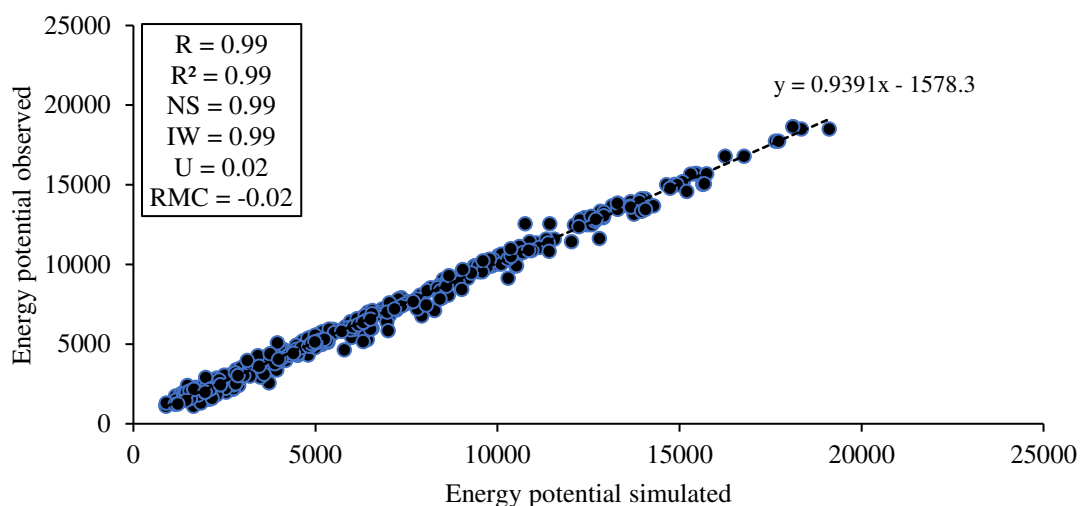


Fig 8. Relação entre a geração de energia observada e simulada para a BHTA.

O ajuste entre a energia simulada e observada foi satisfatório, com base nos parâmetros estatísticos de validação, embora alguns pontos estivessem fora da curva (Fig. 8). Os coeficientes de correlação e determinação apresentaram desempenho excelente, ambos acima de 0,95. Da mesma forma, o coeficiente de Nash–Sutcliffe e o índice de Willmott também apresentaram desempenho excelente, com valores de $NS = 0,99$ e $IW = 0,99$. Para o potencial energético estimado pela vazão do SWAT, o coeficiente U de Theil foi de 0,02 e o CRM foi de -0,02. Assim, o potencial energético simulado com a vazão estimada pelo modelo SWAT foi considerado eficiente e validado, apesar da pequena superestimativa de 0,02% no potencial simulado em relação ao valor observado. Portanto, com a vazão SWAT, é possível estimar o potencial hidrelétrico de uma bacia tropical, planejar projetos futuros e avaliar a receita com a venda da geração de energia.

Sobre isso, Stickler et al. (2013) investigaram a produção energética para a bacia do rio Xingu no sul da Amazônia e sua dependência com os impactos climáticos, trabalhando com modelo regional de chuva e vazão, e considerou a produção de energia validado e calibrado com valores de NS e R^2 acima de 0.75. Mendes et al., 2017 analisou a incerteza da expansão de hidroelétricas na Amazônia de acordo com cenários modelados de uso da terra para 100 anos e considerou a vazão e o produção hidrelétrico validado a partir de NS e R^2 iguais ou superiores a

0.85. Pandey et al. (2015) avaliaram a produção hidrelétrica para a microbacia do rio Mat, sul da Índia utilizando o SWAT e obteve valores de $NS = 0.72$, $R^2 = 0.72$ e $IW = 0.92$ e considerou o SWAT como ótima ferramenta para estudos nesse tema. Ainda na Índia, Kusre et al. (2010) avaliaram o potencial hidrelétrico da bacia do rio Kopili e considerou que o SWAT obteve um bom desempenho na simulação da vazão, e por sua vez da produção hidrelétrica da bacia.

2.4. CONCLUSÕES

Este estudo investigou a vazão simulada pelo modelo SWAT para uma bacia de larga escala no Brasil, a hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia, bem como a produção hidroelétrica da bacia. Observou-se que com a parametrização do modelo SWAT foi fundamental para identificar os parâmetros mais sensíveis e influenciáveis aos processos hídricos da região. Assim constatando que os parâmetros, CN2 e o atraso da água subterrânea (GW_DELAY), foram os parâmetros mais sensíveis para esse estudo, haja visto o tamanho da bacia e as condições de uso da terra. Com a regionalização dos parâmetros durante o processo de calibração, foi possível obter excelentes resultados entre a vazão estimada e a vazão observada. Desta forma, todos os indicadores estatísticos de desempenho atestam a excelente modelagem.

O potencial hidrelétrico na BHTA foi gerado com base em uma vazão calibrada e validada, que foi simulada pelo SWAT. Avaliou-se a produção como eficaz e validada, considerando os indicadores estatísticos de desempenho utilizados anteriormente na vazão, evidenciando a importância da calibração do modelo que poderá auxiliar futuros empreendimentos energéticos. A BHTA tem um potencial muito alto para geração de energia elétrica, que depende diretamente da vazão; em virtude disso, depende de sua sazonalidade.

Este estudo pode servir de diretriz para gestores públicos e privados criarem políticas de gestão de bacias hidrográficas localizadas em regiões tropicais e auxiliar no planejamento e tomada de decisões para a criação de políticas públicas que melhor atendam a demanda de exploração sustentável dos recursos naturais amazônicos. Na atual conjuntura de mudanças no uso da terra e clima, estudos futuros pretendem trazer a perspectiva das mudanças no uso da terra no ciclo hidrológico em BHTA e produção de energia em UHT, bem como a fusão dos efeitos das mudanças no uso da terra com cenários de mudanças climáticas. Então, que impactos as mudanças climáticas e de uso da terra trarão para BHTA e UHT?

2.5 REFERÊNCIAS

- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.Th. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.* 3, 1340–1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B. A. 2015. Continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S., Srinivasan, R., 2018. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water.* 10(1), 6. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Abera, F.F., Asfaw, D.H., Engida, A.N., Melesse, A.M. 2018. Optimal Operation of Hydropower Reservoirs under Climate Change: The Case of Tekeze Reservoir, Eastern Nile, *Water.* 10(3), 273. <https://doi.org/10.3390/w10030273>
- Anand, J., Gosaina, A.K, Khosaa, R., Srinivasan, R. 2018. Regional scale hydrologic modeling for prediction of water balance, analysis of trends in streamflow and variations in streamflow: The case study of the Ganga River basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 16, 32-53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.007>
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S. M.G.L., Montenegro, A.A.A., Lima, J.R.S., Srinivasan, R., Jones, C.A. 2019. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. *Ecohydrology & Hydrobiology.* 19, 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.09.002>
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Res. Assoc.* 34, 73–89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688>
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K. 2012. SWAT: model use calibration and validation. *Trans. ASABE.* 55, 1494–1508. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.42256>
- National Water Agency (ANA) 2009, Strategic Water Resources Plan of the Tocantins and Araguaia Rivers Watershed, Brasilia, DF, Brazil, 258p (in Portuguese).
- Baker, T.J., Miller, S.N., 2013. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *J. Hydrol.* 486, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>
- Balkhair, K.S., Rahman, K.U. 2017. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy.* 87, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.012>
- Blainski, E., Costa, E.A., Nogueira, P.C.P. 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. *Ao. Ambien. Água.* 12, 226-237. [10.4136/ambi-agua.1951](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951)

- Brighenti, T.M., Bonumá, N.B., Grison, F., Mota, A.A., Kobiyama, M., Chaffe, P.L.B. 2019. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. *Ecological Engineering*. 127, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.007>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B. S. 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Cohen, J.C., Beltrão, J.C., Gandu, A.W., Silva, R.R. 2007. Influência do Desmatamento Sobre o Ciclo Hidrológico na Amazônia, *Ciência e Cultura*. 59, 36-39.
- Cho, K.W., Pachepsky, Y.A., Kim, M., Pyo, J.C., Park, M.H., Kim, W.M., Kim, J.W., Kim, J.H., 2016. Modeling seasonal variability of fecal coliform in natural surface waters using the modified SWAT. *J. Hydrol.* 535, 377–385, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.084>
- Delucchi, M., Jacobson, M. 2011. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*. 39, 1170-1190, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045>
- Demarty, M., Bastien, J. 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy*. 39, 4197-4206. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.033>
- Desta, H., Lemma, B. 2017. SWAT based hydrological assessment and characterization of Lake Ziway sub-watersheds, Ethiopia. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 13, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.002>
- Dias, L.C.P., Macedo, M.N., Costa, M.H., Coe, M.T., Neill, C. 2015. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 108–122, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.010>
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., Messner, F. 2018. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water*. 10, 1-19. <https://doi.org/10.3390/w10040429>
- Dha, S., Mazumdar, A. 2009. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case study in India. *Hydrol, Process.* 23, 2394 – 2406, <https://doi.org/10.1002/hyp.7351>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018, Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, DF, Brasil, 345p (em Português).
- Falck, A.S., Maggioni, V., Tomasella, J., Vila, D.A., Diniz, F.L.R. 2015. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. *J. Hydrol.* 527, 943–957, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>
- Fearnside, P.M., Pueyo, S. 2012. Greenhouse-gas emissions from tropical dams, *Nature Climate Change*. 2, 382–384. <https://doi.org/10.1038/nclimate1540>
- Furtado, G.C.A., Fernandes, D.R.A. 2015. Analysis of power dispatch in the short term, in Tucuruí hydroelectric plant, through losses in the generation process, *International Congress of Mechanical Engineering*. 23, 1-8.

- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., Srinivasan, R. 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *J. Environ. Qual.* 43, 1-8, [doi:10.2134/jeq2013.11.0466](https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466)
- Guo, B., Xua, B., Chena, D., Wei, Y., Guo, P., Luo, X. 2018. Dynamic modeling and energy distribution analysis in a hydroelectric generating system considering the stochastic turbine flow. *Electrical Power and Energy Systems.* 103, 611–621, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.032>
- Hussain, I., Ali, S.M., Khan, B. Ullah, Z., Mehmood, C.A., Jawad, M., Farid, U. Haider, A. 2019. Stochastic Wind Energy Management Model within smart grid framework: A joint Bi-directional Service Level Agreement (SLA) between smart grid and Wind Energy District Prosumers. *Renewable Energy.* 134, 1017-1033, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.085>
- International Energy Agency, (IEA). 2019, World Energy Outlook 2019, IEA, Paris. Available in: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Kannan, N., White, S.M., Worrall, F., Whelan, M.J. 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *J. Hydrol.* 332, 456-466, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.001>
- Kodama, Y. 1992. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813–835, https://doi.org/10.2151/jmsj1965.70.4_813
- Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K, Patra, S.C. 2010. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy.* 87, 298–309, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>
- Kumar, A., Sharma, M.P. 2016. A modeling approach to assess the greenhouse gas risk in Koteshwar hydropower reservoir, India. *Human and Ecological Risk Assessment.* 22, 1651–1664, <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2016.1209077>
- Lironga, S., Jianyuna, Z. 2012. Hydrological response to climate change in Beijiang River Basin based on the SWAT model. *Procedia Eng.* 28, 241–245, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.713>
- Liu, Z., Ostrenga, D., Teng, W.L., Kempler, S.J. 2013. Implementing the International Precipitation Working Group (IPWG) Validation Statistics in Online Tools to Inter-compare and Characterize Satellite-derived Global Precipitation Products, American Geophysical Union. Fall Meeting, San Francisco, 9-13.
- Malhi, Y.J., Roberts, T., Betts, R.A., Killeen, T.J., Li, W., Nobre, C.A. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science.* 319, 169-172, [10.1126/science.1146961](https://doi.org/10.1126/science.1146961)
- MapBiomass Project – Collection (3.1) of Brazil’s Annual Coverage and Land Use Map Series. Available in: <http://mapbiomas.org/map#coverage>
- Mendes, C., A.B., Fausto, A.B., Canales, A. 2017. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. *Energy.* 141, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.071>

- Me, W., Abell, J.M., Hamilton, D.P. 2015. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 4127-4147, [10.5194/hess-19-4127-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-4127-2015)
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Uriarte, J.A., Srinivasan, R. 2015. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin, The case of a small forested watershed. *J. Hydrol.* 525, 326–334, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.050>.
- Ministry of the Environment (MMA), 2005, National Water Resources Plan, Tocantins – Araguaia Hydrographic Region Regional Study, Brasilia, DF, Brazil (in Portuguese)
- National Electric Energy Agency (ANEEL). 2018. Monitoring Reports on the Expansion of the Electricity Generation Offering. Ministry of Mines and Energy. Brasilia, DF, Brazil (in Portuguese)
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290, [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. 2011. Soil & water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resour, Inst. 1-647, [10.1016/j.scitotenv.2015.11.063](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063)
- Oliveira, V.A., Mello, C.R., Viola, M.R., Srinivasan, R. 2017. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology.* 37, 753 5005-5023. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>
- Oliveira, V.A., Mello, C.R., Beskow, S., Viola, M.R., Srinivasan, R. 2019. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering.* 133, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>
- Pandey, A., Lalrempuia, D., Jain, S.K. 2015. Assessment of hydropower potential using spatial technology and SWAT modelling in the Mat River, southern Mizoram, India. *Hydrol. Scie. J.* 60, 1651-1665. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943669>
- Pereira, D.R., Martinez, M.A., Pruski, F.F., Silva, D.D. 2016. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *J. Hydrol. Regi. Stud.* 7, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Phomcha, P., Wirojanagud, P., Vangpaisal, T., Thaveevouthti, T. 2012. Modeling the impacts of alternative soil conservation practices for an agricultural watershed with the SWAT model, *Procedia Eng.* 32. 1205–1213. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.078>
- Queiroz, A.R., Faria, V.A.D., Lima, L.M.M., Lima, J.W.M. 2019. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. *Renewable Energy.* 133, 873-882. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P., Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev, bras, meteorol.* 25, 185-204. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

- Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J. Hydrol.* 352, 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>
- Serrão, E.A.O., Wanzeler, R.T.S., Santos, C.A., Gonçalves., L.J.M., Lima, A.M.M., Rocha, E.J.P., 2016. Statistical evaluation between the constellation of precipitation estimates with GPM satellite TRMM: an analysis of the river basin Solimões. *Revista Brasileira de Climatologia.* 18, 256-275. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43059>
- Serrão, E.A.O., Silva, M.T, Sousa, F.A.S, Lima, A.M.M, Santos, C.A., Ataide, L.C.P., 2019. Four decades of hydrological processes simulation in the watershed of the Itacaiúnas river, Southeast of the Amazon. *Bulletin of Geodetic Sciences.* 25, 1-18. <https://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>
- Silva, M. T. Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do 657 submédio rio São Francisco. Campina Grande – PB: Universidade Federal de Campina Grande – 658 UFCG, 2014 (Tese de Doutorado).
- Silva, V.P.R, Silva, M.T, Braga, C.C, Singh, V.P., Souza, E.P., Sousa, F.A.S, Holanda, R.M., Almeida, R.S.R., Braga, A.C.R, 2018^a. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena.* 162, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>
- Silva, A.K.L., Sousa, A.M.L., Santos, J.T.S., Villela, J.M., Martorano, L.G., Crestana, S., 2018C. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *R, Bras, Eng, Agríc, Ambiental.* 22, 344-348. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>
- Stickler, C.M., Coe, M.T, Costa, M.H., Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Dias, L.C.P., Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S. 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., Makeschin, F. 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *J. Hydrol,* 414, 413-424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.014>
- Theil, H. 1966, *Applied Economic Forecasting*, Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 474.
- Willmott, C.J., Ckleson, S.G., Davis, R.E. 1985. Statistics for evaluation and comparisons of models. *J. Geoph. Research.* 90, 8995-9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
- Yuksel, I. 2010. As a renewable energy hydropower for sustainable development in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 14, 3213-3219. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.056>
- Zhang, D., Yao, H., James, A., Lin, Q., Fu, W. 2020. Modifying SWAT-CS for simulating chloride dynamics in a Boreal Shield headwater catchment in south-central Ontario, Canada. *Science of The Total Environment.* 717, 137213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137213>

*CAPÍTULO 3***CENÁRIOS DE MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SEUS EFEITOS
NA ENERGIA HIDRELÉTRICA NA AMAZÔNIA**

(Artigo no formato da revista: Science of The Total Environment – ISSN: 0048-9697)

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140981>

RESUMO: Mudanças aceleradas no uso da terra nas regiões da Amazônia brasileira e do Cerrado nas últimas quatro décadas têm levantado questionamentos sobre as possíveis consequências para a hidrologia regional. A área de estudo é a Bacia do Rio Tocantins-Araguaia (BHTA), com foco na Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT), a jusante da BHTA. Neste estudo, avaliamos quatro cenários de mudança de uso e cobertura da terra para a BHTA em que as áreas florestais foram substituídas por pastagens, depois por agricultura, depois por vegetação de reflorestamento e, finalmente, por floresta regenerada para investigar os impactos nos componentes hidrológicos da bacia e o potencial hidrelétrico da UHT de acordo com esses cenários. Para esta avaliação, foi utilizado o modelo SWAT para simular a vazão de cada cenário, assim foi possível prever o potencial hidrelétrico no BHTA sob diferentes perspectivas ambientais. Estatísticas não paramétricas foram utilizadas para identificar a eficiência das turbinas na conversão da vazão em energia ao nível de significância de 5%. Houve redução na taxa de evapotranspiração anual e incrementos no escoamento superficial e vazão, mas apesar do aumento da vazão, não houve aumento na energia produzida na UHT devido à incapacidade das turbinas de converter o excesso de água em energia, com perdas na produção de energia de até 30% ao mês e 65% no balanço anual.

PALAVRAS-CHAVE: Mudança de uso da terra – água – energia; Implicações ambientais; Eficiência energética.

3.1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos e a produção de energia elétrica para economia são as principais preocupações para o futuro em países extremamente dependentes de seus recursos hídricos, como o Brasil. E, portanto, muito suscetível a mudanças no regime hidrológico, devido à variabilidade climática e a dinâmica de uso e cobertura da terra. O país depende de seus recursos hídricos para gerar energia elétrica, onde quase 71% de toda a energia elétrica é produzida por usinas hidrelétricas (EPE, 2018, Oliveira et al., 2017).

No cenário mundial, a energia hidrelétrica é uma das fontes renováveis de eletricidade mais utilizadas, representando mais de 16% da produção mundial de eletricidade e mais de 65% da capacidade global de produção de energia (Balkhair e Rahman, 2017). A geração de eletricidade a partir da energia hidrelétrica e outras energias renováveis, contribui substancialmente para atender as crescentes demandas mundiais de eletricidade no mundo, e auxilia no fornecimento de energia sustentável para a fração economicamente desfavorecida da sociedade, combate a escassez de energia e fornecer energia limpa na perspectiva do protocolo de Kyoto para a descarbonização global (Mohammed et al., 2013).

Nesse sentido, a Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) é uma bacia tropical de grande porte e encontra-se na transição entre dois biomas brasileiros (Bressiani et al., 2015^a), a Amazônia e o Cerrado, tendo todo o seu território dentro do Brasil. Essa bacia contém a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT), uma grande usina de uso múltiplo com barragem por gravidade, que regula a geração de energia por meio de turbinas do tipo Francis (EPE, 2018), e se encontra em uma bacia com alta dinâmica no uso e cobertura da terra.

Mudanças de uso e cobertura da terra (LULCC) resultaram em um interesse significativo em estudos ambientais, especialmente em relação à maior floresta tropical do mundo (Malhi et al., 2008; Lewis et al., 2015; Trumbore et al., 2015). Nas últimas quatro décadas, a Amazônia passou por grande fragmentação de sua flora, o que trouxe impactos ambientais e socioeconômicos (Soares-Filho et al., 2006; Soares-Filho et al., 2014; Nepstad et al., 2014; Martini et al., 2015). Outras florestas tropicais e extratropicais também estão ameaçadas pelo LULCC (Trumbore et al., 2015). Nas florestas da costa sudoeste de Bangladesh, o agronegócio avançou entre 1980 e 2016 (Akber et al., 2018). Grandes avanços agrícolas foram observados na Etiópia, na qual a cobertura florestal diminuiu 83% entre 1973 e 2014 (Tolessa et al., 2017). A expansão agrícola em Java Ocidental, na Indonésia, é outro exemplo (Bahri, 2020).

As variações de uso da terra, hidrologia e energia hidrelétrica estão diretamente ligadas. Mudanças no uso da terra têm sido consideradas um dos fatores mais importantes que afetam o balanço da água em bacias hidrográficas (Silva et al., 2018). É evidente para a

comunidade científica mundial que mudanças no uso da terra podem alterar o balanço hídrico, causando impactos positivos e negativos na sociedade. Esses impactos já foram observados na Europa (De Roo et al., 2001; Guse et al., 2015), leste da Amazônia (Sampaio et al., 2017), Eslováquia (Cebecauer e Hofierka, 2008), sul da Amazônia (Castello et al., 2013; Dos Santos et al., 2018), África (Op de Hipt et al., 2019), Indonésia (Bahri, 2020), China (Wang et al., 2020) e em florestas tropicais (Bruijnzeel, 1990; Dosskey et al., 2010; Avitabile et al., 2012).

Consequências do aumento da área de um determinado tipo de uso da terra em uma bacia são diversas, como a degradação do solo, especialmente devido à remoção da camada superior do solo (Cebecauer e Hofierka, 2008); contaminação e assoreamento de corpos d'água, que ficaram desprotegidos pela remoção da mata ciliar (Dosskey et al., 2010); balanço de energia, emissões de gases de efeito estufa, consequentemente mudanças na temperatura atmosférica (Avitabile et al., 2016) e alterações no balanço de água (Sampaio et al., 2017; Wang et al., 2020; Bahri, 2020).

Nesta conjectura atual, os modelos hidrológicos tornam-se poderosos instrumentos de monitoramento e prognóstico e evoluíram muito ao longo dos anos (Crawford e Linsley, 1966; Metcalf, 1971; Beven e Kirkby, 1979; Arnold et al., 1998; Migliaccio e Srivastava, 2007; Pandey et al., 2016). Por exemplo, o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) já vem sendo amplamente utilizado para a gestão de recursos hídricos em diferentes bacias do mundo (Gassman et al., 2014; Abbaspour et al., 2015; Bressiani et al., 2015b; Krysanova e White, 2015; Bressiani et al., 2015^a; Tan et al., 2019; Pereira et al., 2016; Silva et al., 2018^a, Silva et al., 2018^b; Wang et al., 2019). O SWAT tem sido utilizado para modelar o potencial energético de bacias hidrográficas, conforme descrito por Kusre et al., (2010), Pandey et al., (2015), Kumar e Sharma (2016), Balkhair e Rahman (2017) e Abera et al. (2018). Outros modelos dinâmicos também são utilizados para esse fim, estudos são feitos por Stickler et al., (2013); Mendes et al., (2017), Queiroz et al., (2019).

Sobre esses aspectos, os objetivos deste estudo seguem duas linhas: (1) realizar um diagnóstico eficaz da vazão de BHTA para geração de energia na UHT através do SWAT (2) avaliar os impactos de diferentes cenários plausíveis de uso e cobertura do solo na produção de energia hidrelétrica gerada no BHTA.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde a 9% do território brasileiro, A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia (BHTA) drena cerca de 764,000 km², a BHTA é formada principalmente pelo

rio Tocantins com cerca de 2,640 km de extensão e seu principal afluente, o rio Araguaia, com 1,670 km, abrangendo parte das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, (Fig. 1). Devido esta análise ser sobre a produção de energia na Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT), a bacia é limitada até o município de Itupiranga no Estado do Pará.

A BHTA se encontra na transição entre dois biomas brasileiros, a Amazônia com 6.9 milhões km² que envolve nove países da América do Sul, em que, somente a parte brasileira da Amazônia é de 4.196.943 km², equivalente a mais 40% do território nacional e o Cerrado com 2.036.448 km² de extensão e corresponde a 24% do território brasileiro. Esses dois biomas passaram por diversas transformações em relação ao uso e cobertura da terra, principalmente nos últimos 20 anos com a expansão agrícola. No que se trata do Cerrado, só no ano de 2018, 6.657 km² haviam sido desmatados do bioma e na Amazônia os números são ainda maiores, com 7.900 km² de floresta desmatada (PRODES, 2019).

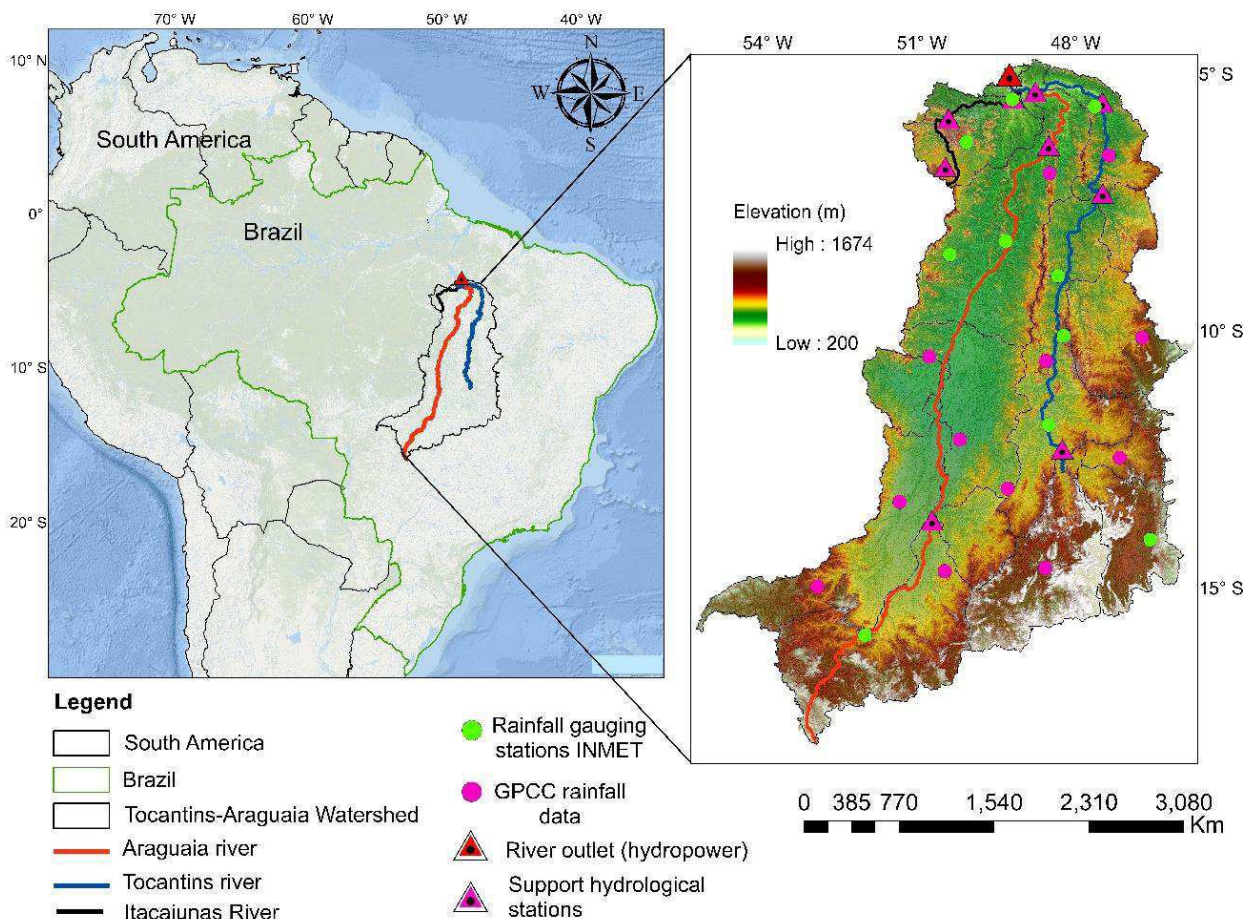


Fig. 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia.

O clima da BHTA é continental tropical, com temperaturas médias anuais variando de 26,4 °C a 22,5 °C. A precipitação anual acumulada na bacia é de 2000 mm (Falck et al., 2015; de

Oliveira Serrão et al., 2021). Tal variabilidade climática é explicada pelos sistemas meteorológicos de diversas escalas que atuam na bacia (Falck et al., 2015), como sistemas convectivos de mesoescala (SCM), sistemas frontais (SF), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que é o principal sistema precipitante da bacia, e auxilia na recarga hídrica na montante da BHTA, e ainda a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), este não precipita diretamente na BHTA, mas ajuda na organizar e transportar umidade e calor na região da bacia, intensificando a ZCAS (Kodama, 1992; Reboita et al., 2010; Rosa et al., 2020).

3.2.2. Banco de dados de entrada do SWAT

Neste estudo, o SWAT foi usado através da interface ArcSWAT, uma interface gráfica de usuário baseada no sistema de informações geográficas (GIS), utilizada para facilitar o delineamento de bacias hidrográficas e a entrada dos dados no modelo. O modelo SWAT requer o modelo digital de elevação (DEM), informação de uso e cobertura da terra, tipologia dos solos e dados climáticos. Detalhes dos dados necessários para simular os processos hidrológicas na bacia do estudo, e suas fontes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Banco de dados utilizados no estudo

Input data	Formato	Resolução	Fonte
MDE	Raster	30 m	USGS
Uso da terra	Raster	30 m	MapBiomias
Tipos de solo	Shapefile	1:5.000,000	EMBRAPA
Dados Climáticos	Tabular	0.25 °	CFSR/GPCC/INMET
Dados Hidrológicos	Tabular	Dados de estação	ANA

USGS: United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>); MapBiomias: Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (<http://mapbiomas.org/>); EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (<https://www.embrapa.br/solos>); CFSR: Climate Forecast System Reanalises (<https://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>); GPCC: Global Precipitation Climatology Centre (<http://gpcc.dwd.de/>); INMET: Instituto Nacional de Meteorologia (<http://www.inmet.gov.br/portal/>); ANA: Agência Nacional das águas (<https://www.ana.gov.br/>). Outras fontes de dados para modelagem SWAT são descritas por Bressiani et al. (2015).

Nesse estudo utilizou-se o uso e cobertura da terra referente ao ano de 2017, sendo pastagem (48%) e floresta (40,6%) são os usos da terra predominantes na BHTA (Fig. 2B), seguidos de áreas agrícolas (8,8%) e áreas úmidas (1,3%). O SWAT necessita das as informações das propriedades físicas e químicas (Tabela A1 do anexo B) do solo e foi encontrado os seguintes solos para a BHTA, Cambissolo (CAM), Latossolo vermelho-amarelo (CLVA), Neossolo flúvico (CNF), Plintossolo (FFC), Gleissolo (Gxdb), Luvissolo (LUV) e Argissolo (PVAd). Os tipos

CLVA, CNF e FFC são os solos dominantes na BHTA com 26,4 %, 22,2 % e 21,3% respectivamente da área

Três fontes de dados climatológicos, as bases (Climate Forecast System Reanalysis, Instituto Nacional de Meteorologia, Global Precipitation Climatology Centre) CFSR, INMET e GPCC, respectivamente, foram usadas para uma representação espacial e temporal da BHTA no gerador climático (WXGEN). Os dados de CFSR e GPCC foram previamente validados com dados de estações do INMET por Serrão et al., (2019^a), Serrão et al., (2019b); Silva et al., (2015); Silva et al., (2018^a); Silva et al., (2018b) e Silva et al., (2016). Foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas: velocidade do vento (w), radiação solar (S_r), umidade relativa (rh), temperatura (t) e temperatura do ponto de orvalho ($dewp$). Foram adquiridos no CFSR, de 1979 a 2014, juntamente com dez estações meteorológicas do INMET, de 1969 a 2017. Além desses dados, também foram utilizados dados diários de precipitação. Por fim, extraímos 12 pontos aleatórios de precipitação diária, dos dados do GPCC, de 1969 a 2017 para complementar os dados de precipitação do INMET, totalizando 22 estações de precipitação na área da bacia.

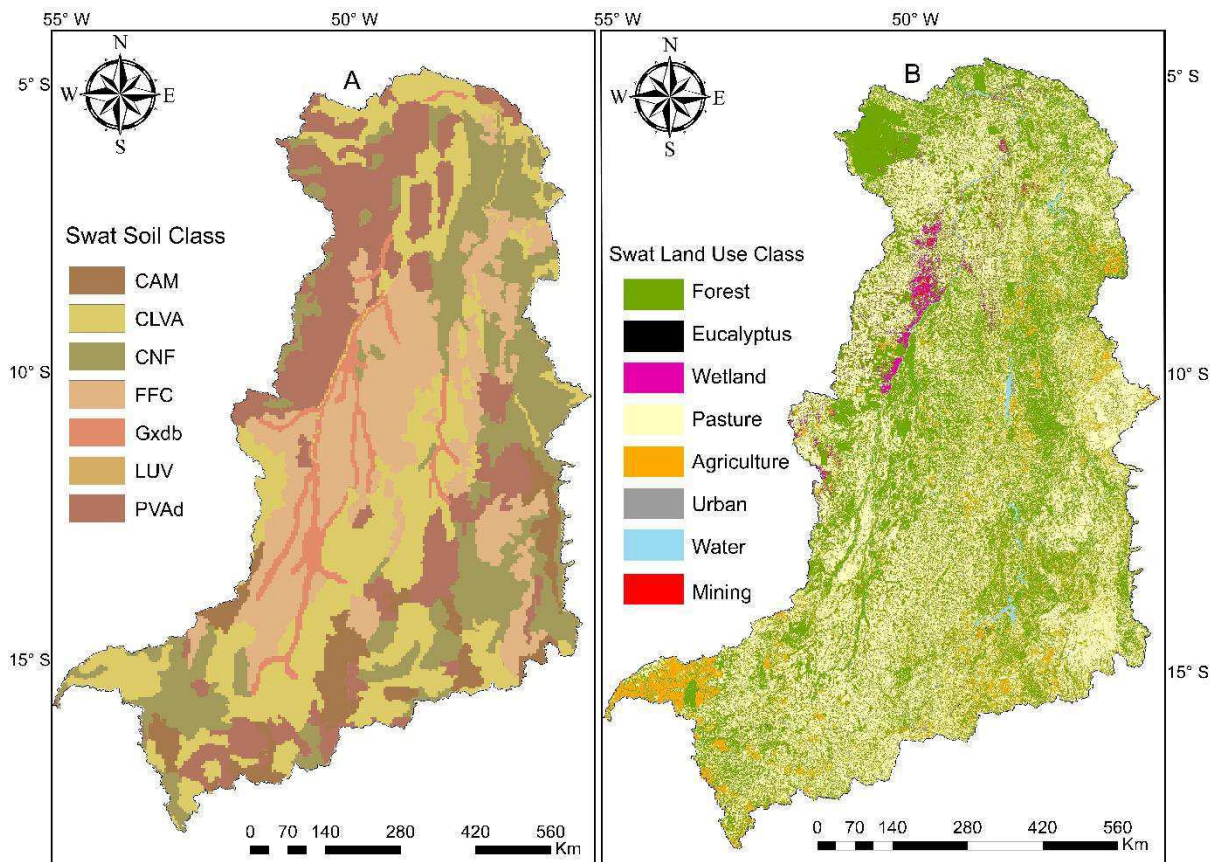


Fig. 2. Classe do Solo (A); Uso e cobertura da terra atual (B) para a BHTA.

No aquecimento do modelo (warm-up) foram utilizados dados hidroclimatológicos de 1969 a 1979; de 1979 a 1995 para execução do SWAT; de 1995 a 2000 para sua calibração e, por fim, de 2000 a 2017 para sua validação de acordo com capítulo anterior.

Os dados de vazão foram obtidos na estação de Itupiranga, a montante da usina hidrelétrica de Tucuruí, referentes à série histórica da ANA, com 48 anos de dados de 1969 a 2017. Para calibrar o modelo com maior eficiência e precisão devido ao tamanho da bacia, mais 6 estações hidrológicas a montante da hidrelétrica nos rios Tocantins e Araguaia (Fig. 1) e mais 3 estações na sub-bacia principal, rio Itacaiúnas (sub-bacia 3), foram usadas no processo de iterativo do SUFI-2 no SWAT-CUP.

3.2.3. O modelo SWAT

O SWAT é um modelo matemático e contínuo, semidistribuído, determinístico e com base física. Ou seja, é um modelo que por meios de equações matemáticas simula os processos físicos e suas variações no espaço e no tempo para uma determinada área de estudo (Arnold et al., 2012). E foi projetado para simular fisicamente os processos de vazão, escoamento superficial, percolação e infiltração, recarga de aquíferos rasos e profundos, bem como transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (Arnold et al., 1998). No presente estudo, focamos no escoamento superficial (Q_{sur}), Evapotranspiração (ET) e Vazão (Q). O ciclo hidrológico no modelo SWAT e determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Eq. 1, também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que: SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm); t é o tempo (dias); P é a precipitação pluvial (mm); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm); ET é a evapotranspiração (mm); W_a é a percolação (mm) e Q_{sub} é o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

O SWAT é um modelo de larga-escala que através do MDE divide a bacia hidrográfica em sub-bacias conectadas por uma rede de drenagem e cada sub-bacia é ainda subdividida em unidades de resposta hidrológica (HRUs) que consistem de uma combinação única de cobertura da terra, declive e tipo de solo, assim o balanço hídrico é calculado para cada HRU, o saldo de todas as

HRUs da bacia compõem o balanço de água da mesma (Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 2010; Oliveira et al., 2018).

3.2.4. Cenários de Uso e cobertura da terra

A gestão sustentável da superfície terrestre, incluindo a dinâmica do LULCC, continua a ser um desafio ambiental crítico que a sociedade deve enfrentar (Mustard et al., 2004). Os impactos do LULCC na vazão da BHTA e, conseqüentemente, na produção de energia hidrelétrica, foram avaliados através da realização de simulações hidrológicas usando quatro cenários de cobertura da terra. Para tanto, utilizou-se a Land Use Update Tool, desenvolvida por Pai e Saraswat (2009) e replicada por Dos Santos et al., (2018); Abe et al., (2018), Lamparter et al., (2018) e Oliveira et al., (2018) para atualizar dinamicamente o uso da terra de cada HRU durante os respectivos períodos de simulação. O Land-Use Update ajusta automaticamente as frações de HRUs, atualizando o uso atual para o novo uso com base no percentual fornecido pelo modelador.

Ou seja, a partir de um mapa de uso e cobertura da terra de um ano qualquer, é possível avançar ou retroceder na dinâmica temporal do uso da terra desta área. Esse procedimento pode ser feito por dois métodos: 1) atualização de 100% dos subconjuntos de HRUs de um tipo de uso para outro, por exemplo, troca abrupta de floresta por pastagem, e 2) alteração do subconjunto de HRUs ano a ano até o final da simulação. Este estudo aborda o primeiro método, as áreas de florestas na BHTA foram alteradas em C1 para pastagem e assim permaneceram até o final deste cenário (12 anos). Então essas áreas de pastagem (que antes eram florestas) se tornaram agricultura e assim sucessivamente até o final da simulação (conforme a Tabela 2). Para viabilizar esta metodologia sem o uso de dados climáticos futuros (as mudanças climáticas não fazem parte do escopo desta pesquisa, observe a subseção 5), foi utilizado o gerador climático (WXGEN) para as variáveis de longo prazo predefinidas no SWAT.

Estatísticas de longo prazo são inseridas no gerador climático para produzir dados meteorológicos diários. O gerador de clima é usado em duas instâncias: quando o usuário especifica que o clima simulado será usado, por exemplo, para simular cenários futuros ou quando faltam dados medidos (Arnold et al., 2012; Bressiani et al., 2015^a; Bressiani et al., 2015^b; Yin et al., 2017; Dos Santos et al., 2018; Abe et al., 2018; Oliveira et al., 2018). Para precipitação, o número de dias com chuva é determinado no gerador climático com base em um modelo de Cadeia de Markov de primeira ordem; distribuições assimétricas ou exponenciais são então usadas para estimar as quantidades de chuva (Sharpley e Williams, 1990; Schuol e Abbaspour, 2006; Arnold et al., 2012; Bressiani et al., 2015^b; Yin et al., 2017; Dos Santos et al., 2018; Abe et al., 2018;

Lamparter et al., 2018; Oliveira et al., 2018). Desta forma, para simular cenários futuros o WXGEN utiliza os dados climáticos inseridos pelo usuário no tempo presente e aplica a modelagem estocástica para simular o clima futuro. Porém, como a distribuição não tem base física em sua formulação, o clima futuro é uma repetição do clima presente, simulando a transformada de Fourier (Arnold et al., 1998; Arnold et al., 2012; Sharpley e Williams, 1990; Yin et al., 2017).

Nesse contexto, foi colocada a seguinte questão: quais os impactos do LULCC na vazão e potencial energético do BHTA? Os possíveis cenários LULCC estão descritos na Tabela 2. Esses cenários foram desenvolvidos com base nas projeções do relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2017; IPCC, 2019), que aborda a questão do crescimento populacional e conseqüentemente do aumento da demanda por alimentos, e com isso, a intensificação na dinâmica de uso da terra para agricultura e pecuária. Esses aspectos pressionam o setor agrícola mundial a conciliar o aumento da produção de alimentos, fibras e biocombustíveis. No Brasil, a combinação desses processos tende a concentrar ainda mais a produção de grãos em larga escala no bioma Cerrado, com potencial de expansão da fronteira agrícola para o norte do país no bioma Amazônia (IPEA, 2017; BNDES, 2018; EMBRAPA, 2018; CEPEA, 2019).

Tabela 2. Possíveis cenários de LULCC para a BHTA.

Cenário	LULCC	Período de simulação
C-1	Floresta para pasto	(12 anos)
C-2	Pasto para agricultura	(10 anos)
C-3	Agricultura para reflorestamento	(20 anos)
C-4	Reflorestamento para floresta regenerada	(40 anos)

As áreas florestais existentes em 2017 na bacia foram alteradas, em aproximadamente 40,6%, para diferentes LULC: substituição de floresta por pastagem e agricultura, regeneração de floresta por reflorestamento e, posteriormente, retorno ao uso atual da floresta. Os períodos de tempo utilizados foram baseados em Coe et al. (2009), que afirma que a transição da vegetação nativa para pastagem e agricultura leva em média 10 anos. Para a regeneração da floresta alterada, acredita-se que 150 anos seja o tempo mínimo para a recuperação da vegetação, mas existe a possibilidade de algumas espécies animais e vegetais não retornarem à mesma área ou serem extintas em alguns casos (Scanlon et al., 2007; Coe et al., 2009; Castello et al., 2013).

3.2.5. Calibração e Análise de desempenho do SWAT

Com base em estudos SWAT anteriores (Abbaspour et al., 2015; Serrão et al., 2019^a, Serrão et al., 2019b) e conhecimento sobre a região de estudo, selecionamos 22 parâmetros hidrológicos potencialmente relevantes para uma análise de sensibilidade dentro do SWAT - Software CUP 5.2.1.1, versão 2019 (SWAT-CUP. 2019. <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>). Aplicamos o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) (Abbaspour et al., 2015) dentro do SWAT-CUP, tendo como função objetivo o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS). Em seguida, realizamos uma análise de sensibilidade global com 4 interações de 700 execuções do modelo para extrair os parâmetros mais sensíveis. Detalhes da calibração do SWAT para a BHTA são encontradas em de Oliveira Serrão et al., (2021) e no capítulo anterior. Fig. 3 mostra o fluxograma das etapas de calibração entre ArcSWAT e SWAT-CUP.

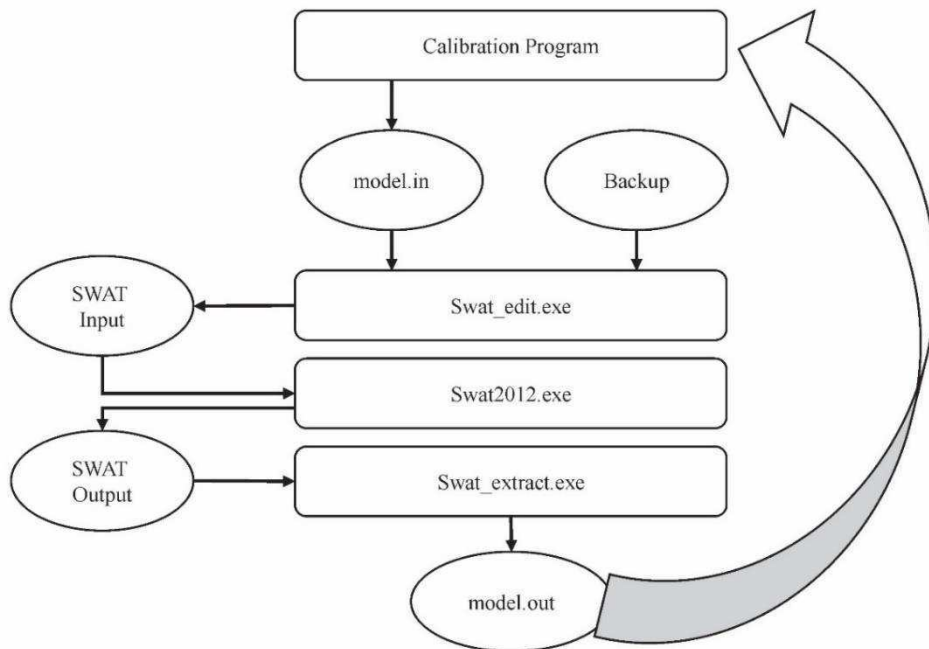


Fig. 3. Processo de calibração com SWAT-CUP usando ArcSWAT. Adaptado de Abbaspour et al. (2015) e Kumar e Sharma (2016).

Para a análise de desempenho do SWAT foi utilizado os indicadores estatísticos recomendados pelo International Precipitation Working Group (IPWG) e descritos por Liu et al., 2013; Abbaspour et al., 2015; Blainski et al., 2017; Silva et al., 2018. Descritos nas equações de 2 a 5.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (2)$$

$$IW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (3)$$

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2}} \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - O_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

Nestas equações, S_i é a vazão simulada pelo SWAT, O_i é a vazão observada e \bar{O}_i é o valor médio da vazão observada. Foram utilizados quatro índices estatísticos: o coeficiente de correlação de Pearson AO (Silva et al., 2018^a, Silva et al., 2018b), o coeficiente de determinação (R^2) (Bressiani et al., 2015b), o NS (Nash e Sutcliffe, 1970) e o índice de concordância baseado em Willmott et al. (1985) (IW). Na análise qualitativa dos dados, utilizou-se o coeficiente qualitativo (U) de acordo com Theil (1966) e o coeficiente de massa residual (CRM) (Blainski et al., 2017). O CRM mede a tendência média entre os valores simulados e medidos; CRM = 0 indica relação perfeita entre os dados, valores positivos indicam tendência de subestimação pelo modelo, enquanto valores negativos indicam superestimação da variável simulada. O NS pode variar de $-\infty$ a 1, valores próximos a 1 indicam um melhor desempenho do modelo. O desempenho do modelo é considerado satisfatório se $NE > 0,7$. IW varia de zero a um, sendo zero, nenhuma concordância e um, concordância perfeita, nesse estudo consideramos o IW satisfatório se $IC > 0,7$.

O coeficiente de U (Theil), compara os dados estimados com o observado. Assim quando $U > 1$, o modelo superestima o observado e quando $U < 1$, o modelo subestima o observado, logo quando $U \cong 0$, melhor será o resultado dos dados estimados em relação ao medido, o CRM mede a tendência média entre valores simulados e medidos. CRM=0 indica uma relação perfeita entre os dados, valores positivos indicam uma tendência de subestimativa do modelo, enquanto que valores negativos sinalizam para a superestimativa da variável simulada. Esses indicadores estatísticos são amplamente utilizados na literatura (Krause et al., 2005; Moriasi et al., 2007; Moriasi et al., 2015; Abbaspour et al., 2015; Blainski et al., 2017; Serrão et al., 2019^a, Serrão et al., 2019b).

3.2.6. Produção de Energia Elétrica a partir dos cenários de LULCC

Estudos sobre a viabilidade de novas hidrelétricas geralmente não levam em conta o efeito do desmatamento futuro sobre os empreendimentos ou assumem que o desmatamento terá um efeito positivo na vazão e geração de energia resultante da redução da evapotranspiração (ET) (Stickler et al., 2013). Esses estudos não levam em conta a incapacidade das usinas de converter toda a vazão em energia. Neste estudo, a produção de energia foi obtida para a Bacia do Tocantins-Araguaia na Amazônia oriental a partir da Eq 6. Baseada em Stickler et al., (2013); Mendes et al., (2017) e Queiroz et al., (2019).

$$E(Q) = \rho g \eta_p \int_0^{\Delta t} H_{(t)} \eta_t Q_{(t)} dt \quad (6)$$

Em que $E(Q)$ [MW] é o potencial de energia elétrica (mensal), $H_{(t)}$ [m] é a diferença entre as alturas dos níveis máximo a montante e mínimo a jusante da barragem (mensal), $Q_{(t)}$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] é o fluxo simulado (mensal), ρ [kg m^3] é a densidade da água, g [m s^{-2}] é a aceleração devido à gravidade, η_t é o coeficiente de eficiência da turbina Francis (0,86), e η_p é a eficiência da planta (0,92). Calculou-se o potencial energético de 1979 a 2017 (a partir da vazão simulada pelo SWAT) e, em seguida, obteve-se a relação com a produção atual de energia na usina, aplicando-se os indicadores estatísticos de desempenho (descritos na Seção 3.2.5). Assim, foi possível observar se houve um bom diagnóstico da energia gerada na UHT. Para cada cenário, calculou-se o potencial de geração de energia com base na vazão simulada de acordo com os impactos da mudança de uso da terra no regime hidrológico e conseqüentemente no potencial de energia elétrica na BHTA.

3.2.7. Análise de tendência, ponto de ruptura da série e eficiência da turbina através de estatísticas não paramétricas

A análise estatística deste estudo compreendeu duas etapas. A primeira etapa avaliou as tendências e pontos de ruptura das séries temporais de vazão, escoamento superficial e evapotranspiração para cada cenário LULCC na BHTA usando os testes de Mann-Kendall e Pettitt. A segunda etapa investigou as contribuições das variáveis dependentes e independentes da Eq. (6) ao potencial energético para conhecer a importância de cada elemento para a geração de energia. Essa metodologia é necessária porque Stickler et al., (2013) observaram que mesmo com o aumento da vazão em uma bacia geradora de energia, não é certo que seu potencial de produção de energia aumente, evidenciando a dependência da eficiência da turbina na conversão da vazão em energia. O mesmo foi observado por Basso e Botter (2012), Balkhair e Rahman (2017) e Jawahar e Michael (2017) ao analisarem o potencial de energia elétrica produzida pela turbina Francis, em bacias de micro e mesoescala com alta dinâmica no LULCC. Cabe ressaltar que a turbina Francis é a mesma utilizada na UHT.

As análises de eficiência para geração de eletricidade geralmente se concentram na rede de distribuição, após a geração da energia (Farsi e Filippini, 2004; Agüero, 2012; Inglesi-Lotz e Blignaut, 2014; Meher e Sahu, 2016). No entanto, há um interesse crescente na análise da eficiência energética de usinas hidrelétricas em todo o mundo. (Kleit e Terrell, 2001; Jamasb e Pollitt, 2001; Knittel, 2002; Stern, 2012; Çelen, 2013; Wang et al., 2014; Andolfatto et al., 2015; Chang et al., 2017; Kougiyas et al., 2019). Entre os vários estudos metodológicos para avaliar a

eficiência das centrais hidroelétricas, destacam-se quatro: Análise Envoltória de Dados (DEA) utilizada por Barros (2008) para analisar a eficiência hidroelétrica de Portugal.

Filippini e Hunt (2012); Mugisha, (2007) e Stern, (2012) utilizam o Stochastic Frontier Model para analisar eficiência energética e distribuição sob demanda. A Técnica de Ordem de Preferência por Semelhança à Solução Ideal (TOPSIS) foi aplicada por Afshar et al., (2011) e Çelen e Yalçın (2012) para a tomada de decisão em todo um sistema elétrico. Finalmente, a aplicação de testes não paramétricos para eficiência energética é cada vez mais utilizada em diferentes tipos de energia, tais como eficiência hidroelétrica na Amazônia ocidental por Stickler et al., (2013); no Irã, por Taki et al., (2011), com eficiência solar; eficiência energética não renovável do Canadá em carvão (Oskouei e Awuah-Offei, 2014); eficiência eólica e solar no Canadá e nos EUA, por Dhar et al., (2020); eficiência energética na Europa, por Borozan (2018); e eficiência energética na China, por Wang e Wang (2020).

Os testes não paramétricos para eficiência energética são similares ao DEA, onde os próprios componentes da produção de energia servem como parâmetro de eficiência mútua, testando cada elemento ou conjunto de elementos de geração de energia com a produção elétrica real/atual (Barros, 2008; Wang et al., 2014). Outros estudos na literatura fornecem informações densas sobre técnicas estatísticas não paramétricas para eficiência energética, como ANOVA (Worrall et al., 2002; Stickler et al., 2013; Queiroz et al, 2019); os testes Kruskal-Wallis, Kolmogorov-Smirnov e TFEE (Borozan, 2018; Wang e Wang, 2020; Li e Lin, 2018; Chang et al., 2018^a, Chang et al., 2018^b; e Antonietti e Fontini, 2019); e Mann-Whitney e DEA não-paramétrica (Wang et al., 2014; Kougiyas et al., 2019; Sala-Garrido e Molinos-Senante, 2020).

Como os dados usados na modelagem de energia hidrelétrica não seguem uma distribuição normal, usamos estatísticas não paramétricas para identificar os componentes mais sensíveis da geração de energia. Para isso, os elementos do Eq. (6) foram agrupados em quatro novos conjuntos para calcular a produção de energia (em função de cada elemento). Chamamos cada novo conjunto de equações de modelo 1, (M1), modelo 2 (M2), modelo 3 (M3) e modelo 4 (M4). Comparamos cada modelo com o potencial energético observado no UHT (Tabela 3). A comparação foi realizada utilizando os testes não paramétricos de Mann-Whitney, Kolmogorov-Smirnov (KS) e Kruskal-Wallis, com análise estatística nos programas de software R e Rstudio.

Tabela 3. Modelos e equações utilizados nos testes não paramétricos.

Modelos	Equações
OBS	$E(Q) = \rho g \eta_p \int_0^{\Delta t} H_{(t)} \eta_t Q_{(t)} dt$
M1	$E(Q) = \int_0^{\Delta t} H_{(t)} Q_{(t)}$
M2	$E(Q) = \int_0^{\Delta t} \eta_t Q_{(t)}$
M3	$E(Q) = \rho g \eta_p \int_0^{\Delta t} Q_{(t)}$
M4	$E(Q) = \int_0^{\Delta t} H_{(t)} \eta_t Q_{(t)}$

Há vários métodos estatísticos disponíveis para testar a estacionaridade das séries temporais em meteorologia e hidrologia, incluindo o teste não paramétrico Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Güçlü, 2018). Com o teste de homogeneidade de Pettitt, é possível detectar (se houver uma tendência na série) em que período (dia/mês/ano) da série houve uma quebra na tendência (Santos et al., 2016; Güçlü, 2018). A interpretação dos testes Mann-Kendall, Pettitt, Mann-Whitney, Kolmogorov-Smirnov e Kruskal-Wallis, aplicados com um nível de significância de 0,05, está descrita na Tabela 4.

Tabela 4. Apresentação dos testes não paramétricos e suas respectivas hipóteses.

Testes	Hipóteses	Decisão
Mann-Kendall	H ₀ : Não há tendência na série. A ₀ : Há tendência positiva ou negativa na série.	Se o p-valor for menor que $\alpha = 0,05$; (rejeitar H ₀)
Pettitt	H ₀ : Os dados são homogêneos. A ₀ : Há uma data em que houver uma mudança positiva ou negativa nos dados.	Se o p-valor for menor que $\alpha = 0,05$; (rejeitar H ₀)
Mann-Whitney	H ₀ : A diferença da posição entre as amostras é igual a 0. A ₀ : A diferença da posição entre as amostras é diferente de 0.	Se o p-valor for maior que $\alpha = 0,05$; (não rejeitar H ₀)
Kolmogorov-Smirnov	H ₀ : A distribuição das duas amostras é a mesma. A ₀ : As distribuições das duas amostras são diferentes.	Se o p-valor for maior que $\alpha = 0,05$; (não rejeitar H ₀)
Kruskal-Wallis	H ₀ : As amostras vêm de uma mesma população. A ₀ : As amostras não vêm de uma mesma população.	Se o p-valor for maior que $\alpha = 0,05$; (não rejeitar H ₀)

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Análise de sensibilidade, calibração de fluxo e validação do SWAT

Os parâmetros sensíveis deste estudo que influenciam na vazão e foram utilizados na calibração do modelo foram: número da Curva, condição de umidade II (CN2); condutividade hidráulica efetiva do canal principal (CH_K2); profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer revap (REVAPMN); atraso da água subterrânea (GW_DELAY); armazenamento máximo no dossel (CANMAX); fator de compensação de evaporação do solo (ESCO); nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência de fluxo de base (GWQMN); coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto (SURLANG); constante de recessão do fluxo de retorno (ALPHA_BF); valor do coeficiente de manning “n” para o canal principal (CH_N2). E são amplamente por (Abbaspour et al., 2015, Abbaspour et al., 2018, Silva et al., 2018, Desta e Lemma, 2017, Serrão et al., 2019). O SWAT foi previamente calibrado por de Oliveira Serrão et al., (2021), então é evidenciado que a calibração do modelo e o desempenho de validação foram considerados satisfatórios para a BHTA, sendo observado na Figura 4, o hidrograma da vazão observada e simulada pelo SWAT. Os processos de configuração, calibração, incerteza e validação de configuração do modelo são descritos com mais detalhes em Abbaspour et al., (2015); Hernandez (2018^a); Silva et al., (2018); Oliveira et al., (2018).

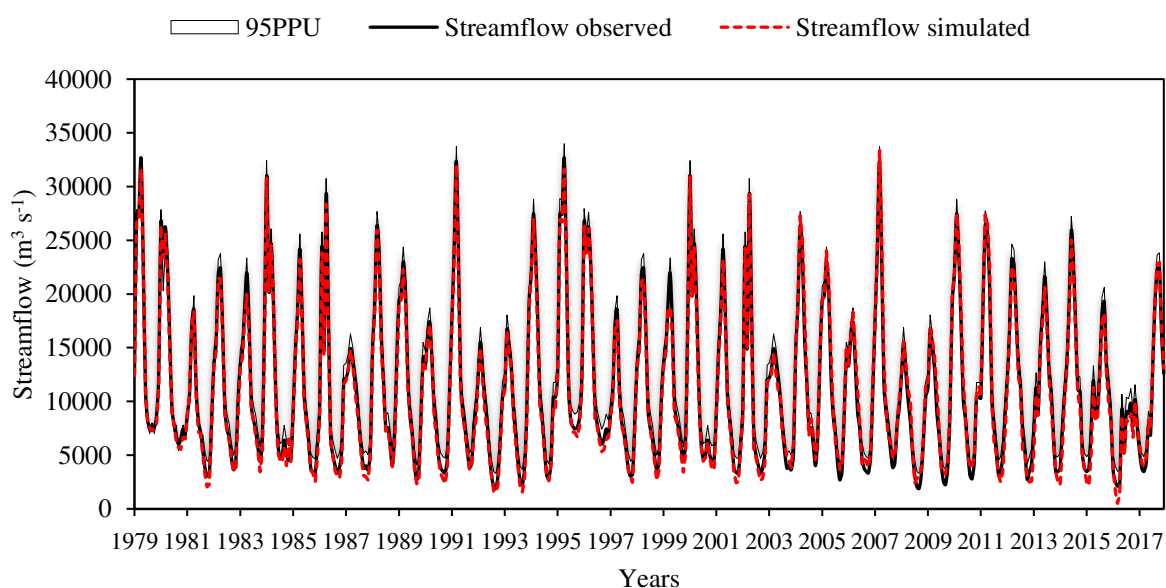


Fig. 4. Hidrograma da vazão anual observada e simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia.

Observamos que os coeficientes de correlação e determinação (ambos $>0,95$) confirmaram que as vazões preditas replicavam com precisão as vazões medidas, para a validação da vazão usando as equações descritas em 3.2.5. Para o coeficiente de Nash–Sutcliffe e índice de concordância de Willmott, a estimativa apresentou excelente desempenho, com $NS = 0,99$ e $IW = 0,99$. O coeficiente U de Theil teve um valor muito próximo de zero (0,02), assim como o CRM (-0,02). Para os fatores P e R foram obtidos valores de 0,82 e 0,62, respectivamente. Observa-se ainda o a maioria dos valores simulados pelo SWAT estão dentro da faixa do 95PPU indicando uma boa calibração dentro da incerteza do modelo

Com a vazão mensal calibrada e validada, foi possível gerar a produção mensal de energia estimado e compará-lo com o observado (Fig. 5), utilizando os indicadores estatísticos de validação, bem como a sazonalidade da vazão e da produção de energia elétrica. Nesse sentido, é visível que durante o verão e parte do outono austral do Hemisfério Sul (SH) de dezembro a maio, a vazão e o potencial energético apresentam os maiores valores, enquanto os menores valores são observados no inverno e na primavera. Essa sazonalidade é explicada pela ação dos sistemas meteorológicos ZCAS, SF e SCM na bacia, pois esses sistemas são mais ativos no verão e outono devido à maior disponibilidade de energia e umidade (Kodama, 1992; Reboita et al., 2010; Falck et al., 2015; Serrão et al., 2016).

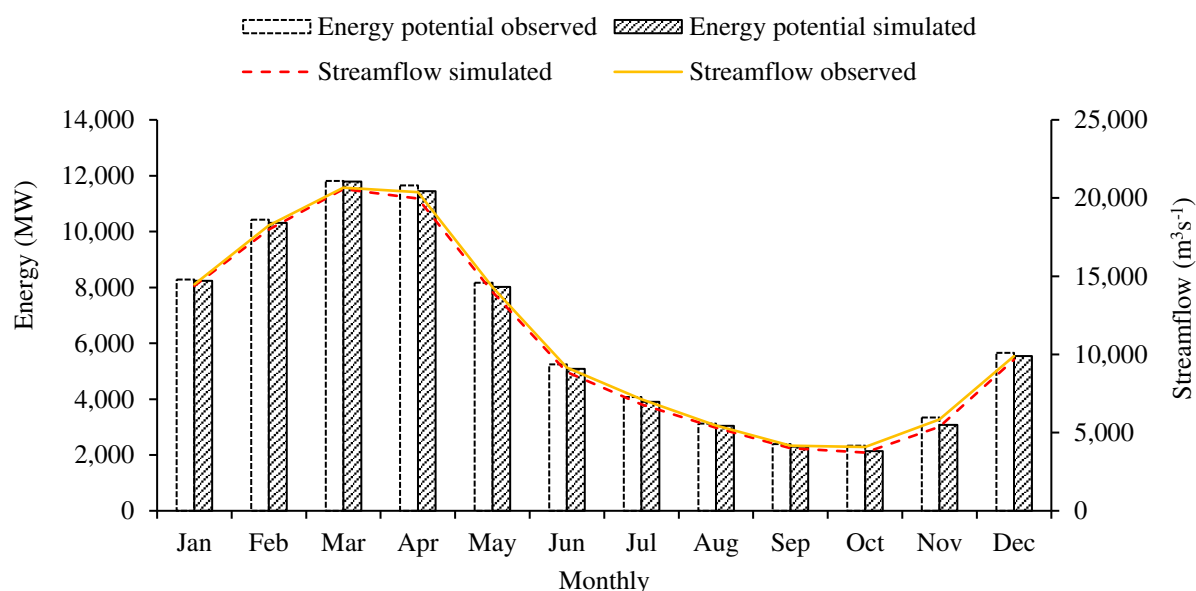


Fig. 5. Hidrograma de vazão mensal simulado pelo SWAT e potencial de energia elétrica para o BHTA.

Todos os indicadores estatísticos de desempenho do potencial energético simulado obtiveram valores $>0,95$. Os indicadores qualitativos apontaram para a existência de uma superestimação de 0,022 segundo o U de Theil e -0,02 segundo o CRM. Autores como Kumar e Sharma (2016), Silva et al., (2018a); Silva et al., (2018b); Dos Santos et al., (2018); Abe et al., (2018) concluíram que valores de NS e IW $>0,80$ são satisfatórios para considerar SWAT como validado para suas respectivas bacias de estudo. Portanto, inferimos que a vazão simulada com SWAT foi eficaz na simulação do potencial de energia elétrica na UHT. Por fim, os cenários LULCC foram atualizados na Land Use Update Tool, com o modelo SWAT calibrado e validado para avaliar o impacto do LULCC na produção de energia.

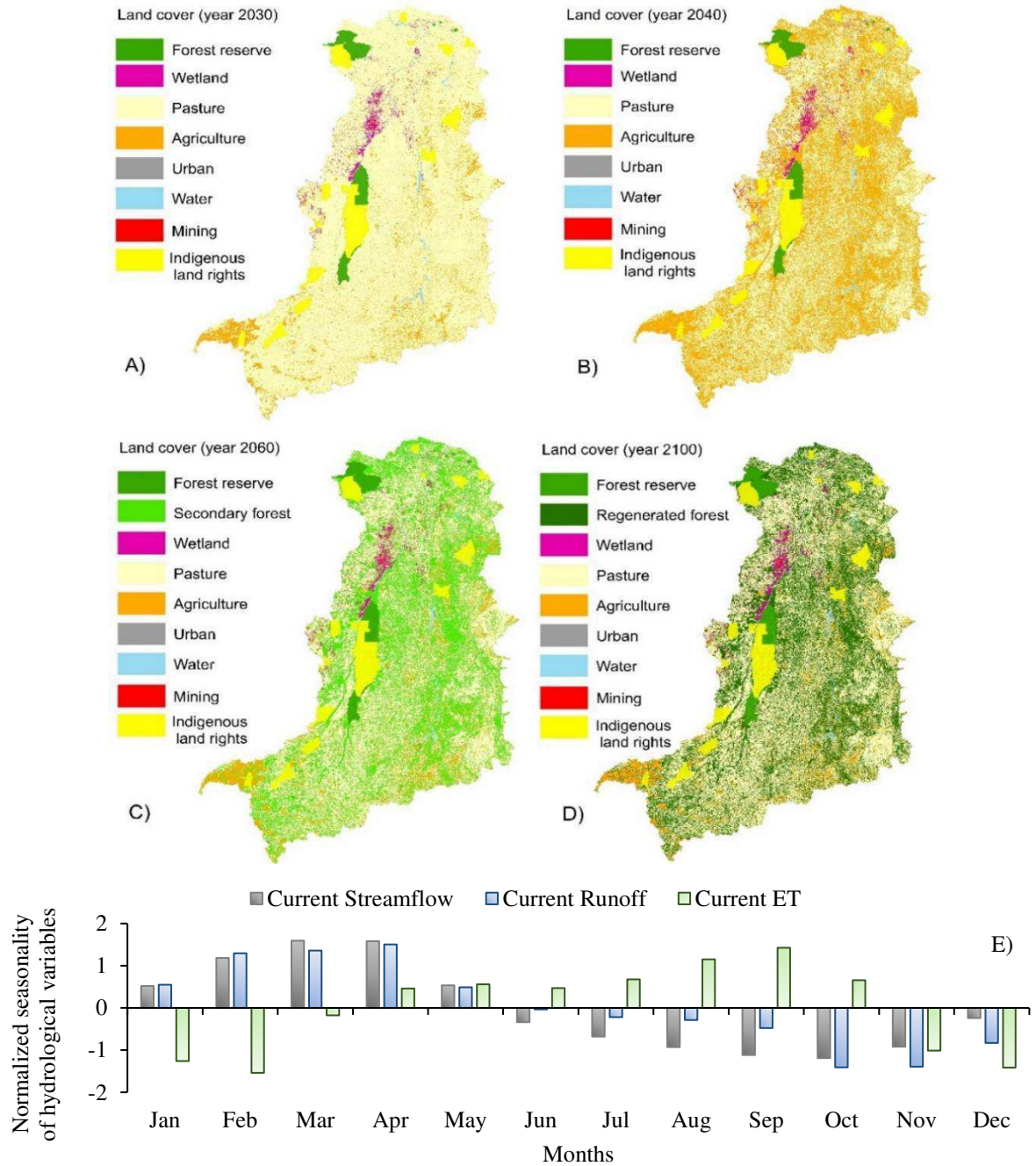
3.3.2 Avaliações dos cenários de LULCC nas variáveis hidrológicas

No contexto dos possíveis cenários futuros, consideramos aquele que contempla o consequente aumento da demanda por alimentos e, com isso, a intensificação da dinâmica de uso da terra pela agricultura e pecuária. Os cenários (C-1 a C-4) são observados na Fig. 6 A-D, evidenciando que apenas áreas de reservas protegidas por lei, biológicas, de preservação permanente e terras indígenas são mantidas sem alteração, conforme a legislação brasileira (Presidência da República, Casa Civil, 2012), e a soma dessas áreas de preservação é de aproximadamente 10% da BHTA. É importante destacar que as áreas florestais alteradas nos cenários correspondem a 40,6% da área total.

No entanto, há alguma incerteza sobre as áreas de preservação, devido ao cenário político brasileiro definido pelas eleições presidenciais de 2018, que teve grandes impactos na política ambiental do país, como o aumento do número de incêndios florestais, atividades de desmatamento, redução das exigências de licenciamento e rebaixamento de áreas protegidas existentes e desregulamentação de terras indígenas são resultados da política atual do governo (Nature Editorial, 2018a; Nature Editorial, 2018b; Escobar, 2019; Andrade, 2019; Tollefson, 2019).

Observando as variáveis hidrológicas (Fig. 6E), é possível notar a variabilidade sazonal; durante o verão e outono na região, as variáveis de vazão e escoamento são maiores (conforme mencionado anteriormente na Seção 3.3.1) e a ET é menor e o inverso ocorre durante o inverno e a primavera. Essa variação da ET ocorre justamente pela disponibilidade de energia no equilíbrio entre a superfície e a atmosfera (Reboita et al., 2010). A Fig. 6F exibe a diferença percentual das variáveis hidrológicas para cada cenário em relação ao LULC atual, e evidencia um aumento gradual na vazão e escoamento, e uma diminuição na ET. Em termos absolutos, a vazão é maior que o escoamento superficial, exceto no primeiro cenário (Fig. 6F) e fevereiro (Fig. 6E).

Resultados semelhantes foram encontrados por Soares-Filho et al. (2006), Coe et al. (2009), Hunke et al. (2015), Nepstad et al. (2014), Lamparter et al. (2018) e Op de Hipt et al. (2019), ao investigar os impactos do LULCC no equilíbrio hidrológico da Amazônia, Cerrado e África Ocidental.



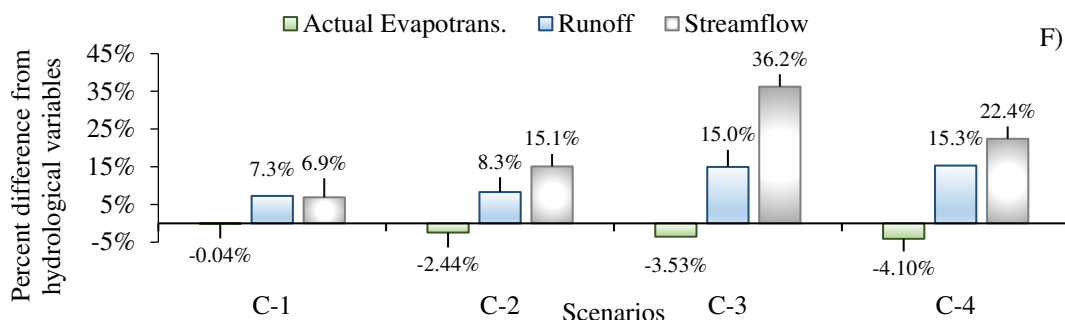


Fig. 6. Cenários LULCC [(A) pastagem, (B) agricultura, (C) reflorestamento e (D) floresta] e os impactos nas variáveis hidrológicas [(E) e (F)] para o BHTA.

3.3.3. Prognostico do potencial energético hidrelétrico com base nos cenários LULCC

Na Fig. 7A observamos a simulação do potencial de energia através da vazão SWAT, e indica que a variabilidade da produção de energia (conforme indicado pelo intervalo interquartil) dos quatro cenários simulados é menor que a real, o que sugere que o LULCC reduz a variabilidade anual da produção de energia. Como resultado dessas mudanças, a produção de energia terá um aumento médio anual de 223 MW desde a primeira metade do século até C-3 (Fig. 7^a). No entanto, se analisarmos cenário a cenário, há uma redução na produção máxima de energia em C-1, C-2 e C-4. Em relação à produção de energia sazonal (Fig. 7B), observamos que a produção real (distribuição azul) é claramente superior à dos outros cenários no outono e no verão. No entanto, no verão podemos ver uma curva bem distribuída com valores altos. Ambas as estações (outono e verão) apresentam produção de energia superior a 12.000 MW. Em contraste, nas estações de inverno e primavera, a produção real de energia é menor do que a dos cenários simulados, especialmente em C-3 (distribuição verde).

Esse aumento na produção de energia durante o inverno e a primavera dos cenários simulados foi descrito por autores como Stickler et al., (2013); Obahoundje et al., (2017); Dorber et al., (2018) e Xia et al., (2019), que observaram um aumento na produção de energia durante a estação seca, (em suas respectivas áreas de estudo), devido ao aumento da vazão total (decorrente dos impactos do LULCC na vazão), fator este, juntamente com as questões estruturais da barragem (detalhamos mais na discussão), permitiu esse aumento na produção de energia apresentado na Fig. 7 B.

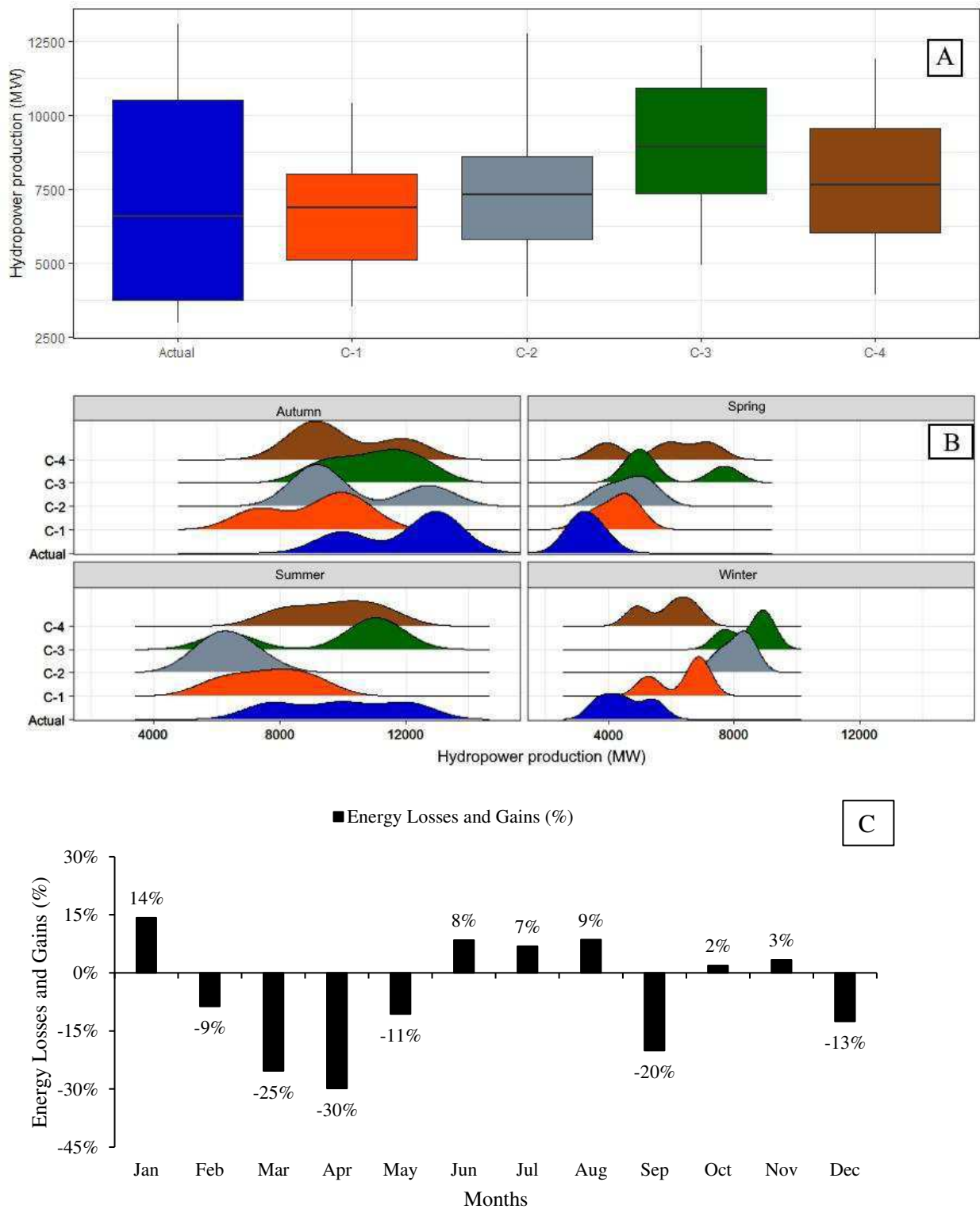


Fig. 7. Impactos do cenário (A); impactos sazonais (B); balanço de perdas e ganhos (C) projetados a partir das mudanças no uso e cobertura da terra na produção de energia hidrelétrica na BHTA.

A Fig. 8 C representa as perdas ou ganhos entre a produção de energia atual e a produção de energia ao final do cenário C-4, ou seja, ao longo de todo o período de simulação. Ao analisar

a produção hidrelétrica mensal nos primeiros seis meses do ano (verão e outono), apenas em janeiro e junho, houve incrementos na produção de energia de 14% e 8%, respectivamente. Nos demais meses da temporada, há redução na produção de energia, principalmente em abril (no outono), com perda de 30% na produção hidrelétrica (em todos os cenários). No entanto, durante o inverno e a primavera há um aumento na produção de energia (em todos os cenários), em relação à produção atual, de 24% no inverno e 5% na primavera.

3.3.4. Redução do potencial hidrelétrico e limitações estruturais da UHT

De acordo com os modelos e equações utilizados nos testes não paramétricos da Tabela 3, avaliamos a importância da eficiência da turbina para o potencial hidrelétrico, com base nos testes estatísticos da Tabela 4, que é observado na Fig. 8. De acordo com o teste de Mann-Whitney, o p valor para cada modelo em relação ao resultado observado foi $<0,0001$ para M1 a M3 e 0.4066 para M4; portanto, assumimos a hipótese alternativa (A_0) para M1 a M3, e para M4, assumimos a hipótese nula H_0 (a diferença na posição entre as amostras é igual a 0), o que significa que não há diferença entre as posições da mediana entre as amostras, mostrando que a distribuição do M4 está próxima da distribuição da energia potencial observada.

Para os testes de Kruskal-Wallis e KS em relação a M1, M2, M3 e a energia observada, os valores de p foram $<0,0001$, então as hipóteses alternativas (A_0) foram assumidas para ambos os testes, em que as amostras não vêm da mesma população e as distribuições das duas amostras são diferentes (Fig. 8). Com relação ao M4 e energia observados para os mesmos testes, assumimos a hipótese nula (H_0), em que o valor de p calculado é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$; portanto, a distribuição das duas amostras é a mesma para o teste (KS), e as amostras vêm da mesma população (Kruskal-Wallis). Isso fica claro na Fig. 8, onde apenas M4 segue a mesma frequência relativa acumulada de acordo com o teste KS.

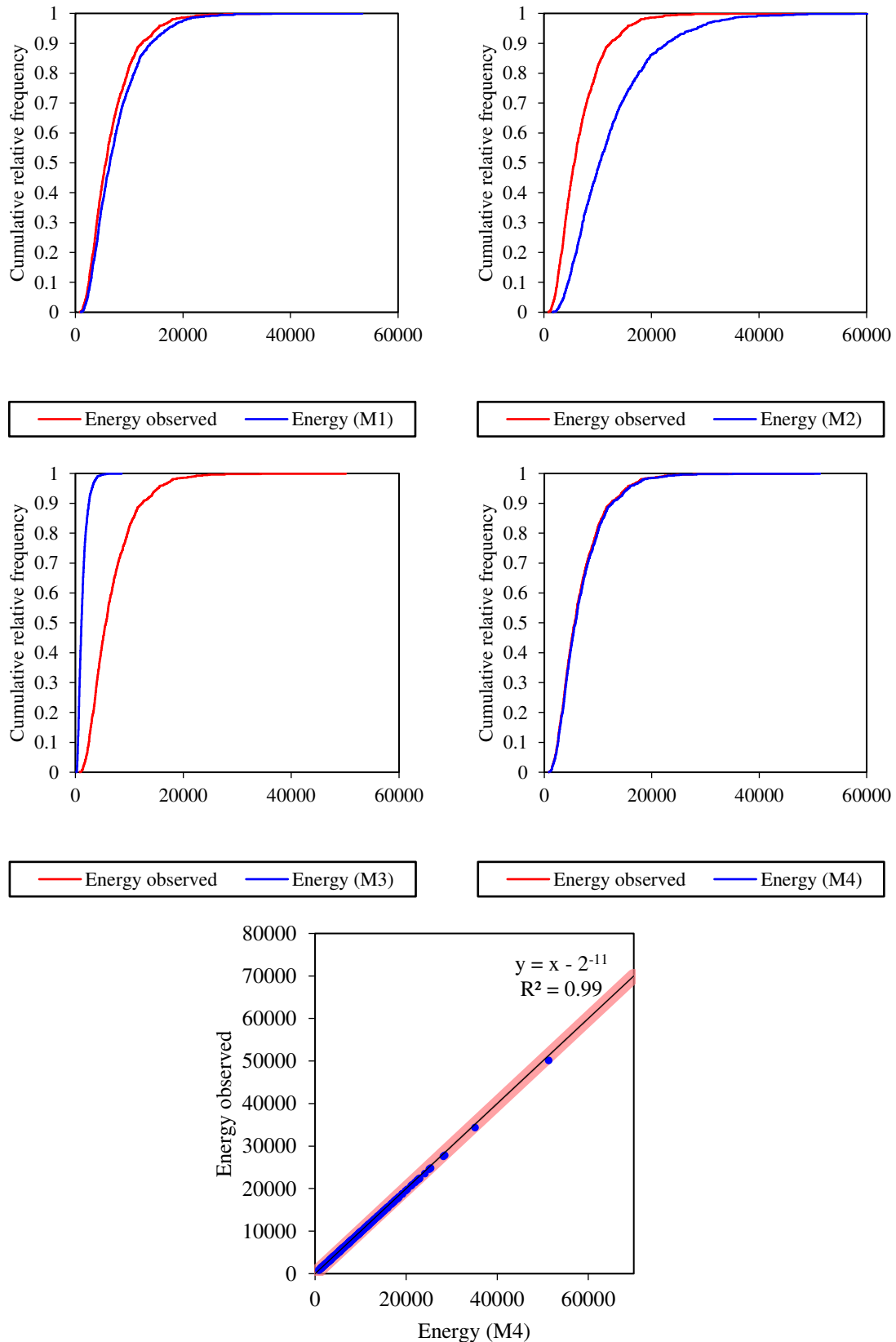


Fig. 8. Estatísticas não paramétricas da eficiência da turbina Francis na BHTA; A–D: distribuição das amostras de M1 a M4 e energia observada; E: Relação entre M4 e energia potencial observada.

3.4. DISCUSSÃO

3.4.1. Simulação SWAT (qualidade de previsão)

Notamos que o SWAT conseguiu descrever a vazão simulada ao longo da série temporal observada (Fig. 4), embora haja uma faixa de erro entre os valores mínimos de vazão, todos os indicadores estatísticos mostraram um bom ajuste entre a vazão real e a simulada pelo SWAT. De acordo com os resultados dos fatores P e R, o desempenho do modelo foi considerado excelente, apesar da maior incerteza (fator R). Ao utilizar o SWAT, alguns estudos revelam bons índices estatísticos associados a bacias com altas vazões. Silva et al., (2018b) utilizaram o modelo SWAT para estimar vazão, escoamento e transporte de sedimentos para uma pequena bacia no nordeste da Amazônia e observaram que os melhores resultados entre a vazão estimada e a observada foi na estação fluviométrica que apresentou a maior vazão (com NS 0,98).

Ainda no Brasil, Silva et al., (2018^a) modelaram a vazão e o transporte de sedimentos com o SWAT para a bacia do rio São Francisco, a terceira maior bacia do Brasil. Eles destacaram que o modelo SWAT estima a vazão de forma mais eficiente em bacias com altas vazões. Os autores indicaram excelentes índices estatísticos ($R = 0,97$, $NS = 0,93$ e $IW = 0,98$) para as estações com maior vazão. Na Europa, Abbaspour et al., (2015) utilizaram o modelo SWAT para simular o balanço hídrico do continente e observaram que os melhores ajustes (R, NS) foram também para rios com maior vazão. Portanto, é evidenciado que as descobertas deste manuscrito semelham-se a vários estudos ao redor do mundo.

3.4.2. Impactos dos cenários LULCC nas variáveis hidrológicas

No contexto dos cenários (Fig. 6) C-1 e C-2, que incluíram a remoção da floresta, houve um aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, com atraso, um aumento da vazão (6,9% e 15,1%, respectivamente), como observado em outras bacias hidrográficas por estudos anteriores (De Roo et al., 2001; Soares-Filho et al., 2006; Coe et al., 2009; Nepstad et al., 2014; Guse et al., 2015; Stickler et al., 2013; Op de Hipt et al., 2019; Wang et al., 2020). Devido a essa defasagem, o maior aumento da vazão ocorreu em C-3, >36%, reduzindo para 24% no C-4. O aumento na vazão e escoamento sob os efeitos do LULCC é discutido em Burkina Faso, África Ocidental por Op de Hipt et al., (2019); os autores observaram que em 20 anos de LULCC, houve um aumento de 20,3% na produção de água no país, devido à substituição de savana por áreas agrícolas. No Brasil, Dos Santos et al., (2018) observaram que um aumento >57% nas áreas de pastagem aumentou a vazão anual em ~6,5% e teve um impacto significativo na

evapotranspiração, escoamento superficial e percolação. Cebecauer e Hofierka (2008) observaram que o LULCC aumenta a vazão a longo prazo e, portanto, os efeitos erosivos na Eslováquia.

Mesmo que haja um atraso no tempo de resposta entre a mudança na dinâmica da cobertura de uso da terra e as variáveis hídricas, é visível que ao longo dos cenários que a ET diminui e o escoamento superficial aumenta, assim como a vazão. Quando os testes estatísticos de Mann-Kendall e Pettitt foram aplicados a essas variáveis, a tomada de decisão dos testes foi a favor de H_a . Mann-Kendall indicou que há uma tendência positiva para escoamento e vazão e uma tendência negativa na série ET, enquanto o teste de Pettitt indicou que há uma ruptura positiva no escoamento em C-1, uma ruptura negativa em ET no final C-1, e somente em C-2 ocorre uma ruptura positiva na vazão. Esse atraso na mudança das médias das variáveis estudadas ocorre porque os sistemas ambientais tendem a balancear suas variáveis gradativamente, além disso é necessário levar em conta a extensão da bacia. Esse atraso de mudança nas médias em cenários LULCC já foi observado por (Perazzoli et al., 2013; Stickler et al., 2013; Hunke et al., 2015; Nepstad et al., 2014; Lamparter et al., 2018; Dos Santos et al., 2018; Abe et al., 2018; Op de Hipt et al., 2019).

Quando as florestas são removidas, a evapotranspiração real, a infiltração e o teor de água do solo são reduzidos, o que leva a um aumento do escoamento superficial, conseqüentemente aumentando a vazão máxima e o escoamento total. O aumento da vazão máxima em cenários de desmatamento também é relatado por Lamparter et al., (2018), ao avaliar os impactos do avanço da agricultura no Cerrado, e Dos Santos et al. (2018), ao observar as mudanças hidrológicas resultantes dos cenários BAU (business-as-usual tropical forest deforestation) na bacia do rio Iriri na Amazônia oriental. Os impactos causados pela mudança de uso da terra em termos hidrológicos afetam todo o ciclo hidrológico, e são fortemente observadas no escoamento superficial; vazão máxima, mínima e média; vazões de base; recarga subterrânea; umidade do solo; volume de perda de solo e transporte de sedimentos; (Perazzoli et al., 2013; Lamparter et al., 2018). E ainda há registros de alteração no regime pluviométrico, devido a mudança no balanço de energia (DeFries et al., 2008; te Wierik et al., 2020; te Wierik et al., 2021).

Nesse contexto, Silva et al., (2018a) avaliaram cenários de uso do solo para o Submédio São Francisco e observaram que há um aumento no escoamento superficial e na produção de sedimentos quando a vegetação é substituída por solo nu. Para a região amazônica, Silva et al., (2018b) analisaram a expansão do dendê na sub-bacia de Mariquita, no nordeste do Pará, e observaram que houve um aumento na produção de sedimentos entre 2008 e 2013, o que pode ser atribuído à grande redução das áreas de vegetação secundária, que substituído pelo cultivo de pastagens, dendê e agricultura em geral.

3.4.3. Impactos dos cenários LULCC na energia hidrelétrica da UHT

De acordo com os resultados apresentados na Fig. 7, no balanço anual, houve uma redução de 65% na energia gerada na UHT. Além disso, nos meses de maior precipitação (dezembro a maio) houve uma perda acumulada de 75% na produção de energia (Fig. 7C). Wen et al., (2018) avaliaram os efeitos do LULCC e das mudanças climáticas na bacia do rio Yuan na China e observaram um aumento de 2,8% na vazão da hidrelétrica de Jiasajiang no período de maior disponibilidade hídrica. Estudos semelhantes foram realizados ao redor do mundo, a exemplo da China (Wu et al., 2017); na bacia do rio Mekong, entre Camboja, República Democrática Popular do Laos (PDR) e Vietnã (Piman et al., 2013), Índia (Kusre et al., 2010; Pandey et al., 2015), África (Oyerinde et al., 2016; Obahoundje et al., 2017), Canadá (Haguma et al., 2014), Paquistão (Balkhair e Rahman, 2017) e Noruega (Dorber et al., 2018). Uma revisão sobre o assunto é apresentada em Fthenakis e Kim (2009).

É interessante notar que esta perda na produção ocorre nos meses de verão e outono austral de HS (Fig. 7B), nos quais o volume de precipitação é maior, portanto, a vazão entregue à usina hidrelétrica também é maior. Entretanto, o volume de água entregue à barragem, em uma média anual dos cenários propostos ($14.297 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), será maior que o volume corrente/normal da usina hidrelétrica ($11.292 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), de modo que o nível máximo que a barragem pode acomodar (74 m) será excedido em aproximadamente 4m (Figura-A4 e Figura-A5 do anexo B), desencadeando a abertura das comportas da usina hidrelétrica e, portanto, nenhuma geração de energia (em todos os cenários); resultados semelhantes foram encontrados por Wen et al., (2018) e Dorber et al., (2018) sob os efeitos negativos da LULCC sobre o nível de água nas barragens.

Em contrapartida, observamos todos os cenários, principalmente C-1, C-2 e C-3, nos meses de inverno e primavera em HS (julho a novembro), que apresentam menor volume pluviométrico, há aumento na produção de energia de até 9%, pois o aumento da vazão média mensal não ultrapassa o nível máximo que a barragem pode suportar. Nesse contexto, cenários (hipotéticos ou não) regionais de desmatamento podem alterar o balanço hidrológico o suficiente para restringir a geração de energia, e isso é mais proeminente em regiões onde a sazonalidade do ciclo hidrológico já é alta (Stickler et al., 2013; Soares-Filho et al., 2006; Obahoundje et al., 2017; Dos Santos et al., 2018; Op de Hipt et al., 2019).

3.4.4. Ineficiência de turbinas na produção de energia em UHT

Vários estudos como Soares-Filho et al. (2006); Stickler et al., (2013); Serrão et al., (2019^a); Serrão et al., (2019^b); Hernandes et al., (2018^a) e Pontes et al., (2019) observaram que o

LULCC altera o ciclo hidrológico e com o aumento da taxa de desmatamento, há um incremento positivo nas vazões média e máxima. No entanto, no que diz respeito às usinas hidrelétricas, esse aumento das vazões médias e máximas nem sempre é benéfico. Stickler et al., (2013), Basso e Botter (2012) e Jawahar e Michael (2017) já haviam observado que um aumento na vazão máxima poderia levar a uma redução na eficiência da turbina devido à diminuição da energia cinética convertida. Estas turbinas normalmente atingem seu potencial máximo ao alcançar $\eta = 0.8$, sendo a relação entre η e $\frac{\bar{Q}}{Q_{max}}$ em que, \bar{Q} é a vazão média do período e Q_{max} a vazão máxima do período, a curva de eficiência das turbinas (Figura 9), descrito por Breeze (2018). Portanto, um aumento na vazão devido à dinâmica do LULCC em uma bacia hidrelétrica não garante o aumento da produção de energia.

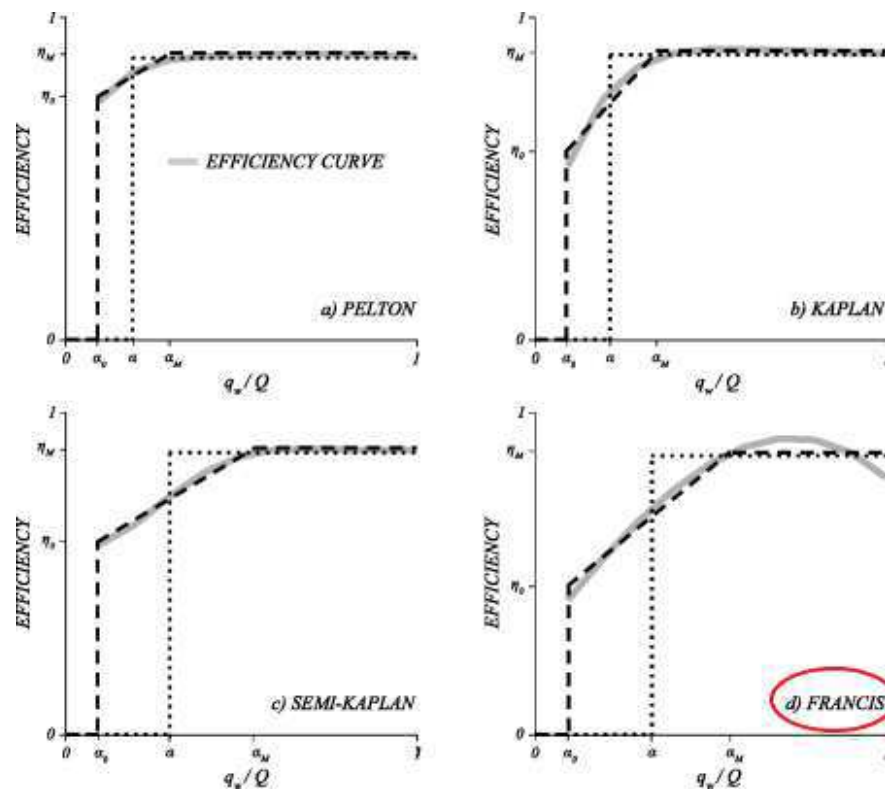


Fig. 9. Curvas de eficiência para diferentes tipos de turbinas (linhas cinzas sólidas), extraídas da literatura e adaptado Breeze (2018), Mutiara et al., (2018), Jawahar e Michael (2017) e eficiências calculadas por métodos empíricos da literatura (linhas tracejadas); a elipse em vermelho destaca a turbina utilizada pela UHT.

Conforme observado na Fig. 9 há um declínio na produção de energia, devido ao grande aumento da vazão (Seção 3.3.4), este aspecto vem sendo discutido ao longo dos anos por Jacob e Prénat (1996), Nishi e Liu (2013) e Favrel et al., (2017); a turbina Francis perde eficiência por

operar fora dos padrões do projeto da barragem. Soares-Filho et al. (2006); Basso e Botter (2012) e Jawahar e Michael (2017) observam que um aumento na vazão máxima pode levar à redução da eficiência das turbinas de uma usina hidrelétrica na conversão da vazão em energia. Segundo Susan-Resiga et al., (2018) e Kougias et al., (2019), quando as turbinas hidráulicas operam em condições diferentes do projeto original, ocorre um redemoinho residual no tubo de tração devido a uma incompatibilidade entre o redemoinho gerado pelas palhetas e o momento angular extraído pelo corredor da turbina. Operando com vazão fora do projeto, as turbinas hidráulicas Francis sofrem uma queda abrupta de eficiência e fortes flutuações de pressão (Jacob e Prénat, 1996; Vu e Retieb, 2002; Vu et al., 2011; Basso e Botter, 2012; Nishi e Liu, 2013; Favrel et al., 2017; Mutiara et al., 2018; Kougias et al., 2019; Xia et al., 2019; Kougias et al., 2019).

Em relação à distribuição cumulativa dos diferentes modelos (M1 a M4) em relação à produção real de energia (Fig. 8) e aos testes não paramétricos descritos em 3.2.7, identificamos que as variáveis que compõem os modelos de M1 a M3 têm menor importância na computação da energia gerada na usina hidrelétrica. Por outro lado, as variáveis que compõem M4 são de grande importância, e isso mostra a significância do termo de eficiência da turbina e altura da cabeça (η_t e $H_{(t)}$) da Eq. 6). Stickler et al., (2013) utilizaram estatísticas não paramétricas por meio do teste ANOVA para investigar a relação entre a eficiência da turbina Francis e o potencial gerado na usina hidrelétrica de Belo Monte no sul da Amazônia; Wen et al., (2018) evidenciaram a diminuição da eficiência das turbinas nas barragens com maior vazão de água no rio Yuan (China) associada aos impactos das mudanças climáticas e LULCC.

Usando Mann-Whitney e DEA não paramétrica, Wang et al., (2014) avaliou a ineficiência energética do Canadá. No Irã, Taki et al., (2011) aplicaram métodos não paramétricos para calcular a ineficiência energética do país. Na Europa, Barros (2008) diagnosticou que a geração hidroelétrica de Portugal entraria em colapso devido à ineficiência de algumas barragens através de testes não paramétricos de eficiência energética. Todos esses resultados mostram que a eficiência das turbinas tem grande importância na geração de energia, uma vez que essa eficiência na conversão de energia é o fator que garante a plena produtividade das usinas hidrelétricas. Isso fica claro quando se observa a relação da Fig. 8E entre M4 e a energia potencial observada.

Mutiara et al., (2018) avaliaram o desempenho de diversos tipos de turbinas em usinas hidrelétricas em todo o mundo e observaram que há uma pequena alteração na eficiência da turbina Francis ao longo de seu uso, e evidencia que por se tratar de uma turbina de difícil manutenção, com o avanço do tempo aumenta a degradação. Em uma revisão sobre o desempenho e funcionamento de turbinas utilizadas em usinas hidrelétricas, Mutiara et al., (2018) observaram

que existe uma relação linear entre a eficiência da turbina e o aumento tecnológico ao longo do tempo.

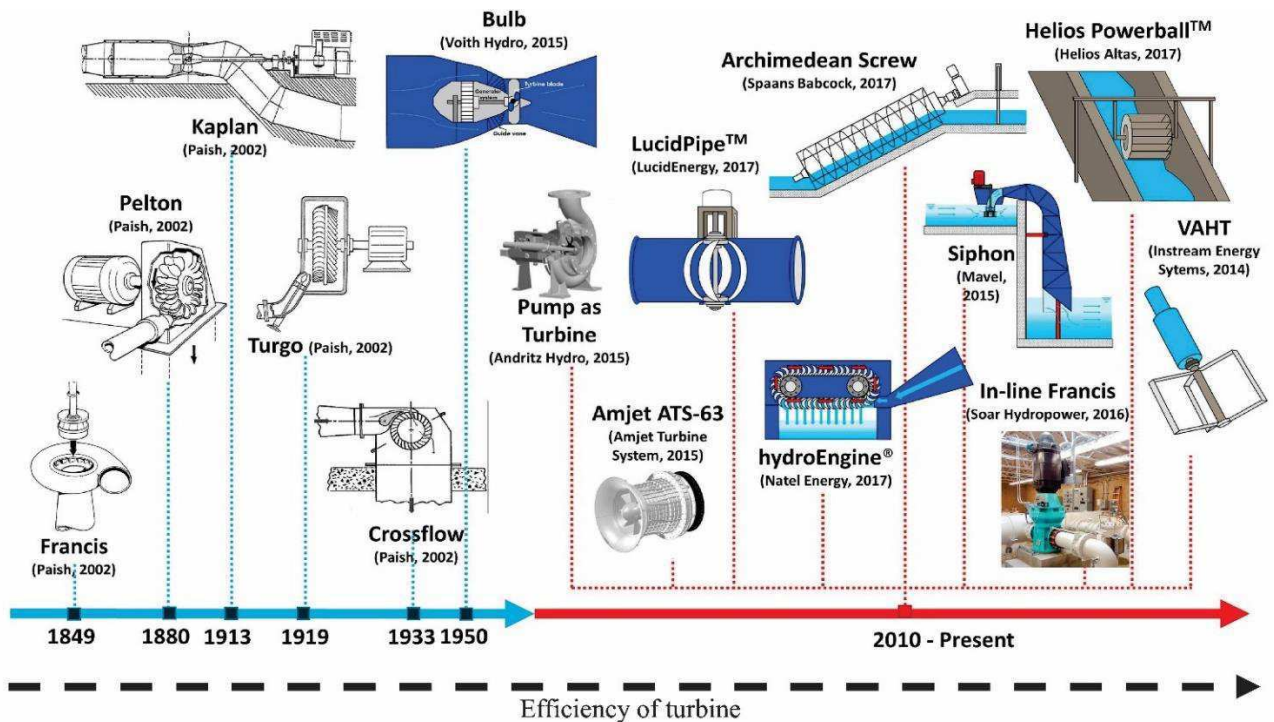


Fig. 10. Evolução dos modelos e da eficiência das turbinas. (Adaptado de Mutiara et al., 2018).

Nesse contexto, a discussão sobre a redução na produção de energia se dá por um fator estrutural da usina hidrelétrica de Tucuruí, pois está em operação desde 1984 e mantém o mesmo protótipo de turbina (Francis) desenvolvido com tecnologias de sua época. Mesmo que haja manutenção constante nas turbinas, a medida mais adequada para melhorar a eficiência na produção de energia seria a substituição das turbinas por modelos mais novos. Ou seja, na atual conjuntura estrutural da UHT, o aumento da vazão devido às mudanças de uso e cobertura da terra não será favorável ao aumento da produção de energia.

3.5. Observações, sugestões e pesquisas futuras

Deve-se mencionar que o fenômeno das mudanças no uso e cobertura do solo, os impactos correspondentes nas barragens hidrelétricas, afetarão todo o sistema energético (fornecedores, transmissão e demanda). Conseqüentemente, esse problema afetará principalmente as populações menos favorecidas da sociedade que provavelmente terão preços mais altos no futuro, devido a reduções consideráveis na produção de energia hidrelétrica, que é a principal fonte de energia do país até o momento.

Nesta análise do nexos terra-água-energia realizada sob diferentes cenários de forçamento ao sistema de geração de energia, notamos impactos significativos do LULCC, reduzindo a produção de energia devido à ineficiência das turbinas e da estrutura física da barragem. Isso fica mais evidente nos cenários C1 e C2, com dominância do uso da terra pelo agronegócio. Estudos sobre este tema na Noruega (Dorber et al., 2018); Canadá (Wang et al., 2014); Irã (Taki et al., 2011); Portugal (Barros, 2008); China (Wen et al., 2018) e África (Obahoundje et al., 2017) mostram que esta é uma questão global e precisa de mais investigação.

Alguns planos podem ser elaborados para amenizar o problema destacado nesta pesquisa, como os consórcios agroflorestais, para minimizar os efeitos do LULCC, destacado por Garrity (2012). Outro ponto é a concatenação de diferentes fontes de energia renovável na BHTA, como energia eólica e solar; Fthenakis e Kim (2009) realizaram uma revisão sobre o tema. Por fim, conforme destacado por Mutiara et al., (2018) e Kougias et al., (2019), os cenários pessimistas para a geração de energia em relação a UHT podem ser melhorados considerando: (1) o desenvolvimento de turbinas com maior eficiência, (2) a adoção de turbinas modernas como as utilizadas em muitas outras usinas hidrelétricas em todo o mundo e/ou (3) armazenamento de energia em larga escala durante o período de maior geração de energia.

esta pesquisa é baseada em diferentes suposições, opções de dados e modelagem. Portanto, incertezas são esperadas. Por exemplo, uma alteração nos cenários LULCC pode ocorrer devido a fatores políticos, econômicos, alimentares e ambientais, conforme mencionado no relatório do IPCC sobre Climate Change and Land (IPCC, 2019). Deve-se notar que as mudanças climáticas não foram levadas em consideração durante o período de simulação.

Por isso, estudos futuros devem trazer a perspectiva das mudanças climáticas na produção de energia na BHTA, bem como a fusão dos efeitos do LULCC aqui estudados com as diferentes emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) do IPCC. Finalmente, as perspectivas econômicas podem ser abordadas no futuro: quais impactos econômicos as mudanças climáticas e o LULCC trarão para a UHT/BHTA?

3.6. CONCLUSÕES

Uma redução de até 4% na evapotranspiração e um aumento substancial no escoamento superficial (15%) e vazão (36%) foram observados apenas no cenário três. O mesmo se repete nos demais cenários, em que há redução da evapotranspiração e aumento dos componentes de escoamento e vazão. Tal incremento na vazão da BHTA aumentará o nível do rio e ultrapassará o nível fluviométrico máximo do reservatório da UHT. Considerando que a barragem possui um grande vertedouro, capaz de liberar o excesso de água, as cidades localizadas a jusante da barragem seriam drasticamente afetadas pelo aumento do nível do rio.

Com relação à produção de energia na UHT, haverá um aumento na quantidade de energia produzida na hidrelétrica no terceiro cenário, mas apenas neste cenário. Isso fica claro, pois o aumento da vazão ocorrerá em todos os meses. Ou seja, nos meses que costumam ser mais secos, deve haver mais água no C-3 para produção de energia. No entanto, outro fator que deve ser levado em consideração é a capacidade estrutural da barragem, pois utiliza turbinas criadas no século passado, e essas turbinas não serão capazes de converter em energia toda a vazão do rio. Isso porque na comparação do balanço anual dos cenários com a produção atual de energia, haverá um déficit de 65% na geração de energia para UHT. Assim, na atual conjuntura estrutural da UHT, o aumento da vazão devido a mudanças no uso e cobertura da terra não será favorável a um aumento na produção de energia até o final do século.

Estes resultados servem de base para outros estudos voltados para essa linha de pesquisa e são um alerta para as diversas usinas hidrelétricas do mundo localizadas em regiões florestais que ainda utilizam turbinas de tecnologias passadas. Outro aspecto importante é a conservação das florestas tropicais nas bacias em que existem projetos hidrelétricos, pois as florestas desempenham um papel essencial no ciclo hidrológico de retenção do excesso de água que chegaria às usinas hidrelétricas. Este estudo também pode servir de base para que os tomadores de decisão criem políticas públicas e planejem a gestão sustentável de bacias tropicais.

3.7 REFERENCIAS

- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., Genuchten, V.M.T. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.* 3, 1340–1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S., Srinivasan, R. 2018. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water.* 10, 1-18. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Abera, F.F., Asfaw, D.H., Engida, A.N., Melesse, A.M. 2018. Optimal Operation of Hydropower Reservoirs under Climate Change: The Case of Tekeze Reservoir, Eastern Nile. *Water.* 10,1-18. <https://doi.org/10.3390/w10030273>
- Abe, C.A., Lobo, F.L., Dibike, Y.B., Costa, M.P.F., Dos Santos, V., Novo, E.M.L.M. 2018. Modelling the Effects of Historical and Future Land Cover Changes on the Hydrology of an Amazonian Basin. *Water.* 10, 1-19. <https://doi.org/10.3390/w10070932>
- Afshar, A., M.A. Mariño, M. Saadatpour, A. Afshar. 2011. Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system. *Water Resour. Manag.* 25(2), 545-563. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9713-x>
- Agüero, J.R. 2012. Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES.* 1-8. <https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281652>
- Akber, A., Khan, W.R., Islam, A., Rahman, M., Rahman, M.R. 2018. Impact of land use change on ecosystem services of southwest coastal Bangladesh. *J. Land Use Sci.* 13(3), 238-250, <https://doi.org/10.1080/1747423X.2018.1529832>
- Andolfatto, L., Euzenat, C., Vagnoni, E., Münch-Alligné, C., Avellan, F. 2015. A mixed standard/custom design strategy to minimize cost and maximize efficiency for picohydro

- power potential harvesting. International Youth Conference on Energy (IYCE), 1-8. <https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180729>
- Andrade, R.O. 2019. Alarming surge in Amazon fires prompts global outcry. Nature. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02537-0>
- Antonietti, R., Fontini, F. 2019. Does energy price affect energy efficiency? Cross-country panel evidence. Energy Policy. 129, 896-906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.069>
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. J. Am. Water Resour. Assoc. 34, 73–89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688>
- Arnold, J.G., D.N. Moriasi, P.W. Gassman, K.C. Abbaspour, M.J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R.D. Harmel, A. van Griensven, M.W. Van Liew, N. Kannan and M.K. Jha. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. Trans. ASABE. 55(4): 1491-1508. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.42256>
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G.B.M., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Asner, G.P., Armston, J., Ashton, P.S., Banin, L., Bayol, N., Berry, N.J., Boeckx, P., Jong, B.H.J., DeVries, B., Girardin, C.A.J., Kearsley, E., Lindsell, J.A., Lopez-Gonzalez, G., Lucas, R., Malhi, Y., Morel, A., Mitchard, E.T.A., Nagy, L., Qie, L., Quinones, J.L., Ryan, C.M., Ferry, S.J.W., Sunderland, T., Laurin, G.V., Gatti, R.C., Valentini, R. Verbeeck, H., Wijaya, A., Willcock, S. 2012. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. Global Change Biol. 22(4), 1406-1420. <https://doi.org/10.1111/gcb.13139>
- Bahri, M. 2020. Analysis of the water, energy, food and land nexus using the system archetypes: A case study in the Jatiluhur reservoir, West Java, Indonesia. Sci. Total Environ. 716, 137025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137025>
- Balkhair, K.S., Rahman, K.U. 2017. Sustainable and economical small-scale and low-head hydropower generation: A promising alternative potential solution for energy generation at local and regional scale. Applied Energy. 188, 378-391. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.012>
- Basso, S., Botter, G. 2012. Streamflow variability and optimal capacity of run-of-river hydropower plants. Water Resour. Res. 48, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2012WR012017>

- Barros, C.P. 2008. Efficiency analysis of hydroelectric generating plants: a case study for Portugal. *Energy Econ.* 30(1), 59-75. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.10.008>
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based variable contributing area model of catchment hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Blainski, E., Costa, E.A., Nogueira, P.C.P. 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. *Rev. Ambien. Água.* 12, 226-237. [10.4136/ambi-agua.1951](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951)
- Brazilian agricultural research company (EMBRAPA), Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. 2018. *VISION 2030 The Future of Brazilian Agriculture*, Brasília, BR, (in Portuguese).
- Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa, L.H.P., Srinivasan, R., Bonumá, N.B., Mendiondo, E.M. 2015a. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 8(3), 9-35. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.1765>
- Bressiani, D.A., Srinivasan, R., Jones, C.A., Mendiondo, E.M. 2015b. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 8(3): 125-139. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.970>
- Breeze, P., 2018. *Hydropower*, First ed. Academic Press, Cambridge.
- Brighenti, T.M., Bonuma, N.B., Srinivasan, R., Chaffe, P.L.B. 2019. Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: A review. *Hydrol. Sci. J.* 64(12), 1415-1423. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1642477>
- Bruijnzeel, L.A., 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. UNESCO. 224, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000097405>
- Borozan, D. 2018. Technical and total factor energy efficiency of European regions: a two-stage approach. *Energy.* 152, 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.159>

- Castello, L., McGrath, D.G., Hess, L.L., Coe, M.T., Lefebvre, P.A., Petry, P., Macedo, M.N., Renó, V.F., Arantes, C.C. 2013. The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conserv. Lett.* 6, 1-13. <https://doi.org/10.1111/conl.12008>
- Cebecauer, T., Hofierka, J. 2008. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology.* 98, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.035>
- Center for Advanced Studies in Applied Economics (CEPEA), University of São Paulo. 2019. Brazilian Agribusiness GDP, São Paulo, BR, (in Portuguese).
- Çelen, A., Yalçın, N. 2012. Performance assessment of Turkish electricity distribution utilities: an application of combined FAHP/TOPSIS/DEA methodology to incorporate equality of service. *Util. Policy.* 23. 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2012.05.003>
- Çelen, A. 2013. Efficiency and productivity (TFP) of the Turkish electricity distribution companies: an application of two-stage (DEA&Tobit) analysis. *Energy Policy.* 63, 300-310. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.034>
- Chang, J., Li, Y., Yuan, M., Wang, Y. 2017. Efficiency evaluation of hydropower station operation: A case study of Longyangxia station in the Yellow River, China. *Energy.* 135, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.049>
- Chang, C.B., Wen, J., Zheng, MB., Dong, MY., Hao, Y. 2018. Is higher government efficiency conducive to improving energy use efficiency? Evidence from OECD countries. *Enco. Model.* 72, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.01.006>
- Chang, C.B., Wen, J., Zheng, M.B., Dong, M.Y., Hao, Y. 2018. Is higher government efficiency conducive to improving energy use efficiency? Evidence from OECD countries. *Enco. Model.* 72, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.01.006>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S. 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Crawford, N.H., Linsley, R.K. 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV Technical Report N° 39. Department of Civil Engineering, Stanford University, 210.

- Davidson, E.A., Araújo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., Bustamante, C., Mercede, M., Coe, M.T., DeFries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W., Soares-Filho, B.S., Souza, C.M., Wofsy, S.C. 2001. The Amazon basin in transition. *Nature*. 481, 321-328. [doi:10.1038/nature10717](https://doi.org/10.1038/nature10717)
- DeFries, R.S., Morton, D.C., van der Werf, G.R., Giglio, L., Collatz, G.J., Randerson, J. T., Houghton, R.A., Kasibhatla, P.K., Shimabukuro, Y. (2008), Fire-related carbon emissions from land use transitions in southern Amazonia. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22705, [doi:10.1029/2008GL035689](https://doi.org/10.1029/2008GL035689).
- Desta, H., Lemma, B. 2017. SWAT based hydrological assessment and characterization of Lake Ziway sub-watersheds, Ethiopia. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 13, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.002>
- De Roo, A., Odiijk, M., Schmuck, G., Koster, E., Lucieer, A. (2001). Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Phys. Chem. Earth Part B*. 26(7), 593–599. [10.1016/S1464-1909\(01\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(01)00054-5)
- Doob, J.T. 1949. Heuristic Approach to the Kolmogorov-Smirnov Theorems. *Ann. Math. Stat.* 20(3), 393-403. <https://www.jstor.org/stable/2236535>
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., Messner, F. 2018. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water*. 10, 1-19. <https://doi.org/10.3390/w10040429>
- Dorber, M., May, R., Verones, F. 2018. Modeling Net Land Occupation of Hydropower Reservoirs in Norway for Use in Life Cycle Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 52(4), 2375-2384. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05125>
- Dosskey, M.G., Vidon, P., Gurwick, N.P., Allan, C.J., Duval, T.P., Lowrance, R. 2010. The role of riparian vegetation in protecting and improving water quality in streams. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 46, 1-18. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00419.x>
- Energy research company (EPE) 2018. Ten Year Energy Expansion Plan 2027. DF, Brazil, 345p (in Portuguese)
- Escobar, H. 2019. Science Editorial. There's no doubt that Brazil's fires are linked to deforestation, scientists say. *Science*. (80). <https://doi.org/10.1126/science.aaz2689>

- Falck, A.S., Maggioni, V., Tomasella, J., Vila., D.A., Diniz, F.L.R. 2015. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. *J. Hydrol.* 527, 943–957. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>
- Favrel, A., Pereira Junior, J.G., Landry, C., Müller, A., Nicolet, C., Avellan, F. 2017. New insight in Francis turbine cavitation vortex rope: role of the runner outlet flow swirl number. *J. Hydraul. Res.* 56(3), 1-13. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1356758>
- Farsi, M., Filippini, M. 2004. Regulation and measuring cost-efficiency with panel data models: application to electricity distribution utilities. *Rev. Ind. Organ.* 25(1), 1-19. <https://doi.org/10.1023/B:REIO.0000040474.83556.54>
- Filippini, M., Hunt, L.C. 2012. US residential energy demand and energy efficiency: a stochastic demand frontier approach. *Energy Econ.* 34(5), 1484-1491. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.013>
- Fthenakis, V., Kim, H.C. 2009. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13(6–7), 1465-1474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.017>
- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., Srinivasan, R. 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *J. Environ. Qual.* 43, 1-8, <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>
- Garrity, D. 2012. Agroforestry and the Future of Global Land Use. In: Nair P., Garrity D. (eds) *Agroforestry – The Future of Global Land Use. Advances in Agroforestry.* Springer. 9, 21-27. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4676-36>
- Guse, B., Pfannerstill, M., Fohrer, N. 2015. Dynamic modelling of land use change impacts on nitrate loads in rivers. *Environ. Process.* 2(4), 575–592. [10.1007/s40710-015-0099-x](https://doi.org/10.1007/s40710-015-0099-x)
- Güçlü, Y.S., 2018. Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. *J. Hydrol.* 566, 685-704. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.034>
- Guzha, A.C., Rufino, M.C., Okoth, S., Jacobs, S., Nóbrega, R.L.B. 2018. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 15, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>

- Haguma, D., Leconte, R., Côté, P., Krau, S., Brissette, F. 2014. Optimal Hydropower Generation Under Climate Change Conditions for a Northern Water Resources System. *Water Resour. Manage.* 28, 4631–4644. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0763-3>
- Hernandes, T.A.D., Scarpore, F.V., Seabra, J.E.A. 2018a. Assessment of the recent land use change dynamics related to sugarcane expansion and the associated effects on water resources availability. *J. Cleaner Prod.* 197, 1328–1341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.297>
- Hernandes, T.A.D., Scarpore, F.V., Seabra, J.E.A. 2018b Assessment of impacts on basin stream flow derived from medium-term sugarcane expansion scenarios in Brazil, *Agric. Ecosyst. Environ.* 259, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.026>
- Hunke, P., Mueller, E.N., Schröder, B., Zeilhofer, P. 2015. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. *Ecohydrology.* 8, 1154–1180. <https://doi.org/10.1002/eco.1573>
- Inglesi-Lotz, R., Blignaut, J.N. 2014. Improving the electricity efficiency in South Africa through a benchmark-and-trade system. *Renew. Sust. Energy Rev.* 30, 833-840. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.028>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2017. Climate change Report 2017: Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, Cambridge University Press, Cambridge, UK. https://www.ipcc.ch/report/sr2/pdf/sr2_background_report_final.pdf
- Institute of Applied Economic Research (IPEA), Ministry of Planning Development and Management. 2017. Agriculture and Industry in Brazil Innovation and Competitiveness, Brasília, BR, (in Portuguese).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. Climate Change and Land 2019: Special Report on Climate Change, Desertification, Land, Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems, Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://ipcc.ch/report/srccl>
- Jacob, T. Prénat, J.E. 1996. Francis turbine surge: discussion and data base. Hydraulic machinery and cavitation, Springer. 855-864p. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9385-9_87

- Jamasb, J., Pollitt, M. 2001. Benchmarking and regulation: international electric experience. *Util. Policy*. 9(3), 107-130. [https://doi.org/10.1016/S0957-1787\(01\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0957-1787(01)00010-8)
- Jawahar, C.P., Michael, P.A. 2017. A review on turbines for micro hydro power plant. *Renew. Sust. Energy Rev.* 72, 882-887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.133>
- Kendall, M.G. 1975. Rank correlation measures. *Rank Correlation Method*. Charless Griffin, London.
- Kleit, A.N., Terrell, D. 2001. Measuring potential efficiency gains from deregulation of electricity generation: a Bayesian approach. *Rev. Econ. Stat.* 83(3), 523-530. <https://doi.org/10.1162/00346530152480162>
- Knittel, C.R. 2002. Alternative regulatory methods and firm efficiency: stochastic frontier evidence the US electricity industry. *Rev. Econ. Stat.* 84(3), 530-540. <https://doi.org/10.1162/003465302320259529>
- Kodama, Y. 1992. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteorolog. Soc. Jpn.* 70, 813–835. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.70.4_813
- Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, F., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J.I., Quaranta, E., Schild, P., Theodossiou, P. 2019. Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renew. Sust. Energy Rev.* 113, 109257. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>
- Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K., Patra, S.C. 2010. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy*. 87, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>
- Kumar, A., Sharma, M.P. 2016. A modeling approach to assess the greenhouse gas risk in Koteshwar hydropower reservoir, India. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 22, 1651–1664. <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2016.1209077>
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J. Am. Stat. Assoc.* 47, 583-621, <https://doi.org/10.2307/2280779>

- Krysanova V., White, M. 2015. Advances in water resources assessment with SWAT—an overview. *Hydrol. Sci. J.* 60(5), 771-783. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1029482>
- Lamparter, G., Nóbrega, R.L.B., Kovacs, K., Amorim, R.S., Gerold, G. 2018. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. *Reg. Environ. Change* . 18, 91-103. <https://doi.org/10.1007/s1011>
- Lewis, S.L., Edwards, D.P., Galbraith, D. 2015. Increasing human dominance of tropical forests. *Science*. 349 (6250), 827-832, <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
- Li, K., Lin, B.Q. 2018. How to promote energy efficiency through technological progress in China?. *Energy*. 143, 812-821. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.047>
- Mann. H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245-259.
- Malhi, Y., Roberts, J.T., Betts, R.A., Killeen, T.J., Li, W., Nobre, C.A. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*. 319 (5860), 169-172. <https://doi.org/10.1126/science.1146961>
- Martini, D.Z., Moreira, M.A., Cruz de Aragão, L.E.O.E., Formaggio, A.R., Dalla-Nora, E.L. 2015. Potential land availability for agricultural expansion in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*. 49, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.005>
- Metcalf, E. 1971. Storm Water Management Model, University of Florida and Water Resources Engineers. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 352.
- Meher, S., Sahu, A. 2016. Efficiency of Electricity Distribution Utilities in India: A Data Envelopment Analysis. *OPEC Energy Review*. 40(2), 155-179, <http://dx.doi.org/10.1111/opec.12072>
- Mendes, C. A.B., Fausto, A.B., Canales, A. 2017. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. *Energy*. 141, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.071>
- Migliaccio, K.W., Srivastava, P. 2007. Hydrologic components of watershed-scale models. *Trans. ASABE*. 50(5), 1695-1703. <https://doi.org/10.13031/2013.23955>
- Ministry of the Environment. (MMA). 2005. National Water Resources Plan, Tocantins-Araguaia Hydrographic Region Regional Study, Brasilia, DF, Brazil (in Portuguese)

- Moses, L.E. 1952. A two-sample test. *Psychometrika*. 17, 239–247.
<https://doi.org/10.1007/BF02288755>
- Mohammed, Y.S., Mustafa, M.W., Bashir, N., Mokhtar, A.S. 2013. Renewable energy resources for distributed power generation in Nigeria: A review of the potential. *Renew. Sust. Energy Rev.* 22, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.020>
- Mustard, J., DeFries, R., Fisher, T. Moran, E.F. 2004. Land use and land cover change pathways and impacts. M.A. Cochrane (Ed.), *Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*, Springer-Verlag, Dordrecht, the Netherlands.
- Mugisha, S. 2007. Effects of incentive applications on technical efficiencies: empirical evidence from Ugandan water utilities. *Util. Policy*. 15(4), 225-233.
<https://doi.org/10.1016/j.jup.2006.11.001>
- Mutiara, A.S., Mohammad, B., Carla, C., Matthew S., Newsha, A., Joseph, G.J. 2018. Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems. *J. Environ. Manage.* 228, 416-428.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.078>
- National Electric Energy Agency (ANEEL). 2018. Monitoring Reports on the Expansion of the Electricity Generation Offering. Ministry of Mines and Energy. Brasilia, DF, Brazil (in Portuguese).
- National Bank for Economic and Social Development (BNDES), Ministry of Planning Development and Management. 2018. The growth of the Brazilian economy 2018-2023, Brasília, BR, (in Portuguese).
- Nature Editorial, 2018. Brazil's new president adds to global threat to science. *Nature*. 563, 5–6.
<https://doi.org/10.1038/d41586-018-07236-w>
- Nature Editorial, 2018. Brazil's sustainability needs social sciences. *Nature Sustain.* 1, 607.
<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0183-0>
- Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Motta, R.S., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O. Hess, L. 2014. Slowing Amazon deforestation through

- public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*. 344, 1118–1123. <https://doi.org/10.1126/science.1248525>
- Nishi, M., Liu, S. 2013. An outlook on the draft-tube-surge study. *Int. J. Fluid Mach. Syst.* 6(1), 33-48. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2013.6.1.033>
- Obahoundje, S., Oforu, E.A., Akpoti, K.A., Kabo-bah, A.T. 2017. Land Use and Land Cover Changes under Climate Uncertainty: Modelling the Impacts on Hydropower Production in Western Africa. *Hydrology*. 4(1), 2. <https://doi.org/10.3390/hydrology4010002>
- Oliveira, V.A., Mello, C.R., Viola, M.R., Srinivasan, R. 2017. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *Int. J. Climatol.* 37, 5005-5023. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>
- Oliveira, V.A., Mello, C.R., Viola, M.R., Srinivasan, R. 2018. Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande River basin, Brazil. *CERNE*. 24, 334-343. <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201824042573>
- Op de Hipt, F.O., Diekkrüger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M., Näschen, K. 2019. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catch-ment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. *Sci. Total Environ.* 653, 431-445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>
- Oskouei, M.A., Awuah-Offei, K. 2014. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. *Mining Technology*. 123(4), 175-182. <https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000067>
- Oyerinde, G.T., Wissler, D., Hountondji, F.C.C., Odofin, A.J., Lawin, A.E., Afouda, A., Diekkrüger, B. 2016. Quantifying Uncertainties in Modeling Climate Change Impacts on Hydropower Production. *Climate*. 4(34), 1-15. <https://doi.org/10.3390/cli4030034>
- Pai, N., Saraswat, D. 2009. SWAT2009_LUC: A Tool to Activate the Land Use Change Module in SWAT 2009. *Trans. ASABE*. 54, 1649–1658. <https://dx.doi.org/10.13031/2013.39854>
- Pandey, A., Lalrempuia, D., Jain, S.K. 2015. Assessment of hydropower potential using spatial technology and SWAT modelling in the Mat River, southern Mizoram, India. *Hydrol. Sci. J.* 60, 1651-1665. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943669>

- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K., Singh, V.P. 2016. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*. 147, 595-620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
- Perazzoli, M., Pinheiro, A., Kaufmann, V. 2013. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do ribeirão Concórdia – SC. *Ver. Árvore*. 37, 859- 869. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000500008>
- Pereira, D.R., Martinez, M.A., Pruski, F.F., Silva, D.D. 2016. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 7, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- Piman, T., Cochrane, T.A., Arias, M.E., Green, A., Dat, ND. 2013. Assessment of Flow Changes from Hydropower Development and Operations in Sekong, Sesan, and Srepok Rivers of the Mekong Basin. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 139, 723-732. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000286)
- Presidency of the Republic, Civil House, 1968. Decree-law N° 227, Mines Code. Brasília, DF, Brazil (in Portuguese). Available in: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/De10227.htm
- Presidency of the Republic, Civil House, 2012. Law N° 12.651, Provides for the protection of native vegetation. Brasília, DF, Brazil (in Portuguese). Available in: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm
- Queiroz, A.R., Faria, V.A.D., Lima, L.M.M., Lima, J.W.M. 2019. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. *Renewable Energy*. 133, 873-882. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P., Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Ao. Bras. Meteorol.* 25, 185-204. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Rosa, E.B., Pezzi, L.P., Quadro, M.F.L.d., Brunzell, N. (2020) Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features. *Front. Environ. Sci.* 8:18: [10.3389/fenvs.2020.00018](https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00018)

- Sala-Garrido, R., Molinos-Senante, M. 2020. Benchmarking energy efficiency of water treatment plants: Effects of data variability. *Sci. Total Environ.* 701, 134960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134960>
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P. 2017. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1-7. <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Santos, C.A., Lima, A.M.M., Farias, M.H.C.S., Aires, U.R.V., Serrão, E.A.O. 2016. Análise Estatística da não Estacionariedade de Séries Temporais de Vazão Máxima Anual diária na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. *Holos.* 7, 179-193. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4892>
- Schuol, J., Abbaspour, K.C. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Adv. Geosci.* 9: 137–143. <https://doi.org/10.5194/adgeo-9-137-2006>
- Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43, 1-18. [10.1029/2006WR005486](https://doi.org/10.1029/2006WR005486)
- Schneider, U., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rustemeier, E., Ziese, M., Becker, A. 2017. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere.* 8, 1-17. <https://doi.org/10.3390/atmos8030052>
- Serrão, E.A.O., Wanzeler, R.T.S., Santos, C.A., Gonçalves, L.J.M., Lima, A.M.M., Rocha, E.J.P. 2016. Statistical evaluation between the constellation of precipitation estimates with GPM satellite TRMM: an analysis of the river basin Solimões. *Braz. J. Climatol.* 18, 256-275. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43059>
- Serrão, E.A.O., Silva, M.T., Sousa, F.A.S., Lima, A.M.M., Santos, C.A., Ataíde, L.C.P. 2019^a. Four decades of hydrological processes simulation in the watershed of the Itacaiúnas river, Southeast of the Amazon. *Bull. Geodetic. Science.* 25(3), 1-18. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>

- Serrão, E.A.O., Silva, M.T., Sousa, F.A.S., Ataíde, L.C.P., Santos, C.A., Silva, V.P.R., Silva, B.K.N. 2019b. Influence of land use and land cover on spatial and temporal variability of evapotranspiration in southeastern Amazonia, using the SWAT model. *Ibero-Amer. J. Environ. Sciences.* 10(4), 134-148. <http://dx.doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0011>
- Sharpley, A.N., Williams, J.R. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model Documentation. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech Bull. No. 1768.
- Silva, M.T., Silva, V.P.R., Souza, E.P., Araújo, A.L. 2015. SWAT model application to estimate the flow in the basin of lower-middle São Francisco River. *Revis. Bras. Geogra. Física.* 8 (6),1615-1627. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v8.6.p1615-1627>
- Silva, V.P.R., Silva, M.T., Souza, E.P. 2016. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco River basin. *Engenharia Agrícola.* 36(6), 1005-1015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1005-1015/2016>
- Silva, V.P.R., Silva, M.T., Braga, C.C., Singh, V. P., Souza, E.P., Sousa, F.A.S., Holanda, R.M., Almeida, R.S.R., Braga, A.C.R. 2018. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena.* 162, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>
- Silva, A.K.L., Sousa, A.M.L., Santos, J.T.S., Villela, J.M., Martorano, L.G., Crestana, S. 2018. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 22, 344-348. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>
- Singh, V.P., Woolhiser, D.A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J. Hydrol. Eng.* 7(4), 270-292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270))
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., McDonald, A. Lefebvre, P., Schlesinger, P. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature.* 440, 520–523. <https://dx.doi.org/10.1038/nature04389>

- Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., Alencar, A. 2014. Cracking Brazil's Forest Code. *Science*. 344, 363–36., <https://dx.doi.org/10.1126/science.1246663>
- Srinivasan, R. Zhang, Z., Arnold, J.G. 2010. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *Trans. ASABE*. 53, 1533-1546. [10.13031/2013.34903](https://doi.org/10.13031/2013.34903)
- Stern, D.I. 2012. Modeling international trends in energy efficiency. *Energy Econ*. 34(6). 2200-2208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.03.009>
- Stickler, C.M., Coe, M.T., Costa, M.H., Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Dias, L.C.P., Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S. 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 9601–9606, <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Susan-Resiga, R.F., Stuparu, A., Muntean, S. 2018. Francis turbine with tandem runners: a proof of concept. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 240(2), 1-8, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/2/022012>
- Taki, M., Ajabshirchi, Y., Mahmoudi, A. 2011. Application of Parametric and Non-parametric Method to Analyzing of Energy Consumption for Cucumber Production in Iran. *Mod. Appl. Sci.* 6(1), 75-88. <https://doi.org/10.5539/mas.v6n1p75>
- Tan, M.L., Gassman, P.W., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Yang, X. 2019. A review of SWAT studies in Southeast Asia: Applications, challenges and future directions. *Water*. 11(5), 914. [http://doi.org/10.3390/w11050914](https://doi.org/10.3390/w11050914)
- te Wierik, S.A., Gupta, J., Cammeraat, E.L.H., Artzy-Randrup, Y.A. (2020). The need for green and atmospheric water governance. *WIREs Water*. 7,e1406. <https://doi.org/10.1002/wat2.1406>
- te Wierik, S.A., Cammeraa, E.L.H., Gupta, J., & Artzy-Randrup, Y.A. (2021). Reviewing the impact of land use and land-use change on moisture recycling and precipitation patterns. *Water Resources Research*, 57, e2020WR029234. <https://doi.org/10.1029/2020WR029234>

- Tolessa, T., Senbeta, F., Abebe, T. 2017. Land use/land cover analysis and ecosystem services valuation in the central highlands of Ethiopia. *Forests. Trees and Livelihoods*. 26(2), 111-123, <https://doi.org/10.1080/14728028.2016.1221780>
- Tollefson, J. 2019. ‘Tropical Trump’ sparks unprecedented crisis for Brazilian science. *Nature* 572, 161–162. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02353-6>
- Trumbore, S., Brando, P., Hartmann, H. 2015. Forest health and global change. *Science*. 349 (6250), 814-818. <https://doi.org/10.1126/science.aac6759>
- Viola, M.R., Mello, C.R., Beskow, S., Norton, L.D. 2013. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. *Water Resour. Manage*. 28, 4537-4550. [10.1007/s11269-014-0749-1](https://doi.org/10.1007/s11269-014-0749-1)
- Vu, T.C., Retieb, S. 2002. Accuracy assessment of current CFD tools to predict hydraulic turbine efficiency hill chart. *Proceedings of the 21st IAHR symposium on hydraulic machinery and systems*, 78eporto , Switzerland. 1, 193-198.
- Vu, T., Koller, M., Gauthier, M., Deschênes, C. 2011. Flow simulation and efficiency hill chart prediction for a propeller turbine. *Int. J. Fluid Mach. Syst*. 4(2), 243-254. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2011.4.2.243>
- Wang, B., Nistor, I., Murty, T., Wei, Y.M. 2014. Efficiency assessment of hydroelectric power plants in Canada: A multi criteria decision making approach. *Energy Econ*. 46, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.001>
- Wang, R.Y., Yuan, H., Yen, Grieneisen, M., Arnold, J., Wang, D., Wang, C., Zhang, M. 2019. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns. *Sci. Total Environ*. 669, 512-526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.141>
- Wang, X., Xin, L., Tan, M., Li, X., Wang, J. 2020. Impact of spatiotemporal change of cultivated land on food-water relations in China during 1990–2015. *Sci. Total Environ*. 716, 137119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137119>
- Wang, H., Wang, M. 2020. Effects of technological innovation on energy efficiency in China: Evidence from dynamic panel of 284 cities. *Sci. Total Environ*. 709, 136172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136172>

- Wen, X., Liu, Z., Lei, X., Lin, R., Fang, G., Tan, Q., Wang, C., Tian, Y., Quan, J. 2018. Future changes in Yuan River ecohydrology: Individual and cumulative impacts of climates change and cascade hydropower development on runoff and aquatic habitat quality. *Sci. Total Environ.* 633, 1403-1417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.309>
- Worrall, F., Besien, T., Wkolpin, D. 2002. Groundwater vulnerability: interactions of chemical and site properties. *Sci. Total Environ.* 299(1-3), 131-143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00270-X)
- Wu, L., Wang, S., Bai, X., Luo, W., Tian, Y., Zeng, C., Luo, G., He, S. 2017. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China. *Sci. Total Environ.* (601-602), 1449-1465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.288>
- Xia, L.S., Cheng, Y.G., Yang, J.D., Cai, F. 2019. Evolution of flow structures and pressure fluctuations in the S-shaped region of a pump-turbine. *J. Hydraul. Res.* 57(1), 107-121. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1459893>
- Yuksel, I. 2010. As a renewable energy hydropower for sustainable development in Turkey. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14, 3213-3219. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.056>
- Yin, J., He, F., Xiong, Y.J., Qiu, G.Y. 2017. Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in northwest China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 183–196. <https://doi.org/10.5194/hess-21-183-2017>

CAPÍTULO 4

IMPACTOS FUTUROS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA SOBRE A ENERGIA HIDRELÉTRICA E AS RECEITAS PARA A AMAZÔNIA

(Artigo no formato da revista: Renewable Energy– ISSN: 0960-1481)

RESUMO: Espera-se que o uso da terra e a mudança do clima alterem significativamente a hidrologia e conseqüentemente a produção de energia elétrica em países extremamente dependentes de seus recursos hídricos, como o Brasil. Nesse sentido, utilizamos o modelo hidrológico de larga escala Soil and Water Assessment Tool (SWAT), integrado a cenários de mudanças climáticas e uso da terra para bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia (BHTA), com foco na produção energética da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT), sudeste da Amazônia. Inserimos dados de precipitação e temperatura diárias de dois Modelos de Circulação Geral (GCM), HadGEM2-ES e MIROC5 com forçamento radiativo moderado ($+4,5 \text{ W/m}^2$ no ano de 2100 em relação aos níveis pré-industriais) e severo ($+8,5 \text{ W/m}^2$) a partir de emissões do dióxido de carbono na atmosfera (Representative Concentration Pathways). Para o cenário de mudança no uso da terra (LULCC) utilizamos um cenário de longo prazo em que somente as áreas florestais são substituídas por pastagem, depois por agricultura, em seguida por vegetação de reflorestamento e, finalmente, por floresta regenerada. Este cenário de LUCC é acoplado ao cenário climático mais pessimista encontrado para a BHTA (MIROC5-RCP 8.5), desta forma investigamos cinco cenários e seus impactos na produção de energia hidrelétrica e nas receitas em UHT. É evidenciado que a BHTA enfrentará uma grande redução hídrica até o final do século, para todos os cenários, impactando fortemente na produção energética da bacia e nas receitas hidrelétricas. Reduções de até 74% na vazão anual e de 63% na geração de eletricidade é esperado para o cenário mais pessimista (L8.5), desencadeando um déficit de 135% ao ano na receita da UHT para este cenário. Embora alguns cenários de mudança no uso da terra parcialmente suavizem a tendência de diminuição da vazão impulsionada pelo clima no período de maior precipitação, há uma redução acentuada da vazão durante a estação seca, agravando a variabilidade sazonal e interanual.

PALAVRAS-CHAVE: Climate-Land-Energy-Water Nexus; Economics and Environment; Hydrological Modeling.

4.4. INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental na vida humana e no desenvolvimento econômico da sociedade moderna [1]. Entretanto, a produção e consumo de energia são os principais responsáveis pelo aumento na concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera [2,3]. A respeito disso, é crescente a busca por implementações de fontes renováveis de energia, como a energia hidrelétrica [4]. A energia hidrelétrica é a principal fonte de geração de eletricidade na América Latina, respondendo por 45% do fornecimento total de eletricidade da região [2]. No Brasil 70% de toda energia produzida é por meio das hidrelétricas, especialmente as hidrelétricas da Amazônia e do Cerrado [4,5]. A Amazônia é a próxima fronteira brasileira para expansão de empreendimentos hidrelétricos. Entretanto, as mudanças climáticas e as mudanças no uso e cobertura da terra (LULCC), atuando em consonância, afetam gravemente a produção de energia nessa região [6,7]. Em resumo, aumento do desmatamento da Amazônia aliado às mudanças climáticas geram alterações no ciclo hidrológico, e consequentemente, alteram a periodicidade e a intensidade dos fluxos dos rios, comprometendo assim a geração de eletricidade [8,9].

A crise climática surge como uma questão chave para a gestão e desenvolvimento da energia hidrelétrica no futuro, e naturalmente, pesquisas relevantes têm sido feitas no mundo, por exemplo [10] na África; [1] na Europa; [11] no Brasil; para a China, [12,13]. Através das mudanças climáticas, há influência indireta no fluxo total de água da bacia devido a variações na precipitação e evapotranspiração [6,10,13].

Por sua vez, os impactos do LULCC no regime hídrico são diversos, e exercem influência direta no decréscimo da evapotranspiração [6,14], decréscimo na recarga de água subterrânea, [15,16] e aumento no escoamento superficial, [5,17–20], resultando em mudanças na vazão que impactam diretamente a produção hidrelétrica. Desta forma o Nexo Clima-Terra-Energia-Água (CLEW) surge como uma visão estratégica de manutenção e gestão dos recursos ambientais nas próximas décadas, visando os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU [21]. Além disso, oferece um conjunto de políticas para responder às crises iminentes de clima, uso da terra, água e energia [22]. Estas políticas estão direcionadas majoritariamente à diminuição das emissões de GEE e uso consciente da água [23].

No Brasil, o aumento dos GEE está diretamente ligado ao avanço do desmatamento e alterações abruptas no uso da terra, especialmente na Amazônia. Em 2019 o Brasil registrou um aumento de 9,6% nas emissões brutas de gases de efeito estufa, comparado ao ano anterior [24]. Nestas condições, é crescente a preocupação com a viabilidade e manutenção das hidrelétricas na

Amazônia para o futuro, e imprescindível a execução de estudos que auxiliem a caracterização e mitigação dessa problemática. Ainda no bioma Amazônia, a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) é uma das hidrelétricas mais importantes para a matriz energética do Brasil, destacando-se por ser a terceira maior hidrelétrica nacional, caracterizada pelo uso múltiplo e barragem de gravidade.

Esta hidrelétrica se encontra na Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA) uma bacia hidrográfica tropical de grande escala que se encontra na transição entre os biomas brasileiros Amazônia e Cerrado, tendo todo seu território dentro do Brasil. A UHT é responsável pelo maior faturamento hidroenergético brasileiro. Em 2019 a UHT faturou R\$ 1,5 bilhão (moeda brasileira) e, em seus > 30 anos, já gerou mais de R\$ 52 bilhões, ou US \$10 bilhões (2019), para os cofres públicos brasileiros [25].

Nesta atual conjectura, os modelos hidrológicos tornam-se instrumentos poderosos de monitoramento e prognóstico de bacias potencialmente geradoras de energia. Logo, é crescente a utilização desses modelos para avaliar impactos climáticos ou alterações no LULCC e no regime hídrico de bacias em todo o mundo, a exemplo de [[13,19,26–28]]. Dentre os modelos hidrológicos, o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) vem se destacando na temática dos impactos das mudanças climáticas e do uso da terra [[29–32]] e na determinação do potencial energético de bacias hidrográficas, [[26,33–36]].

A geração de energia hidrelétrica é fortemente impactada pelo regime hidrológico regional e, portanto, pode sofrer com os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra. Desta forma a questão atual é: a produção de energia hidrelétrica mudará no futuro? Assim, o objetivo deste trabalho segue duas linhas principais: (1) quantificar os possíveis impactos isolados e combinados das mudanças climáticas e do uso da terra na produção hidrelétrica da BHTA; (2) avaliar os potenciais impactos econômicos sobre o faturamento energético da UHT.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Área de Estudo

A área de estudo faz parte da Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia (BHTA), drenando aproximadamente 764.000 km², o que corresponde a 9% do território do Brasil, cobrindo parte das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do país (Fig. 1). A BHTA é formada principalmente pelo rio Tocantins, com aproximadamente 2.640 km de extensão, e seu principal afluente, o rio Araguaia, que possui extensão de 1.670 km [36].

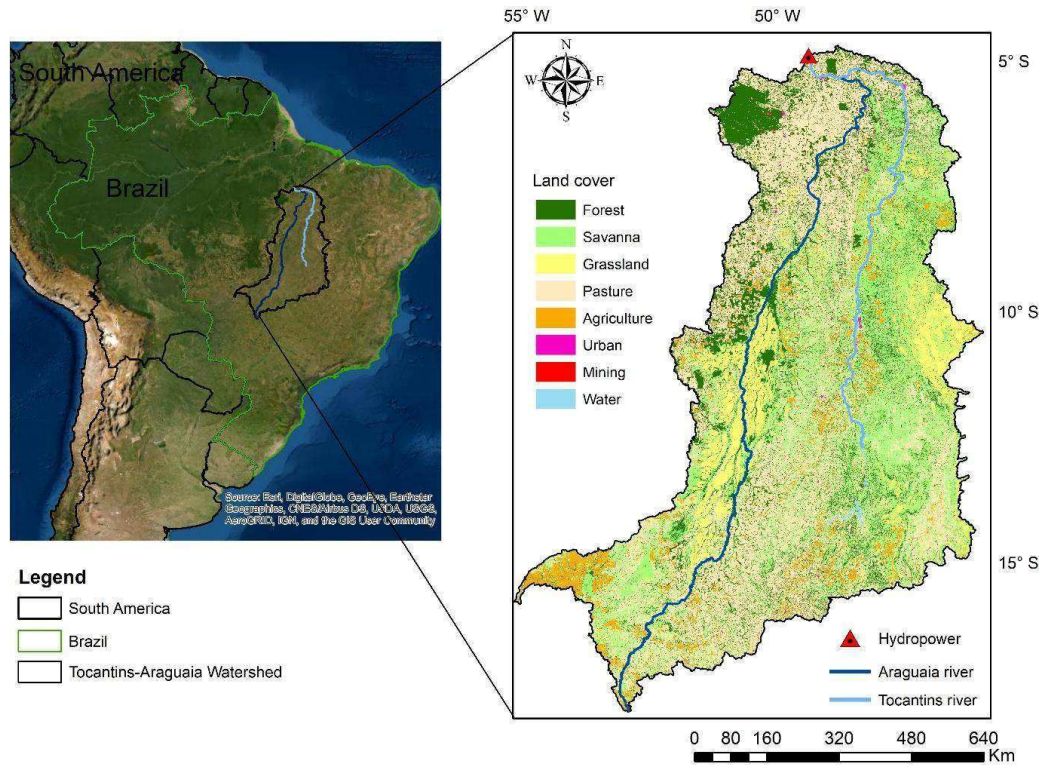


Fig. 1. Localização da Bacia do Rio Tocantins-Araguaia e a atual cobertura da terra na BHTA.

A topografia da bacia varia de 1.674 (montante) a 200 metros (jusante). O clima é considerado tropical continental e a precipitação anual é superior a 2000 mm [37]. Devido a sua extensão territorial, BHTA é influenciada por sistemas meteorológicos de múltiplas escalas, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistemas frontais (SF) e sistemas convectivos de mesoescala (SCM) [38].

4.2.2. SWAT

SWAT é um modelo semi-distribuído que estima os componentes do ciclo hidrológico através de equações baseadas nos processos físicos que ocorrem em uma bacia [39–41]. Entre os diversos processos hidrológicos que o SWAT simula, os impactos das mudanças climáticas e uso da terra na hidrologia e potencial energético têm se destacado [5,28,33,34,42]. Portanto, o ciclo hidrológico no modelo SWAT é baseado na Eq. 1, que defini o balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sur} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que: SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e

o ponto de murcha permanente (mm); t é o tempo (dias); P é a precipitação pluviométrica (mm); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm); ET é a evapotranspiração (mm); W_a é a percolação (mm) e Q_{sub} é o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

No SWAT, uma bacia pode ser dividida em sub-bacias, cada sub-bacia também é delimitada em unidades de resposta hidrológica (HRUs) que consistem em uma mistura de alguns elementos físicos uso e cobertura de terra, declive e tipo de solo, estes estão interligados à rede fluvial, precipitação e evaporação e demais processos hídricos [43].

4.2.3. Cenários de mudanças climáticas e de uso da terra

Para analisarmos os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e na produção de energia elétrica, utilizamos dois cenários de *Representative Concentration Pathways* (RCP), RCP 4.5 Wm^{-2} e RCP 8.5 Wm^{-2} , estes representam médias e altas trajetórias de concentração de GEE, respectivamente [44,45]. Os cenários climáticos são derivados de dois modelos da documentação da fase 5 do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) do IPCC: HadGEM2-ES e MIROC-ESM. Corrigidos globalmente por viés utilizando correção aditiva para temperatura e um fator de correção multiplicativo para precipitação, a partir dos dados CRU e GPCC, estes dados corrigidos fazem parte do projeto ISI-MIP5 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project), [46,47]. Reformatados em formato SWAT para o globo com resolução espacial de $0,5^\circ$ into SWAT-formatted text files, acessível em <https://www.2w2e.com/home/CIMP> e descritos por [47,48]. Para cada cenário foram utilizados os dados diários de precipitação e temperatura média do ar no período de 2018 a 2099.

O RCP4.5, assumiu uma situação de estabilização de CH_4 e CO_2 onde as políticas de mitigação das emissões são tais que o forçamento radiativo atinge $4.5 W/m^2$ em 2100 sem ultrapassar este limite [49]. Este cenário corresponde a um cenário intermediário de baixas emissões. Já o cenário RCP8.5, não considera nenhuma meta de mitigação climática específica, o que evidentemente corrobora para um aumento nas emissões de GEE ao longo do tempo e consequentemente causando uma maior forçante radiativa ($8.5 Wm^{-2}$) [50].

Para avaliarmos os impactos do LULCC na vazão da BHTA e consequentemente, na produção de energia hidrelétrica, construímos um cenário de longo prazo (2018 – 2099) subdividido em 4 períodos analisados de forma integrada (Tabela 1), baseados nas projeções do relatório *Climate Change and Land* [50] e no estudo realizado por [5] na BHTA. Considerando a possibilidade do crescimento populacional, este pode ameaçar a segurança alimentar, gerando um

aumento da demanda por alimentos, e conseqüentemente uma intensificação da dinâmica do uso da terra para a agricultura e pecuária.

Os cenários de LULCC foram simulados utilizando o *Land Use Update Tool*, desenvolvido por [51] e replicada por [5,29,30], onde podemos atualizar dinamicamente o uso do solo de cada HRU durante os respectivos períodos de simulação. O *Land-Use Update* ajusta automaticamente as frações de HRUs, atualizando o uso atual para o novo uso com base na porcentagem fornecida pelo modelador. Em conjunto a cada cenário de LULCC adicionamos o respectivo cenário RCP8.5 do MIROC5 como base de dados climáticos a longo prazo, desta forma, investigamos como as mudanças climáticas e da terra impactam na hidrologia da BHTA e na produção energética. Daqui em diante trataremos esse cenário como L8.5. A escolha do cenário RCP8.5 do MIROC5, se dá em virtude de ser o mais pessimista sazonalmente entre os modelos climáticos aqui estudados. Os impactos na hidrologia da BHTA de acordo com os demais cenários climáticos foram analisados considerando o uso da terra atual.

Tabela 1. Possíveis cenários de LULCC e clima para o BHTA

Cenário	LULCC	Clima – MIROC5	Período
L8.5	Floresta para Pastagem	RCP8.5	2018-2030
L8.5	Pastagem para Agricultura	RCP8.5	2030-2040
L8.5	Agricultura para Reflorestamento	RCP8.5	2040-2060
L8.5	Reflorestamento para Floresta	RCP8.5	2060-2099

Utilizando a mesma metodologia que [5], removemos todas as áreas de florestas na BHTA (40.6%) da cobertura total e substituímos sucessivamente por pastagem, agricultura, regeneração por reflorestamento e posterior retorno ao uso atual da floresta. Os períodos de tempo utilizados foram baseados em [18], que afirma que a transição da vegetação nativa para a pastagem e agricultura leva em média 10 anos. Evidenciamos ainda que os cenários exclusivamente climáticos foram nomeados neste estudo como acrônimos dos nomes dos modelos e RCP, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Cenários climáticos sob diferentes RCP para BHTA.

Modelo	RCP	Período	Cenário
HadGEM	4.5	2018-2099	Had4.5
HadGEM	8.5	2018-2099	Had8.5
MIROC	4.5	2018-2099	Miro4.5
MIROC	8.5	2018-2099	Miro8.5

Por fim, com intuito de produzir análises mais robustas, utilizamos de estatística não paramétrica (em virtude da não normalidade natural dos dados) para averiguarmos as tendências e pontos de mudança das séries temporais de energia, para cada cenário investigado na BHTA, usando os testes de Mann-Kendall e Pettitt a nível $\alpha = 0.05$ de significância. Além disso, utilizamos o teste Kolmogorov-Smirnov (KS) para identificarmos se os cenários mais pessimistas seguem a mesma distribuição, em virtude de sua similaridade. Essa abordagem possibilita identificar períodos de mudança na série de dados e os relacionar as problemáticas ambientais do clima e uso da terra. A interpretação de cada teste é destacada no capítulo anterior (Tabela 4). Para melhor entendimentos dos cenários e demais etapas metodológicas construímos o diagrama (Fig. 2) evidenciando o passo a passo da modelagem.

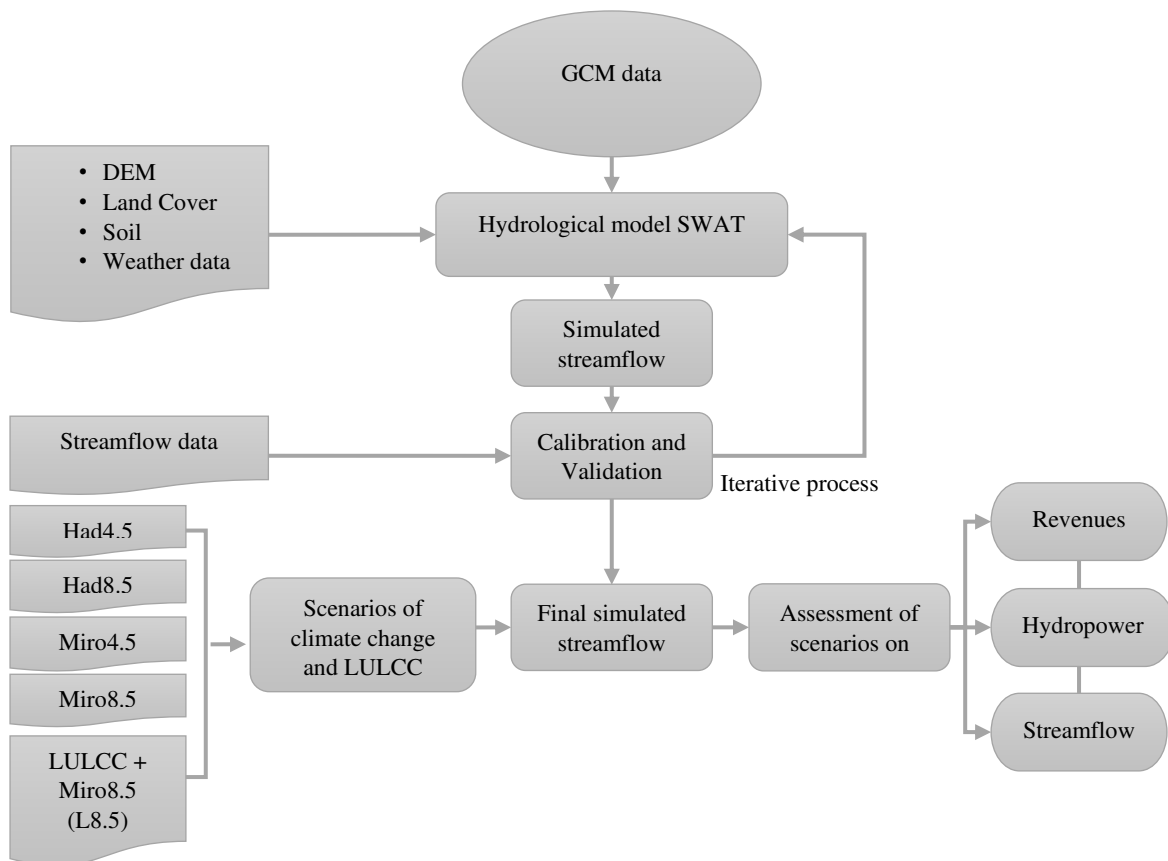


Fig. 2. Diagrama dos passos do modelo SWAT para a estimativa hidrelétrica.

4.2.4. Produção hidrelétrica a partir dos cenários

A saída de energia da linha de base (1979 a 2017) foi obtida da vazão de saída do SWAT para o mesmo período, após a calibração e validação do modelo. Indicadores estatísticos de

desempenho (ver em [36]) foram usados para determinar a correlação do modelo e o desempenho na estimativa de energia na BHTA. Os impactos das mudanças climáticas e LULCC na vazão e produção de energia na bacia foram calculados para cada cenário (tabelas 1 e 2). Usando a Eq. 2 com base em [2,36], determinamos a produção de energia da Bacia Tocantins-Araguaia, especialmente na Usina Hidrelétrica de Tucuruí.

$$E(Q) = \rho g \eta_p \int_0^{\Delta t} H_{(t)} \eta_t Q_{(t)} dt \quad (2)$$

Em que $E(Q)$ [MW] é o potencial de energia elétrica (mensal), $H_{(t)}$ [m] é a diferença entre as alturas dos níveis máximo a montante e mínimo a jusante da barragem (mensal), $Q_{(t)}$ [m³ s⁻¹] é o fluxo simulado (mensal), ρ [kg m³] é a densidade da água, g [m s⁻²] é a aceleração devido à gravidade, η_t é o coeficiente de eficiência da turbina Francis (0,86), e η_p é a eficiência da planta (0,92). É importante destacar que a capacidade mínima de operação da UHT é sob 2.000 m³s⁻¹ de vazão para uma produção energética de ≈ 1.142 MW.

4.2.5. Análise de receitas

Os impactos econômicos das mudanças climáticas e do uso da terra são estimados de acordo com o preço internacional de energia, custos associados à sua produção e variação na taxa de câmbio, de acordo com [11,52–55]. Não está no escopo deste trabalho projetar a longo prazo os preços da eletricidade e suas incertezas associadas. Desta forma, utilizamos como valor base os preços do custo marginal de expansão (CME) a longo prazo, para planos de expansão de capacidade energética do Brasil. Embora nenhuma estimativa do impacto econômico das mudanças climáticas seja exata [11,52,53,56], buscamos usar um método plausível, consistente e de acordo com a realidade regional da BHTA, como segue:

$$R_{t+1} = \sum_{t_0}^{t+1} E_Q \cdot \alpha \cdot \tau \cdot Roy \cdot E_r - C \quad (3)$$

Em que, R_{t+1} é a receita da UHT durante o período de simulação dos cenários (dólar); E_Q é o potencial da energia elétrica (MW) gerada na UHT de acordo com cada cenário, incluindo o baseline; α é o preço médio da geração de energia hídrica; τ é a tarifa atualizada de referência (onde consta todos os impostos relacionado a geração de energia no Brasil); Roy é a porcentagem dos royalties relativos à produção de energia; E_r é a taxa de câmbio entre a moeda brasileira (Real) e o dólar e C é a expansão do custo marginal da eletricidade (ECM). Os impactos nas receitas da

UHT foram estimados para todos os cenários descritos em 2.3, para então compararmos ao atual cenário (baseline).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Destacamos que o modelo SWAT foi anteriormente calibrado e validado na BHTA entre 1979–2000 e 2000–2017, respectivamente, em uma escala mensal por [36], e apresentou um desempenho muito bom (os processos de calibração estão disponíveis no capítulo 2) e os impactos isolados da alteração do uso da terra na hidrologia e energia foram investigados por [5], Cap. 3.

4.3.1. Mudança na vazão e na produção de energia hidrelétrica de acordo com os cenários

A energia renovável, em especial a energia hídrica, é vulnerável às mudanças climáticas e do uso da terra, pois depende das condições climáticas e fisiográficas (decorrentes da variabilidade natural ou das ações antrópicas). As Figuras 3^a, 3B, 3C e 3D caracterizam os cenários de mudança de uso da terra, amplamente discutido em [5]. O impacto dessas mudanças na vazão sazonal somado ao cenário Miro8.5 encontra-se na Fig 3E. A mesma figura também exhibe o impacto na vazão sazonal dos demais modelos climáticos considerando o atual uso do solo, como descrito na seção 2.4.

Na Fig. 3E observamos os efeitos sazonais dos cenários descritos nas tabelas 2 e 3 (os impactos anuais na vazão estão no Anexo B - Fig. A7). É nítido que em todos os cenários projetados há grande impacto na variabilidade sazonal da vazão, especialmente no inverno (déficit de até 98% para Miro8.5 e 97% para L8.5), em comparação ao baseline. Os maiores impactos são para os cenários L8.5 e Miro8.5 em todas as estações do ano (com déficit anual de 74.3 e 73.8%, respectivamente). Por outro lado, os impactos são menores nos cenários climáticos do HadGEM para ambos os RCP (4.5 e 8.5) com déficit anual de 62% e 67% respectivamente. Sazonalmente (verão) as menores reduções são de 28% e 33% para os cenários do HadGEM.

As reduções anuais na vazão são preocupantes, porém o decréscimo sazonal é ainda mais alarmante, a sazonalidade dos sistemas hidrológicos do Brasil, em especial da Amazônia, já é conhecida [17–19]. Assim, em períodos de menor precipitação naturalmente teremos menores vazões.

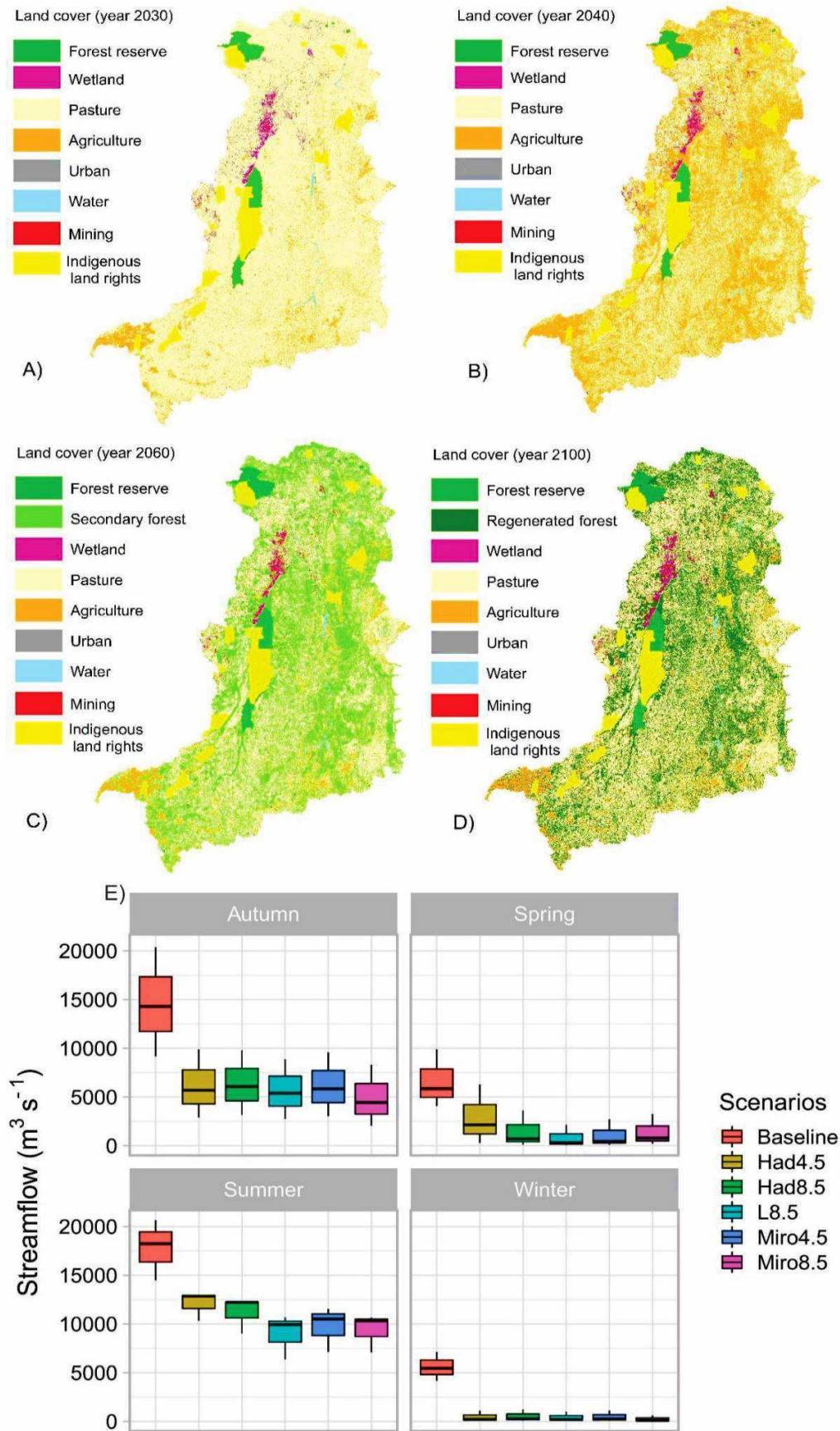


Fig. 3. Cenários de uso da terra e mudanças climáticas [(A) pastagem, (B) agricultura, (C) reflorestamento e (D) floresta e os impactos sobre a vazão (E)] para a BHTA.

Isso pode ser explicado quando consideramos que nesse período os sistemas meteorológicos possuem uma variabilidade maior em termos de frequência e de intensidade de chuvas sobre a BHTA (devido a variabilidade da AB, JBN, ZCAS e SF que durante o verão e outono são mais atuantes), do que os sistemas que atuam nas demais estações do ano. Em contrapartida, no inverno, a variabilidade é menor e observamos menos eventos de chuva (característica do clima tropical continental, como destacado na seção 2.1). Desta forma, a sazonalidade natural somada aos impactos das mudanças climáticas e do LULCC fragilizam ainda mais a hidrologia da BHTA, especialmente para os cenários projetados pelo MIROC e o cenário acoplado L8.5.

Os cenários Miro8.5 e L8.5 são semelhantes em seus resultados sobre a vazão anual e sazonal, e possuem impactos em escalas temporais diferentes em relação a hidrologia. Por exemplo, no inverno o Miro8.5 tem maior déficit em comparação ao L8.5 e ao comparar as reduções mês a mês (Tabelas suplementares no Anexo B Tab. A1 e Tab. A2) o cenário Miro8.5 têm um maior número de meses (maio a dezembro) com redução drástica na vazão. Mesmo que no balanço anual L8.5 tenha maior déficit (0.5% maior que Miro8.5). Do ponto de vista da geração de energia os impactos nas escalas mensais e sazonais são mais preocupantes, pois atingem mais rapidamente a demanda por energia. Na perspectiva ambiental, esses resultados indicam que as alterações regionais de LULCC têm menor impacto na hidrologia da BHTA a longo prazo, em comparação as mudanças climáticas. Pois os cenários de mudanças climáticas já são forçados com alterações globais no LULCC somado a intensificação das emissões dos GEE, desta forma a grande escala se sobrepõe a escala regional e detém o maior impacto.

Os impactos são maiores para os cenários Miro pois o modelo climático MIROC-ESM projeta uma redução drástica da precipitação sobre a Amazônia, especialmente na porção sudeste (onde está localizada a BHTA), de acordo com [57–60]. Essa ocorrência é explicada pelo módulo dinâmico de ecossistemas terrestre (SEIB-DGVM) do MIROC-ESM em que, as o LULCC alteram a estrutura da vegetação e o ciclo do carbono nos ecossistemas terrestres, e por conseguinte modifica as condições de energia e umidade na superfície terrestre. Estes aspectos somados ao CO₂ atmosférico afetam o clima através de processos biofísicos e biogeoquímicos em um feedback superfície-atmosfera [49,57,58].

Por sua vez, este feedback é impulsionado por cenários de LULC baseados em políticas econômicas de desenvolvimento, sustentáveis ou não, tendo como premissa o crescimento populacional e, portanto, o aumento na demanda por áreas agropecuárias [49,58]. Estes cenários de LULC projetam grandes substituições da vegetação nativa para o agronegócio em países em desenvolvimento, no caso do Brasil, as projeções evidenciam o aumento da fronteira agrícola

Amazônia-Cerrado, desencadeando o acréscimo de GEE na atmosfera e perturbando o balanço de energia regional e global, induzindo eventos climáticos extremos de secas e tempestades [49,58,60,61]. Essa substituição em larga escala da Amazônia e Cerrado por pastagens e agropecuária é perigosa e pode impulsionar o tipping point (veja a seção 3.2) da Amazônia [62–66].

Enfatizamos que o modelo HadGEM2-ES utiliza os mesmos cenários de LULC, porém o módulo de ecossistemas terrestre (TRIFFID DGVM) represa a liberação de carbono por mais tempo na superfície, tornando o feedback mais lento [61,67]. Além de não incluir impactos diretos do desmatamento [61]. Em consonância com estes resultados, [68,69] avaliaram cenários sob os RCP (4.5 e 8.5 $W m^{-2}$) e constataram que os menores impactos na vazão ocorrem nos cenários baseados no modelo HadGEM2-ES.

Tendo em vista a dependência intrínseca da energia hidrelétrica em relação aos recursos hídricos, existe uma correlação significativa entre a água disponível e a geração de energia [1,70]. Isto posto, os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra sobre a produção anual de energia foram destacados na Fig.4. Podemos observar a excessiva redução da produção de energia para todos os cenários em comparação com o cenário atual, consequência já esperada devido à redução na vazão. Assim, analisando os plots, somente os cenários Had4.5 e Had8.5 observamos possibilidade de produção de 5,000 MW, com valores máximos de 7,440 MW e 7,031 MW, respectivamente, superiores a mediana do baseline (6,579 MW).

Por outro lado, as menores produções de energia hidrelétrica foram durante os cenários L8.5, Miro8.5 e Miro4.5 nessa ordem, com mediana em 1,397 MW e máximo de energia produzida em 6,088 MW para L8.5. Em seguida o cenário Miro8.5 com produção mediana de 1,515 MW e máximo de energia produzida em 6,082 MW. Por último, o cenário Miro4.5 obteve mediana de 1,642 MW de energia anual e 6,599 MW como máximo produzido. Para os cenários mais pessimistas (Miro8.5 e L8.5) a redução média anual na geração de energia hidrelétrica pode ser de até 63.6% e 63.5% respectivamente. O cenário Miro4.5 indica redução de 60.1%, e os cenários Had4.5 e Had8.5 uma redução de 50.5% e 53.3%, respectivamente. Ainda na Amazônia [8,71], estimam reduções de 60 a 92% na produção de energia em condições de mudanças climáticas e de uso da terra.

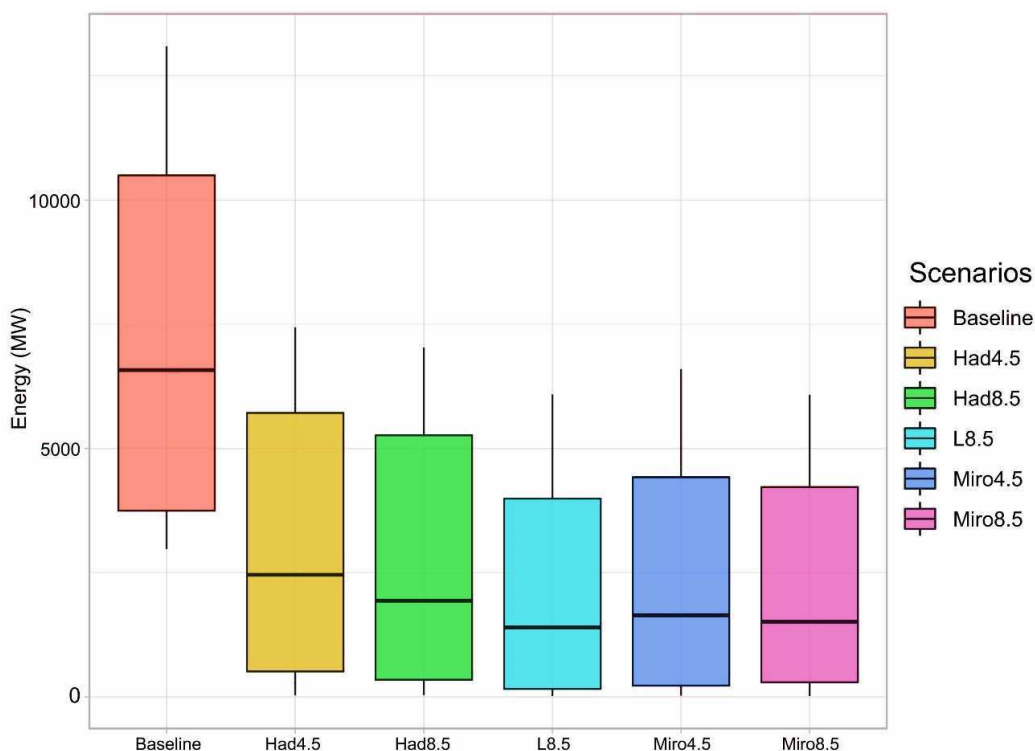


Fig. 4. Variabilidade anual da produção de energia para UHT a partir de cenários de uso da terra e mudança climática.

Similarmente, estudos em diferentes bacias hidrográficas pelo mundo também apontam uma redução na produção de energia no fim deste século [12] na China, [10] na África, [72] no Equador e [73] no EUA. É importante ainda destacar, que além da variabilidade anual de energia gerada sob os cenários descritos em 2.4, a produção energética da BHTA sofrerá uma grande oscilação sazonal (Fig. 5). Como esperado para região, as maiores produções de energia são durante o período chuvoso (verão e outono) do Hemisfério Sul (veja seção 2.1), contudo, a energia produzida em todos os cenários poderá sofrer um déficit de até 56% no verão e 70% no outono, para os cenários L8.5 e Miro8.5, respectivamente. A menor redução na energia gerada na UHT durante o verão ocorre no cenário Had4.5, com decréscimo de até 41%. No outono, o menor déficit foi de 61% para o cenário Had8.5, estando de acordo com a discussão sobre os impactos dos cenários na vazão sazonal da BHTA (seção 3.2), e corroborando com os resultados de [69].

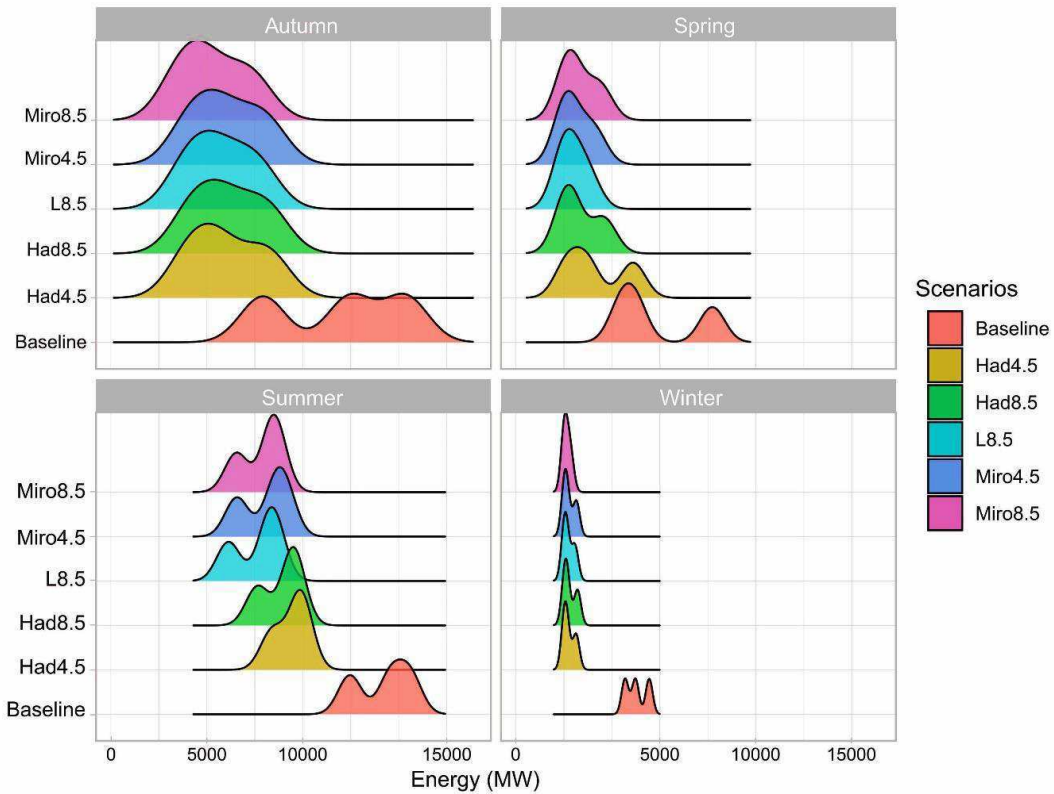


Fig. 5. Produção sazonal de energia de acordo com cenários para BHTA.

Ainda sobre a sazonalidade da energia produzida na BHTA (Fig. 5), estimamos que a UHT enfrentará no inverno seu pior desempenho na geração futura de energia (2018-2099), uma vez que a maior concentração de energia produzida será aproximadamente de 1600 MW, representando uma redução de até 96% para o cenário Miro8. Mesmo para o modelo (HadGEM2-ES) que apresenta um cenário mais úmido [69,71], déficits de 93% e 92% são esperados nos cenários Had4.5 e Had8.5, respectivamente. Em relação a primavera, o cenário Had4.5 foi o que mais se assemelhou ao baseline, atingindo máximo de 5000 MW de produção, onde o segundo grupo de dados de sua distribuição bicaudal coincide com o primeiro grupo dos valores do baseline, mas ainda assim, apresentando uma redução de até 63% em comparação ao baseline. Para essa estação, o cenário mais catastrófico é o L8.5 (apesar de apresentar distribuição semelhante aos cenários Miro4.5 e Miro8.5), em que é esperado uma redução de 90% na produção de energia. Ainda na primavera, reduções de 82, 87 e 83% são esperadas na produção energética dos cenários Had4.5, Miro4.5 e Miro8.5. Já no verão, L8.5 é o mais impactante (56%) e no outono o cenário Miro8.5 representa o maior déficit (70%). Estes resultados vão de acordo com estudos similares para a Amazônia, e.g., [8,52,71] os quais apontaram grandes reduções da produção futura de energia hidrelétrica em decorrência das mudanças climáticas e do uso da terra.

4.3.2. Tendência, ponto de mudança e probabilidade de excedência para cenários

As mudanças climáticas podem exacerbar a vulnerabilidade natural que a geração de energia hidrelétrica enfrenta, especialmente em escala sazonal. Como destacado anteriormente, os cenários Miro8.5 e L8.5 são os mais impactantes para geração de energia na BHTA (anual e sazonal), evidenciando que o acoplamento entre as mudanças climáticas e alterações aceleradas no uso da terra detêm grande impacto na hidrologia e produção de energia. Tais impactos, resultaram no cenário mais pessimista para este estudo, ainda que a diferença entre L8.5 e Miro8.5 seja pequena. Assim, é importante observar a variabilidade anual (Fig. 6) da produção energética sob os cenários. Logo, investigamos as possíveis tendências e mudanças de ponto médio das séries históricas (μ).

Para os cenários de menor impacto Had4.5 e Had8.5 (Fig. 6^a) o teste de Mann-Kendall indicou um p-valor de 0.53 e 0.13, respectivamente, enquanto o teste de homogeneidade indicou 0.38 e 0.27. Logo, apesar dos indícios de que não há tendência nas séries, e que elas são homogêneas sem ponto de mudança, os resultados não possuem uma boa segurança em nível de significância. Estes resultados corroboram com estudo de [74], ao não observar tendência no balanço hídrico médio para a BHTA. Logo, se não há mudança na série de vazão, não haverá mudança da série da produção de energia hídrica.

Para os cenários Miro4.5, Miro 8.5 e L8.5 (Fig. 6B) o teste de Mann-Kendall indicou uma tendência negativa e o de Pettitt indicou que há uma data em que houve uma mudança negativa nos dados alterando a média da série (Tabela 3), ambos para um nível de significância $\alpha=0.05$.

Tabela 3. Testes de Mann-Kendall e Pettitt para cenários futuros de produção de energia na BHTA

Cenário	Mann-Kendall		Pettitt			
	Tendência	p-valor	Média anterior (MW)	Ponto de mudança	Média posterior (MW)	p-valor
Miro4.5	negativa	0.0009	2681	2058	2297	0.0001
Miro8.5	negativa	0.0020	2465	2054	2123	0.0040
L8.5	negativa	0.0020	2450	2055	2114	0.0040

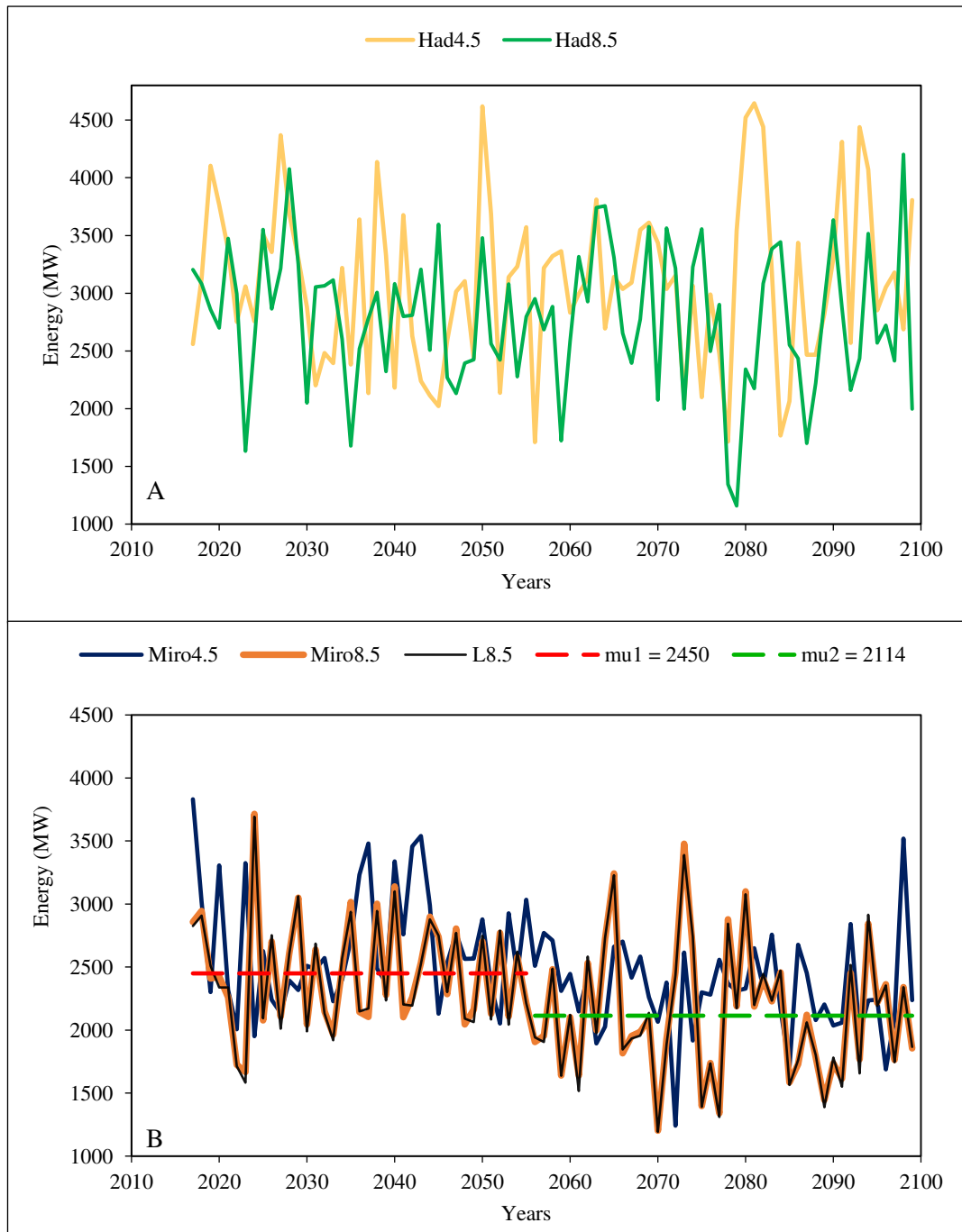


Fig. 6. Série temporal anual de energia sob cenários de mudanças climáticas e LULCC para BHTA. Linha vermelha é a média de energia antes da mudança de ponto e linha verde é a média de energia após a mudança de ponto, ambos para L8.5.

Como pode ser observado, a média da produção de energia dos cenários Miro4.5, Miro 8.5 e L8.5 diminuíram 23.2, 16.7 e 16.1%, respectivamente, e que essa queda ocorre na década de 50 do presente século, corroborando com os resultados de [75] que avaliaram os impactos das mudanças climáticas na hidrologia e futuros empreendimentos hidrelétricos, combinando 25 GCM para a Amazônia.

Além disso, podemos observar um delay da mudança de ponto das médias entre os cenários Miro8.5 e L8.5 que é explicado devido as alterações regionais no uso da terra, e este atraso na resposta da vazão (e conseqüentemente da produção de energia) devido ao LULCC é amplamente esclarecido na literatura [27,75,76]. Como a entrada de água no sistema (precipitação) é a mesma para ambos os cenários, a diferença entre eles consiste no sistema de drenagem da bacia, que no momento de inflexão apontado na Fig. 6 é caracterizado pela cobertura de floresta secundária, mas que anteriormente figurava um cenário propício a um maior escoamento (a princípio pastagem e na seqüência, agricultura) atrasando os efeitos provocados pelas mudanças climáticas na vazão e na produção de energia. Assim, as mudanças climáticas globais irão interferir na quantidade e regularidade temporal da precipitação, enquanto as LULCC afetam o destino dessa precipitação em função das suas interações com a vegetação e o solo [77,78].

Outro ponto fundamental a ser observado é que, na metade do século após a mudança na média das séries para os três cenários (Fig. 6B), a média da energia não retorna ao ponto anterior. Sobretudo em L8.5, pois a partir de 2060 até 2099 este cenário é reflorestado e retorna a cobertura vegetal inicial (veja a Tabela 1), então esperava-se a longo prazo uma diminuição dos impactos neste cenário. Esta descoberta remete aos resultados de [62–64] sobre o tipping point, isto é, a partir de um certo limiar de alterações antrópicas, o ecossistema entra em colapso e não retorna ao seu estado de equilíbrio anterior energético, hidrológico, climático e de biodiversidade [63–65], especialmente em face às projeções do modelo MIROC5.

Este ponto de inflexão também pode ser atribuído aos demais cenários (Miro), pois como discutido na seção 3.1 os cenários de mudanças climáticas são forçados com cenários de substituição de florestas por pastagens e agricultura globalmente. Estes cenários projetam mais de 40% da floresta amazônica alterada para estes usos [58], ultrapassando o limiar crítico de 20% estabelecido por [62,63], colocando em risco a viabilidade hidro-energética futura do Brasil. Sobre estes pontos cabe o questionamento, quais fatores antrópicos (global climate change or LULCC) detêm maior impacto sobre a produção futura de energia? A respeito disso, apresentamos os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov para a frequência acumulativa dos cenários Miro8.5 e L8.5 (Fig. 7). Foi obtido um p-valor de 1.0 para o teste, assim, como o p-valor calculado é maior que o nível de significância $\alpha=0.05$, não se rejeita a hipótese nula de acordo com o teste KS. Ou seja, a distribuição das duas amostras é a mesma.

É observável que as curvas acumuladas são bastante similares. Isto posto, respondendo ao questionamento anterior, de acordo com o teste KS não há diferença significativa entre os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra. Por isso, a longo prazo as mudanças climáticas globais, ou seja, a grande escala pode ser mais impactante que alterações regionais no uso da terra. Porém,

como já evidenciado aqui, o acoplamento entre estes fatores tende a agravar os impactos na hidrologia local e produção de energia.

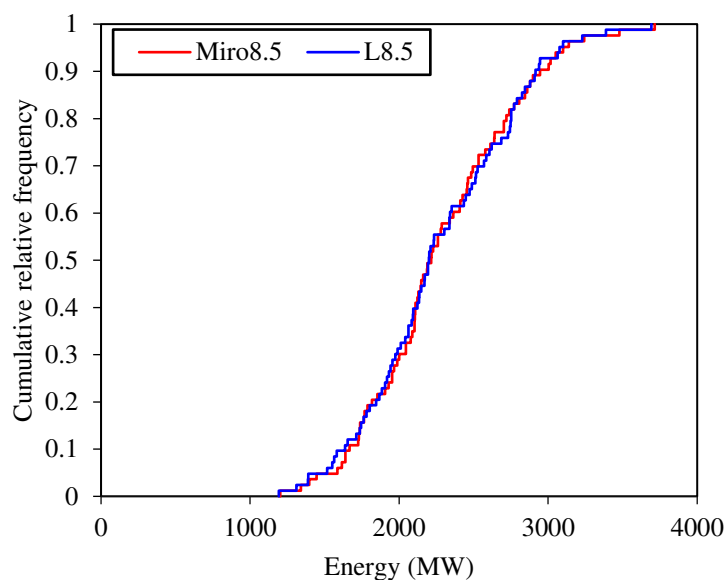


Fig. 7. Frequência acumulada entre os cenários mais pessimistas de vazão e geração de energia

Devido aos grandes impactos na manutenção anual de UHT, é necessário identificar o tempo útil de funcionamento da hidrelétrica devido estes impactos. O cenário histórico (baseline) se destaca entre os demais cenários em que, durante 100% do tempo, temos geração de energia de no mínimo 2900 MW (Fig. 8). Observando os cenários de clima e LULCC e levando em consideração a capacidade de operação da UHT, (vazão mínima necessária de $2,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para uma produção energética de $\approx 1.142 \text{ MW}$, com turbinas regulares e uso múltiplos de água na BHTA [54], todos os cenários seriam capazes de manter a UHT em funcionamento por 58% do ano. Porém, somente o cenário Had4.5 manteria a 67% do tempo, entretanto, por 33% do tempo a UHT não iria operar, além de impactar nos demais usos de água na bacia, sazonalmente isso ocorrerá entre o inverno e primavera (Fig. 3E e Tabela A1 do Anexo B, vazão e energia sazonal por cenários), período de menor precipitação e vazão na bacia.

Em relação aos cenários Miro8.5 e L8.5, por 20% do tempo esses cenários produzirão menos de 120 MW. Para manter essa produção os demais usos de água na bacia estariam em segundo plano, e ainda somente as duas turbinas auxiliares (com capacidade de 22 MW cada a $37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) da UHT poderiam ser utilizadas para gerar essa energia. Desta forma, estes cenários alternam-se como piores cenários para geração de energia e estes impactos são um pouco mais acentuados em L8.5. Ressalta-se que tratamos de cenários socioeconômicos hipotéticos, desta

forma, em um cenário extremo de escassez hídrica, a priorização desse recurso é regida sob a lei federal nº 9.433 (BRASIL, 8 de janeiro de 1997), que objetivamente esclarece que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais.

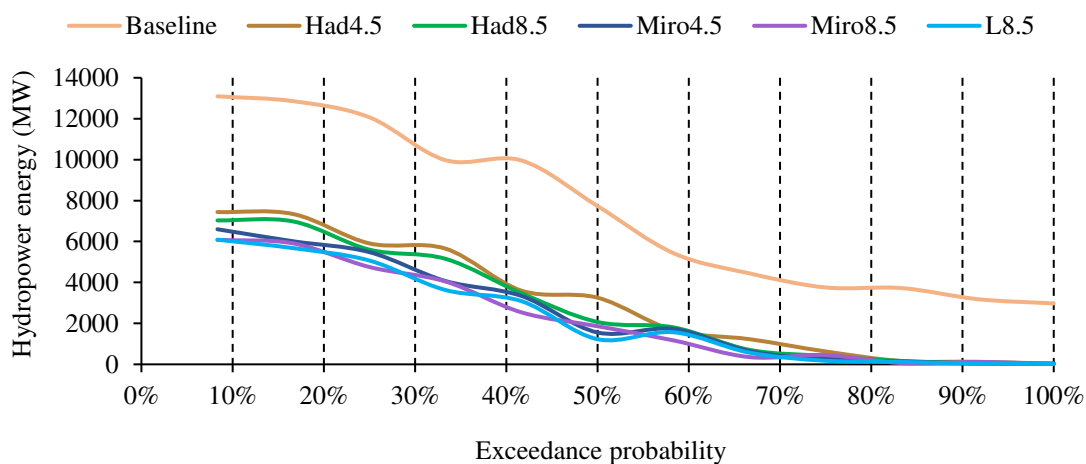


Fig. 8. Curvas de permanência de energia a partir dos cenários para UHT

Ressaltamos ainda que cenários extremos podem não se consolidar tal como projetado pelos modelos, porém o fortalecimento do negacionismo climático é um fator que pode comprometer as metas de redução nas emissões de GEE, tornando real cenários intermediários. Desta forma, reduções exacerbadas na vazão e produção energética podem ocorrer em um cenário mais úmido, por exemplo. Estes achados vão ao encontro de estudos para o Brasil [71,79], e para outros países no mundo e.g. [80,81].

4.3.3 Receitas hidrelétricas em risco devido às mudanças climáticas e do uso da terra

Em conjunto aos impactos na produção de energia estão os impactos econômicos. Se houver um decréscimo na produção de energia, conseqüentemente haverá um aumento no preço da energia devido a menor oferta. Eventualmente isso pode ocasionar problemas no abastecimento energético do país, afetando desde a produção industrial até o bem estar da sociedade. Desta forma, observamos a Fig. 9 destacando a receita anual referente aos cenários estudados aqui, onde de fato o cenário atual (baseline) se destaca entre os cenários de clima e LULCC. Como a assimetria entre as receitas é muito grande (bilhões no baseline contra milhões nos demais cenários), exibimos as figuras 9 e 10 em escala logarítmica.

Sobre o baseline (Fig. 9), todo o montante da receita está em bilhões de dólares, com maior densidade de concentração dos valores está em $1e^{11}$, isso é US \$ $1.62e^{11}$, ao longo de todo o período do cenário atual, estimamos que a UHT teve receita em torno de US\$ 300 bilhões no período de 36 anos (1984-2020). Sobre os cenários climáticos e de uso da terra, no geral a distribuição de densidade das receitas é similar, com máximo de US \$ $8.40e^{08}$ milhões para o cenário Had4.5, enquanto o máximo do Baseline é $3e^{11}$ bilhões, gerando uma diferença de US \$ $2.99e^{11}$ bilhões, percentualmente um déficit de 159% nas receitas entre Baseline e Had4.5, durante o verão na BHTA (Fig. 10).

A menor receita anual é para o cenário Miro8.5 com montante de US \$ 2.010,6 milhões, sazonalmente o cenário L8.5 produz mais energia no inverno em relação ao Miro8.5, por consequência têm maior receita. Desta forma o déficit anual nas receitas foi maior sequencialmente, em L8.5, Miro8.5, Miro4.5, Had8.5, Had4.5 percentualmente com -135, -134, -132, -128 e -117 %, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com [11,52], ao avaliarem perda monetária de até 97,6% a partir da segunda metade do século 21, em decorrência dos impactos climáticos.

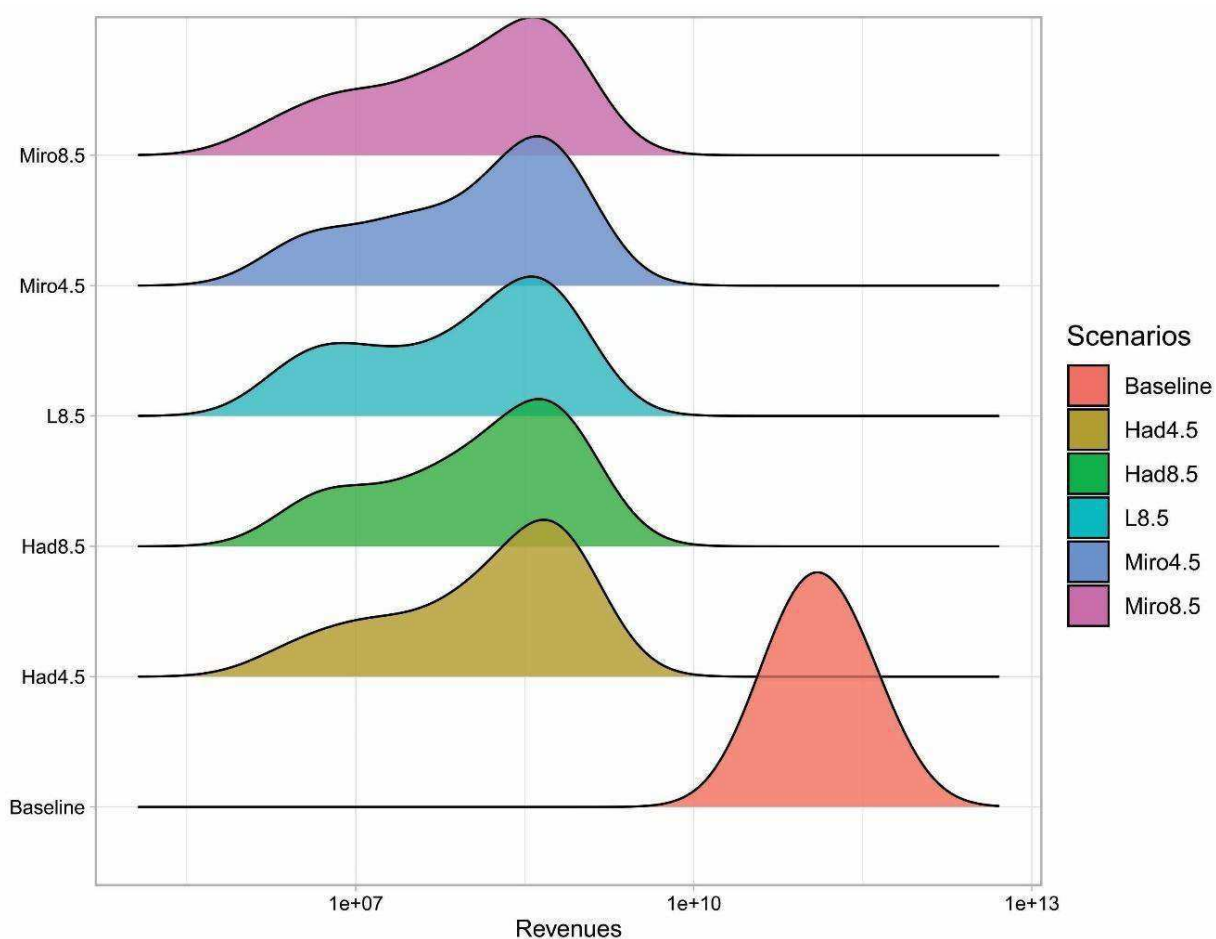


Fig. 9. Receitas anuais da produção hidrelétrica de acordo com os cenários

Assim, as maiores receitas estão durante a maior produção energética (verão e outono. Fig. 10), em que a receita mais expressiva é de US\$ $8.40e^{08}$ milhões para o cenário Had4.5 durante o verão. No outono as variações interquartis são maiores (em comparação ao verão), com maior variação em Miro8.5 apresentando receita mínima mensal de US\$ 2.87,07 em. Já a maior receita do outono é para o cenário Had4.5 faturando US\$ 6.380,8 milhões. Uma variabilidade maior é esperada nas estações de transição, (porém, no inverno a variabilidade foi alta e no outono foi baixa) durante o inverno a maior receita é para o cenário Had8.5 (US \$ 4.240,06 milhões), seguido de Had4.5 (US \$ $3.2e^{06}$ milhões). As menores receitas estão em Miro8.5 e L8.5 com receitas de $2e^{06}$ e $2.5e^{06}$ bilhões de dólares americanos, respectivamente. Com a substituição das florestas por pastagem e agricultura, é esperado um aumento na vazão e produção de energia no inverno, por consequência no faturamento, tais aspectos já foram explorados por [5].

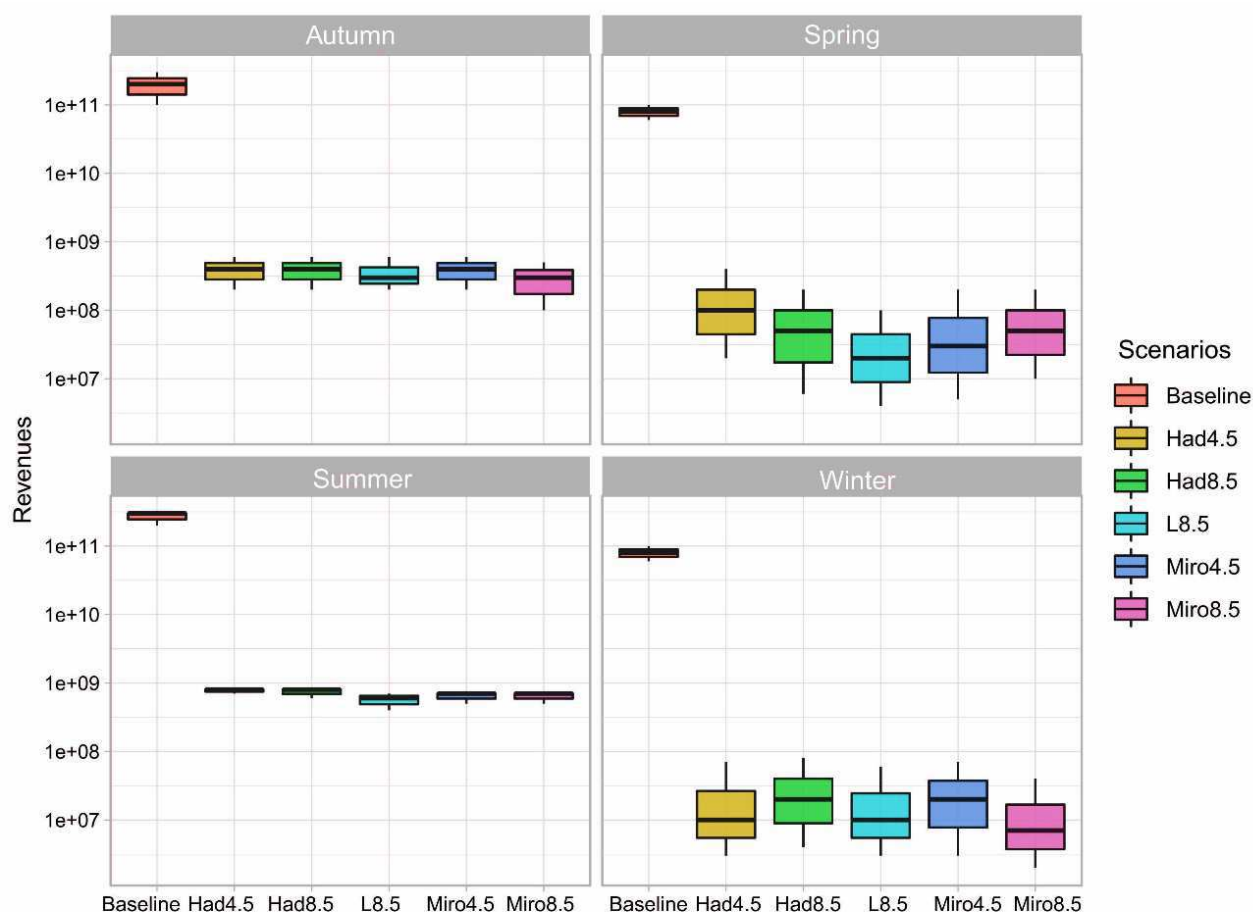


Fig. 10. Variabilidade sazonal das receitas de acordo com os cenários para BHTA

Por fim, na primavera é esperado que o maior rendimento monetário seja de US \$ $4.1e^{08}$ milhões para Had4.5, e a menor receita para o cenário L8.5 com rendimento de US \$ $1.39e^{08}$

milhões. Sobre isso, [82] realizou uma análise hidroeconômica continental para a África, sob incerteza das mudanças climáticas. Na Europa, [83] investigou a mudança nos preços da produção energética para Suíça, sob cenários de três modelos diferentes. Em contrapartida, [53], apresentou benefícios monetários sob a perspectiva das mudanças climáticas para duas bacias na Ásia.

4.4. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma abordagem de modelagem integrada para avaliar os efeitos separados e combinados do uso da terra e mudanças climáticas sobre a produção de energia hidrelétrica bem como nas receitas de energia para a bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia, sudeste da Amazônia. Os resultados mostram que os dois componentes ambientais, clima e uso da terra quando estressados por componentes antrópicas, devem afetar a vazão, energia e receitas da seguinte forma:

(1) Avaliamos que haverá grandes reduções na vazão anual e sazonal para todos os cenários, em comparação com baseline. Os impactos na vazão são mais proeminentes nos cenários L8.5 com redução anual de 74%, enquanto no inverno o cenário Miro8.5 reduz até 98% da vazão. Menores reduções na vazão são esperadas para os cenários do modelo HadGEM-ES.

(2) Sobre a produção hidrelétrica, reduções drásticas são esperadas até o final do século 21 para todos os cenários de clima e uso da terra. O cenário mais pessimista é o L8.5, com uma redução média anual de 63.6% na geração de energia. Seguido do cenário Miro8.5 e Miro4.5 com 63.4% e 60.1% respectivamente. Em comparação ao cenário atual, o menor impacto será sob o cenário Had4.5 com decaimento de 50.5% na produção anual de energia para a BHTA.

(3) Os resultados estatísticos evidenciam que os impactos na vazão e produção hidrelétrica sofreram uma redução ainda maior a partir da segunda metade do século. De acordo com os testes de Mann-Kendall e Pettitt, os cenários Miro4.5, Miro8.5 e L8.5 têm tendências significativas e negativas, sugerindo uma diminuição dos valores médios das séries e estas apresentam uma mudança de ponto das médias nesses cenários. O cenário Miro4.5 têm um ponto de mudança em 2059, já o cenário Miro8.5 o ponto de mudança da média na série é em 2055 e 2056 para o cenário L8.5. O atraso na mudança da média em L8.5 é justificada pelas alterações regionais no uso da terra. Por fim, destacamos que não há diferença significativa entre os cenários Miro8.5 e L8.5, de acordo com teste Kolmogorov-Smirnov os cenários seguem a mesma distribuição. Evidenciando que a longo prazo as mudanças climáticas globais podem ter impacto maior sobre a hidrologia regional da BHTA do que as LULCC, por causa da redução na entrada de água no sistema, a precipitação.

(4) A receita com a venda de energia na usina hidrelétrica de Tucuruí terá déficits expressivos de acordo com os cenários propostos por este estudo. A menor perda de receita é esperada para o cenário Had4.5 com redução anual de -117 %, enquanto os cenários mais impactantes são L8.5 e Miro8.5 com déficit de -135% e -134 ao ano, respectivamente. Enquanto a maior receita do baseline está com montante em US \$ 3.1 bilhões, o cenário com menor impacto

tem receita de US \$ 8,4 milhões. Tais impactos econômicos, implicam em maiores preços de energia ao mercado consumidor aumentando a pressão sobre os valores finais de produtos e serviços nos diversos setores da sociedade, ampliando as desigualdades.

A matriz energética brasileira depende fortemente da produção hidrelétrica na região amazônica, uma vez que o sistema elétrico nacional é interligado, ou seja, uma diminuição substancial das descargas dos rios e uma alteração sazonal da vazão podem comprometer a produção e distribuição energética nacional, ameaçando assim a segurança energética do Brasil. Este estudo também pode servir de base para tomadores de decisão na formulação de políticas públicas e no planejamento sob os aspectos das mudanças do clima e do uso da terra em bacias hidrográficas tropicais.

4.5. REFERENCIAS

- [1] Teotónio C, Fortes P, Roebeling P, Rodriguez M, Robaina-Alves M. Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;74:788–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.002>.
- [2] IEA. *World Energy Outlook 2020 – Analysis*. Paris: 2020.
- [3] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: 2021.
- [4] EPE - Energy research company. *Ten Year Energy Expansion Plan 2027*. Brasilia: 2018.
- [5] de Oliveira Serrão EA, Silva MT, Ferreira TR, de Paulo Rodrigues da Silva V, de Salviano de Sousa F, de Lima AMM, et al. Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Sci Total Environ* 2020;744:140981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140981>.
- [6] Stickler CM, Coe MT, Costa MH, Nepstad DC, McGrath DG, Dias LCP, et al. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc Natl Acad Sci* 2013;110:9601–6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>.
- [7] Dorber M, May R, Verones F. Modeling Net Land Occupation of Hydropower Reservoirs in Norway for Use in Life Cycle Assessment. *Environ Sci Technol* 2018;52:2375–84. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05125>.
- [8] Arias ME, Farinosi F, Lee E, Livino A, Briscoe J, Moorcroft PR. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nat Sustain* 2020;3:430–6. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-y>.
- [9] Costa MH. When more trees mean more power. *Nat Sustain* 2020;3:410–1. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0511-z>.
- [10] Obahoundje S, Ofosu E, Akpoti K, Kabo-bah A. Land Use and Land Cover Changes under Climate Uncertainty: Modelling the Impacts on Hydropower Production in Western Africa. *Hydrology* 2017;4:2. <https://doi.org/10.3390/hydrology4010002>.
- [11] de Queiroz AR, Faria VAD, Lima LMM, Lima JWM. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. *Renew Energy* 2019;133:873–82. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>.

- [12] Li J, Wang Z, Wu X, Ming B, Chen L, Chen X. Evident response of future hydropower generation to climate change. *J Hydrol* 2020;590:125385. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125385>.
- [13] Guo Y, Fang G, Xu Y-P, Tian X, Xie J. Responses of hydropower generation and sustainability to changes in reservoir policy, climate and land use under uncertainty: A case study of Xinanjiang Reservoir in China. *J Clean Prod* 2021;281:124609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124609>.
- [14] Jipp PH, Nepstad DC, Cassel DK, de Carvalho CR. Deep Soil Moisture Storage and Transpiration in Forests and Pastures of Seasonally-Dry Amazonia. *Potential Impacts Clim. Chang. Trop. For. Ecosyst.*, Dordrecht: Springer Netherlands; 1998, p. 255–72. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2730-3_11.
- [15] Nepstad D, Soares-Filho BS, Merry F, Lima A, Moutinho P, Carter J, et al. The End of Deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* (80-) 2009;326:1350–1. <https://doi.org/10.1126/science.1182108>.
- [16] Lamparter G, Nobrega RLB, Kovacs K, Amorim RS, Gerold G. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. *Reg Environ Chang* 2018;18:91–103. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1015-2>.
- [17] Soares-Filho BS, Nepstad DC, Curran LM, Cerqueira GC, Garcia RA, Ramos CA, et al. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 2006;440:520–3. <https://doi.org/10.1038/nature04389>.
- [18] Coe MT, Costa MH, Soares-Filho BS. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J Hydrol* 2009;369:165–74. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>.
- [19] Pontes PRM, Cavalcante RBL, Sahoo PK, Silva Júnior RO da, da Silva MS, Dall’Agnol R, et al. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. *J Environ Manage* 2019;235:489–99. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.090>.
- [20] Cavalcante RBL, Pontes PRM, Souza-Filho PWM, Souza EB. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. *Water Resour Res* 2019;55:3092–106. <https://doi.org/10.1029/2019WR025083>.

- [21] Vinca A, Riahi K, Rowe A, Djilali N. Climate-Land-Energy-Water Nexus Models Across Scales: Progress, Gaps and Best Accessibility Practices. *Front Environ Sci* 2021;9:691523. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.691523>.
- [22] John Devlin SM. *The Routledge handbook of comparative rural policy*. 1st Editio. London, United Kingdom: Routledge; 2019. <https://doi.org/10.4324/9780429489075>.
- [23] Field CB, Michalak AM. Water, Climate, Energy, Food: Inseparable & Indispensable. *Daedalus* 2015;144:7–17. https://doi.org/10.1162/DAED_a_00337.
- [24] SEEG. ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS METAS DE CLIMA DO BRASIL. São Paulo: 2020.
- [25] BNDES. *The Growth of the Brazilian Economy 2018–2023*. Brasilia: 2019.
- [26] Kusre BC, Baruah DC, Bordoloi PK, Patra SC. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Appl Energy* 2010;87:298–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>.
- [27] Hunke P, Mueller EN, Schröder B, Zeilhofer P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. *Ecohydrology* 2015;8:1154–80. <https://doi.org/10.1002/eco.1573>.
- [28] de Paulo Rodrigues da Silva V, Silva MT, Singh VP, de Souza EP, Braga CC, de Holanda RM, et al. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *CATENA* 2018;162:166–76. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>.
- [29] Dos Santos V, Laurent F, Abe C, Messner F. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water* 2018;10:429. <https://doi.org/10.3390/w10040429>.
- [30] Abe C, Lobo F, Dibike Y, Costa M, Dos Santos V, Novo E. Modelling the Effects of Historical and Future Land Cover Changes on the Hydrology of an Amazonian Basin. *Water* 2018;10:932. <https://doi.org/10.3390/w10070932>.
- [31] Silva AKL, Sousa AML de, Santos JTS dos, Villela JM, Martorano LG, Crestana S. Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon. *Ao Bras Eng Agrícola e Ambient* 2018;22:344–8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p344-348>.
- [32] Teklay A, Dile YT, Asfaw DH, Bayabil HK, Sisay K. Impacts of Climate and Land Use

- Change on Hydrological Response in Gumara Watershed, Ethiopia. *Ecohydrol Hydrobiol* 2021;21:315–32. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.001>.
- [33] Pandey A, Lalrempuia D, Jain SK. Assessment of hydropower potential using spatial technology and SWAT modelling in the Mat River, southern Mizoram, India. *Hydrol Sci J* 2015;60:1651–65. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943669>.
- [34] Kumar A, Sharma MP. A modeling approach to assess the greenhouse gas risk in Koteswar hydropower reservoir, India. *Hum Ecol Risk Assess An Int J* 2016;22:1651–64. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1209077>.
- [35] Torabi Haghighi A, Darabi H, Shahedi K, Solaimani K, Kløve B. A Scenario-Based Approach for Assessing the Hydrological Impacts of Land Use and Climate Change in the Marboreh Watershed, Iran. *Environ Model Assess* 2020;25:41–57. <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09665-x>.
- [36] de Oliveira Serrão EA, Silva MT, Ferreira TR, de Ataíde LCP, Wanzeler RTS, da Silva V de PR, et al. Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. *Ecohydrol Hydrobiol* 2021;21:23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.09.002>.
- [37] Falck AS, Maggioni V, Tomasella J, Vila DA, Diniz FLR. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. *J Hydrol* 2015;527:943–57. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>.
- [38] Reboita MS, Gan MA, Rocha RP Da, Ambrizzi T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev Bras Meteorol* 2010;25:185–204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.
- [39] S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry JRW. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2009. Austin- College Station: 2011.
- [40] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans ASABE* 2012;55:1491–508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>.
- [41] Gassman PW, Sadeghi AM, Srinivasan R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *J Environ Qual* 2014;43:1–8. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>.

- [42] Balkhair KS, Rahman KU. Sustainable and economical small-scale and low-head hydropower generation: A promising alternative potential solution for energy generation at local and regional scale. *Appl Energy* 2017;188:378–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.012>.
- [43] Edivaldo Afonso de Oliveira S, Madson Tavares S, Thomás Rocha F, Lorena Conceição P de A, Cleber A dos S, Aline Maria M de L, et al. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *Int J Sediment Res* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.002>.
- [44] Meehl GA, Goddard L, Murphy J, Stouffer RJ, Boer G, Danabasoglu G, et al. Decadal Prediction. *Bull Am Meteorol Soc* 2009;90:1467–86. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2778.1>.
- [45] Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull Am Meteorol Soc* 2012;93:485–98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- [46] Hempel S, Frieler K, Warszawski L, Schewe J, Piontek F. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth Syst Dyn* 2013;4:219–36. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>.
- [47] Abbaspour KC, Vaghefi SA, Yang H, Srinivasan R. Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Sci Data* 2019;6:263. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0282-4>.
- [48] Ashraf Vaghefi S, Abbaspour N, Kamali B, Abbaspour KC. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environ Model Softw* 2017;96:181–98. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033>.
- [49] Hurtt GC, Chini LP, Frohking S, Betts RA, Feddema J, Fischer G, et al. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Clim Change* 2011;109:117–61. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0153-2>.
- [50] IPCC. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019.
- [51] N. Pai, D. Saraswat. SWAT2009_LUC: A Tool to Activate the Land Use Change Module

- in SWAT 2009. *Trans ASABE* 2011;54:1649–58. <https://doi.org/10.13031/2013.39854>.
- [52] Mendes CAB, Beluco A, Canales FA. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. *Energy* 2017;141:123–38. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.071>.
- [53] Mishra SK, Veselka TD, Prusevich AA, Grogan DS, Lammers RB, Rounce DR, et al. Differential Impact of Climate Change on the Hydropower Economics of Two River Basins in High Mountain Asia. *Front Environ Sci* 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00026>.
- [54] AO - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Manual de Procedimentos da Operação. Brasília: 2020.
- [55] ANELL. No Title Monitoring Reports on the Expansion of the Electricity Generation Offering. Brasília: 2018.
- [56] Tol RSJ. The Economic Impacts of Climate Change. *Rev Environ Econ Policy* 2018;12:4–25. <https://doi.org/10.1093/reep/rex027>.
- [57] Sato H, Itoh A, Kohyama T. SEIB–DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecol Modell* 2007;200:279–307. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.006>.
- [58] Watanabe S, Hajima T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci Model Dev* 2011;4:845–72. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>.
- [59] Ahlström A, Canadell JG, Schurgers G, Wu M, Berry JA, Guan K, et al. Hydrologic resilience and Amazon productivity. *Nat Commun* 2017;8:387. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00306-z>.
- [60] Chai Y, Martins G, Nobre C, von Randow C, Chen T, Dolman H. Constraining Amazonian land surface temperature sensitivity to precipitation and the probability of forest dieback. *Npj Clim Atmos Sci* 2021;4:6. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00162-1>.
- [61] Jones CD, Hughes JK, Bellouin N, Hardiman SC, Jones GS, Knight J, et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci Model Dev* 2011;4:543–70. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>.
- [62] Nobre CA, Sellers PJ, Shukla J. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *J*

- Clim 1991;4:957–88. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2).
- [63] Nobre CA, Sampaio G, Borma LS, Castilla-Rubio JC, Silva JS, Cardoso M. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc Natl Acad Sci* 2016;113:10759–68. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>.
- [64] Lovejoy TE, Nobre C. Amazon Tipping Point. *Sci Adv* 2018;4:eaat2340. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.
- [65] Amigo I. When will the Amazon hit a tipping point? *Nature* 2020;578:505–7. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00508-4>.
- [66] Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Marcia Macedo, Žiga Malek, Peter H. Verburg, Sean Goodwin, Renato Vargas, Ludmila Rattis, Paulo M. Brando, Michael T. Coe, Christopher Neill ODM. An Amazon Tipping Point: The Economic and Environmental Fallout. 2021.
- [67] Cox PM. Description of the TRIFFID dynamic global vegetation model. UK: 2001.
- [68] de Oliveira VA, de Mello CR, Beskow S, Viola MR, Srinivasan R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecol Eng* 2019;133:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>.
- [69] Farinosi F, Arias ME, Lee E, Longo M, Pereira FF, Livino A, et al. Future Climate and Land Use Change Impacts on River Flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. *Earth's Futur* 2019;7:993–1017. <https://doi.org/10.1029/2019EF001198>.
- [70] Rübhelke D, Vögele S. Short-term distributional consequences of climate change impacts on the power sector: who gains and who loses? *Clim Change* 2013;116:191–206. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0498-1>.
- [71] Mohor GS, Rodriguez DA, Tomasella J, Siqueira Júnior JL. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *J Hydrol Reg Stud* 2015;4:41–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>.
- [72] Carvajal PE, Li FGN, Soria R, Cronin J, Anandarajah G, Mulugetta Y. Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty: Modelling power sector pathways for Ecuador. *Energy Strateg Rev* 2019;23:86–99. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.008>.

- [73] Tarroja B, Forrest K, Chiang F, AghaKouchak A, Samuelsen S. Implications of hydropower variability from climate change for a future, highly-renewable electric grid in California. *Appl Energy* 2019;237:353–66. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.079>.
- [74] Ruffato-Ferreira V, da Costa Barreto R, Oscar Júnior A, Silva WL, de Berrêdo Viana D, do Nascimento JAS, et al. A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: Hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72:1124–37. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.020>.
- [75] Nepstad D, McGrath D, Stickler C, Alencar A, Azevedo A, Swette B, et al. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* (80-) 2014;344:1118–23. <https://doi.org/10.1126/science.1248525>.
- [76] Op de Hipt F, Diekkrüger B, Steup G, Yira Y, Hoffmann T, Rode M, et al. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catch-ment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. *Sci Total Environ* 2019;653:431–45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>.
- [77] Staal A, Flores BM, Aguiar APD, Bosmans JHC, Fetzer I, Tuinenburg AO. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ Res Lett* 2020;15:044024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>.
- [78] Gatti L V., Basso LS, Miller JB, Gloor M, Gatti Domingues L, Cassol HLG, et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 2021;595:388–93. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.
- [79] de Oliveira VA, de Mello CR, Viola MR, Srinivasan R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *Int J Climatol* 2017;37:5005–23. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>.
- [80] Bekri ES, Economou P, Yannopoulos PC, Demetracopoulos AC. Reassessing Existing Reservoir Supply Capacity and Management Resilience under Climate Change and Sediment Deposition. *Water* 2021;13:1819. <https://doi.org/10.3390/w13131819>.
- [81] Bahati HK, Ogenrwoth A, Sempewo JI. Quantifying the potential impacts of land-use and climate change on hydropower reliability of Muzizi hydropower plant, Uganda. *J Water Clim Chang* 2021. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.273>.

- [82] Kahil T, Parkinson S, Satoh Y, Greve P, Burek P, Veldkamp TIE, et al. A Continental-Scale Hydroeconomic Model for Integrating Water-Energy-Land Nexus Solutions. *Water Resour Res* 2018;54:7511–33. <https://doi.org/10.1029/2017WR022478>.
- [83] Savelsberg J, Schillinger M, Schlecht I, Weigt H. The Impact of Climate Change on Swiss Hydropower. *Sustainability* 2018;10:2541. <https://doi.org/10.3390/su10072541>.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Os impactos das alterações na dinâmica do uso e cobertura da terra e mudanças climáticas foram investigados sobre os aspectos da hidrologia e produção de energia hidrelétrica. Desenvolvemos uma rotina de simulações no modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia. Através da análise de sensibilidade e parametrização foi possível calibrar o modelo com sucesso e estimar adequadamente a vazão da BHTA. Calculamos a produção de energia na usina hidrelétrica de Tucuruí a partir da vazão observada e simulada, para então construirmos os cenários (isolados e em conjunto) de LULCC e mudanças climáticas.

É esperado um aumento de 36% na vazão da BHTA até a metade do século, em virtude de um aumento de 15% no escoamento superficial e redução de 3.5% na evapotranspiração, de acordo com os cenários (C3) isolados de uso da terra. Em virtude disso, a produção mensal de energia será maior (9% em agosto) nos meses de menor precipitação (inverno e parte da primavera do HS). Contrastando isso, a produção hidrelétrica sofrerá impactos significativos nos meses mais úmidos (verão e outono), com perda acumulada de 75% na produção de energia, somente no mês de abril há uma redução de 30% na geração de energia, de acordo com os cenários aqui sugeridos. Ainda que exista um aumento na energia produzida na UHT em alguns meses, no balanço anual houve uma redução de 65% na energia gerada.

Ainda que exista maior disponibilidade de água para a UHT, a usina não comporta o excesso de vazão, que aumentará em média 26% em relação a vazão média de produção atual, de modo que o nível máximo que a barragem pode acomodar seja ultrapassado, provocando a abertura das comportas da usina hidrelétrica, e conseqüentemente não há geração energia. Na hipótese que a barragem suportasse o excesso de água, ainda há perdas na geração de energia com o aumento nas vazões máximas e média em consequência da ineficiência das turbinas. Pois a turbina Francis iria operar fora da vazão do projeto da UHT.

Ao que diz respeito aos cenários de clima e LULCC, estimar-se que haverá reduções exacerbadas na vazão para todos os cenários. Para o cenário mais pessimista (acoplamento mudanças climáticas + LULCC – L8.5) foi simulado uma diminuição anual de 74% na vazão e sazonal de 98% durante o inverno, em comparação com baseline. Menores reduções na vazão são esperadas para os cenários do modelo HadGEM-ES, que se mostrou mais úmido para a BHTA.

Como existe uma dependência intrínseca entre a água disponível e a produção hidrelétrica, o setor energético (UHT) também será seriamente impactado. Déficit de 63.6% é esperado até o

final do século, para o cenário mais pessimista (L8.5). O menor impacto será sob o RCP 4.5 do modelo HadGEM-ES, com decaimento de 50.5% na produção anual de energia para a UHT.

Utilizando estatística não paramétrica procuramos comparar qual alteração ambiental é mais danosa a produção de energia; LUCC regional ou as Mudanças climáticas globais. Em virtude do cenário acoplado mudança no clima e uso da terra não ter diferença significativa e seguir a mesma distribuição que o cenários isolado de LULCC. Concluímos que a longo prazo as mudanças climáticas globais podem ter impacto maior sobre a hidrologia regional da BHTA do que as LULCC regional, por causa da redução na entrada de água no sistema. Embora alguns cenários de mudança no uso da terra parcialmente suavizem a tendência de diminuição da vazão impulsionada pelo clima no período de maior precipitação, há uma redução acentuada da vazão durante a estação seca, agravando a variabilidade sazonal e interanual.

Por fim, o faturamento econômico com a venda de energia da UHT terá impactos negativos expressivos, de acordo com os cenários aqui destacados. Pois a venda de energia depende da produção desta e em virtude da diminuição da vazão, menos energia poderá ser comercializada. Déficit de 135% ao ano na receita da UHT para o cenário mais pessimista, que sofrerá queda de 63% na geração de eletricidade por exemplo. A menor perda de receita é esperada para o cenário Had4.5 com redução anual de -117 %, ainda assim, ao comparar com a receita do baseline com montante em US \$ 3.1 bilhões, o cenário com menor impacto tem receita de US \$ 8.4 milhões.

Os resultados expostos aqui são baseados em cenários e detêm grandes incertezas, porém se algum cenário, mesmo que parcialmente, se concretizar poderá ampliar problemáticas econômicas e ambientais, como: intensificar a inflação do País, em virtude do aumento dos preços da energia afetando os diversos setores produtivos da sociedade; Piora na imagem do país a vista das grandes economias globais, acarretando em uma diminuição de investimentos externos no Brasil; Além de todos os impactos ambientais já descritos aqui, que certamente irão impactar muito mais os menos desfavorecidos. Ou seja, o avanço do desmatamento e a intensificação das mudanças climáticas não trará benefício a ninguém.

5.1. Limitações SWAT

Essa seção apresenta as principais limitações encontradas na literatura e evidenciadas ao longo deste trabalho. Essa seção se faz importante em virtude do aumento de usuários do modelo SWAT, que muitas vezes encontram barreiras em sua modelagem e não tem um norte para entender esses percalços do SWAT. Dividimos essa seção em duas etapas. A primeira etapa é a visão deste autor, sobre as limitações do SWAT. A segunda etapa é a ótica de alguns autores listados na literatura do modelo.

Sob a perspectiva do autor.

- O SWAT ao longo dos anos foi se aprimorando e muitos problemas descritos no passado foram corrigidos. Porém destaca-se que para aquele que pretendem utilizar o “aplicativo” do SWAT em ambiente SIG, o Arc-SWAT. Deve ter em mente que é fundamental o domínio deste ambiente de geoprocessamento. Pós todas as entradas do modelo no ArcGIS são de forma vetorial ou rasterizada. Sendo necessário um pré-processamento dos dados, como o MDE, tipologia de solo e uso e cobertura da terra em sua área de estudo;
- O modelo requer valores diários de dados climatológicos, como precipitação e radiação global. Porém, em uma realidade brasileira em que há uma baixa densidade de estações e ainda pouca disponibilidade de dados nesse passo temporal, muitas vezes os usuários utilizam de Reanálises para suprir essa necessidade. E como previsto, esses dados têm seus erros de VIES e normalmente isso é refletido na simulação. Acarretando em mais trabalho na etapa de calibração do SWAT;
- Atualmente o SWAT utiliza dois métodos de propagação de água no canal, o primeiro utiliza a equação de manning para estimar a vazão que se propaga no canal. E o segundo e mais recente é o método de muskingum. Entender esses métodos é fundamental para uma boa modelagem. A metodologia de manning deve ser mais adequado a modelagens que o usuário irá a campo fazer observações e medições como o coeficiente de manning, o raio hidráulico, largura e profundidade do canal. Isso é importante pois esses parâmetros morfológicos de cada rio são pré-estabelecidos no começo da modelagem através do MDE e estão sujeitos a grandes erros. O segundo método é mais adequado quando tratamos de grandes bacias e normalmente o modelador não vai a campo. Na metodologia de muskingum os parâmetros de morfologia dos rios são importantes, e devem ser ajustados pelo modelador. Porém, essa informação pode ser ajustada pelo modelador através de dados medidos nas estações da ANA, como altura e profundidade da seção transversal,

área molhada e outros dados que estão disponíveis no passo diário de tempo. É muito importante destacar que no ArcSWAT, o método de manning é o escolhido pelo modelo como Default.

Na literatura é evidenciado por Oliveira (1999) e Marcon (2013) que o modelo SWAT tem algumas limitações:

- O comportamento logarítmico do parâmetro Curva Número (CN) não permite ao modelo responder as alterações da cobertura do solo quando a bacia hidrográfica não apresenta uma grande impermeabilização; Esse problema é mais evidente em bacias de pequeno porte, mais especificamente bacias urbanas.
- O modelo utiliza a MUSLE para a estimativa da produção de sedimento na bacia, contudo sabe-se que este não é um método calcular erosão e sim de perda de solo que se processa prioritariamente como erosão laminar, ou seja, desagregação de solo no escoamento superficial, não considerando outros tipos de erosão como a erosão em voçorocas e barrancos;
- O valor do fator de uso e manejo do solo (C) adotado para floresta é 0,001 um valor considerado alto para florestas tropicais, o modelo hidrológico SWAT apresenta uma limitação de três casas decimais, na sua entrada de dados;
- As equações utilizadas na propagação do sedimento no canal são relativamente simples, assumindo que as dimensões do canal são constantes ao longo do tempo.

Outro fator que é fundamental na modelagem é que o modelador tenha o pleno conhecimento da hidroclimatologia de sua área de estudo, o modelo irá fornecer resultados de acordo com os dados inseridos pelo usuário. Logo é suma importância a conferência antecipada de todos os dados, principalmente os climatológicos.

ANEXO A

(Artigos publicados e Artigo extra)

Artigo-1: Referente ao Capítulo 2

Ecohydrology & Hydrobiology 21 (2021) 23–35



Contents lists available at ScienceDirect

Ecohydrology & Hydrobiology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecohyd

Original Research Article

Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed



Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão^{a,*}, Madson Tavares Silva^a,
 Thomás Rocha Ferreira^a, Lorena Conceição Paiva de Ataíde^a,
 Romero Thiago Sobrinho Wanzeler^a, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva^a,
 Aline Maria Meiguins de Lima^b, Francisco de Assis Salviano de Sousa^a

^aAcademic Unit of Atmospheric Sciences, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil^bInstitute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, PA, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 January 2020

Revised 26 July 2020

Accepted 8 September 2020

Available online 20 September 2020

Keywords:

Tropical basin

Simulated flow

Hydropower plant

Energy potential

ABSTRACT

Study area: Watershed of the Tocantins-Araguaia River.

Focus of the study: Given the large discharge of rivers in Tocantins-Araguaia Watershed (TAW) and consequently a great potential for hydropower generation, we used the SWAT model to simulate the streamflow of the TAW and investigated its energy potential.

New approaches to local hydrology: Our goal is to use the flow estimated by SWAT to simulate the energy potential at the Tucuruí hydropower plant in Tocantins-Araguaia River, Pará, Brazil. We identified that in SWAT calibration some parameters are more sensitive to water processes than others, hence allowing the improvement of simulation in the TAW. The validation of the model showed that the simulated results were consistent with the data observed in the dynamic reproduction of flow seasonality. It was possible to generate hydropower potential in the TAW and evaluate its potential when the SWAT streamflow was calibrated and validated. This study may be useful for planning sustainable management and decision-making to create public policies of hydrological basins located in tropical regions.

© 2021 European Regional Centre for Ecohydrology of the Polish Academy of Sciences. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The management of water resources, according to the availability of water and the production of electric energy, is the main concern for the future of countries that are extremely dependent on hydropower, such as Brazil. Therefore, changes in the hydrological regime, due to climate variability and the dynamics of land use and cover, make these countries highly vulnerable. Brazil relies on its wa-

ter resources to generate electric energy, as almost 71% of all electric energy is produced by hydropower plants (EPE, 2018; Oliveira et al. 2017).

Electric energy production using renewable resources is a global trend. Therefore, the global renewable energy matrix is increasing, as well as the dependence of energy generation on climatic variables (Queiroz et al. 2019). This jeopardizes future operational and planning processes in the energy systems and increases the need for hydroclimatic monitoring of the basins that maintain the hydropower plants. Hydropower plants are the most widely used renewable energy sources in the world and represent about 16% of the world's energy matrix and more

* Corresponding author.
 E-mail addresses: oliveiraserrao@gmail.com,
edivaldo.afonso@escudante.ufcg.edu.br (E.A. de Oliveira Serrão).

ANEXO A (Artigos publicados e Artigo extra)

Artigo-2: Referente ao Capítulo 3

Science of the Total Environment 744 (2020) 140981



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon



Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão^{a,*}, Madson Tavares Silva^a, Thomás Rocha Ferreira^a, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva^a, Francisco de Salviano de Sousa^a, Aline Maria Meiguins de Lima^b, Lorena Conceição Paiva de Ataíde^a, Romero Thiago Sobrinho Wanzeler^a

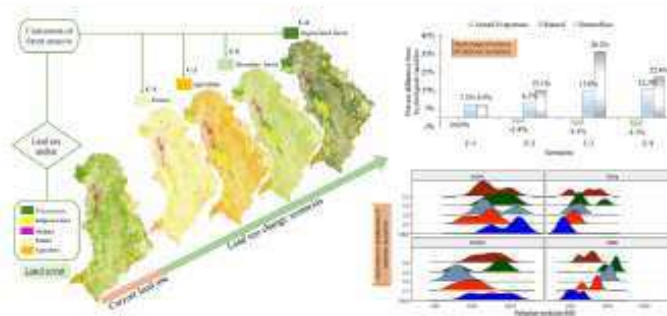
^a Academic Unit of Atmospheric Sciences, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil

^b Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, PA, Brazil

HIGHLIGHTS

- Four land use and land cover changes scenarios are assessed.
- The SWAT model was calibrated for a large basin between the Amazon and the Brazilian Savanna.
- SWAT flow rate from LULCC was used to estimate hydropower production.
- The LULCC cause great impacts on the water balance of the basin.
- The Tucuruí hydropower response to land use change scenarios is energy inefficiency.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 March 2020

Received in revised form 26 June 2020

Accepted 13 July 2020

Available online 18 July 2020

Editor: Ouyang Wei

Keywords:

Land use change - water - energy

Environmental implications

Energy efficiency

ABSTRACT

Accelerated changes in land use in the regions of the Brazilian Amazon and Cerrado in the last four decades have raised questions about the possible consequences for the regional hydrology. Our study area is the Tocantins-Araguaia River Basin (TAW), focusing on the Tucuruí Hydropower Plant (THP), downstream of the TAW. In this study, we evaluated four scenarios of change in land use and cover for the TAW in which forest areas were replaced by pasture, then by agriculture, then by reforestation vegetation and, finally, by regenerated forest to investigate the impacts on the hydrological components of the basin and the hydropower potential of the THP according to these scenarios. For this evaluation, the SWAT model was used to simulate the streamflow of each scenario, so it was possible to predict the hydropower potential in the TAW under different environmental perspectives. Nonparametric statistics were used to identify the efficiency of turbines in converting the streamflow into energy at the 5% significance level. A reduction was observed in the annual evapotranspiration rate and increments were observed in the surface runoff and streamflow, but despite the increase in flow, there was no increase in the energy produced at the THP due to the inability of the turbines to convert excess water into energy, with losses in the energy production of up to 30% per month and 65% in the annual balance. Our results emphasize the importance of the sustainable management of hydrological basins located in tropical regions and aid in planning and decision-making to create public policies that better meet the demand for the exploitation of natural resources.

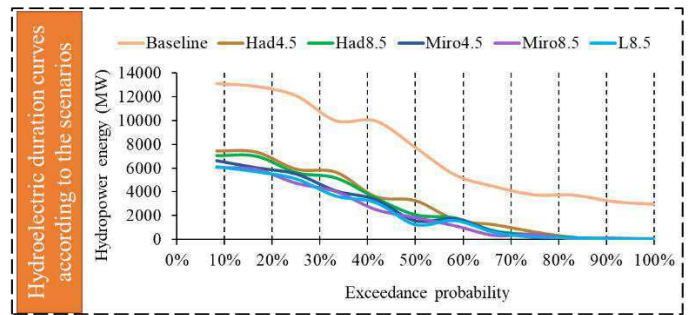
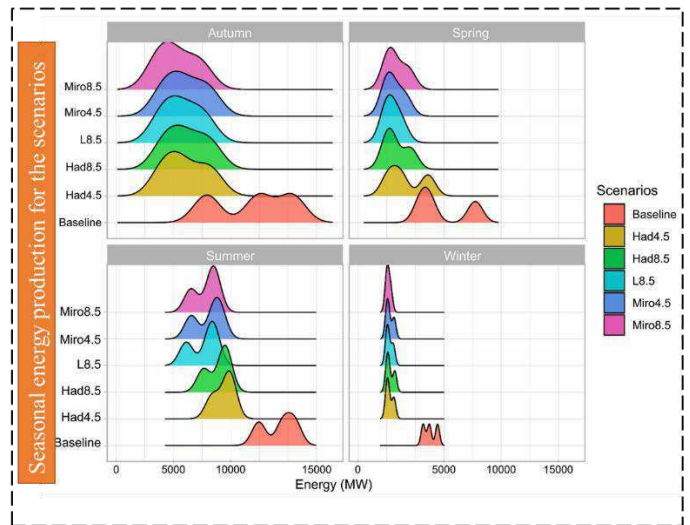
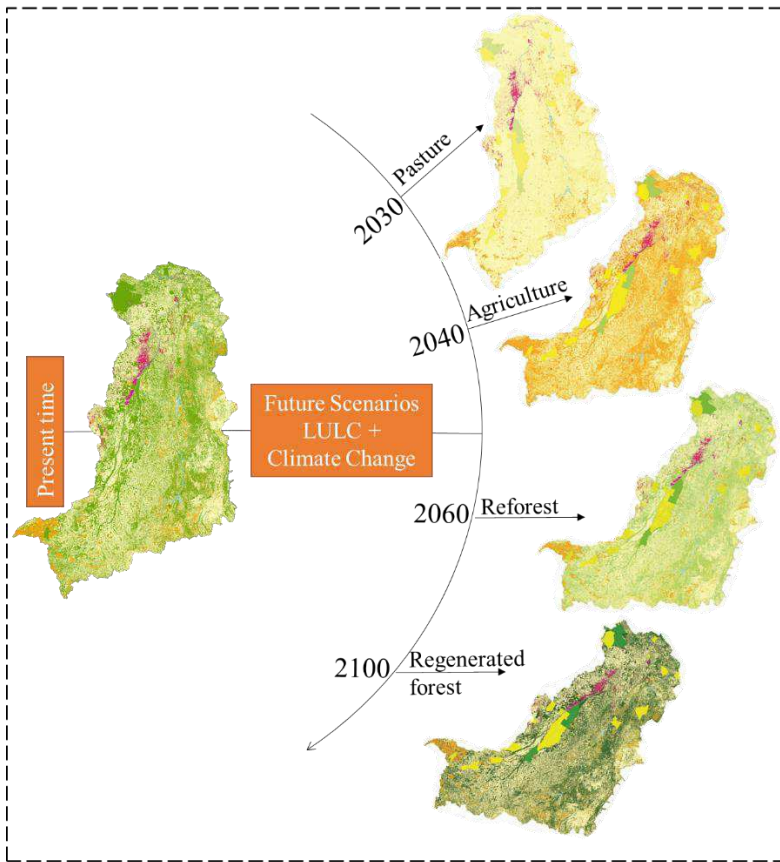
© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

* Corresponding author.

E-mail addresses: oliveiraserrao@gmail.com, edivaldo.serrao@ig.ufpa.br (E.A. de Oliveira Serrão), madson.tavares@ufcg.edu.br (M.T. Silva).

ANEXO A (Artigos publicados e Artigo extra)

Artigo-3: Referente ao Capítulo 4: Resumo gráfico (paper submetido a Renewable Energy)



ANEXO A (Artigos publicados e Artigo extra)

Artigo extra

International Journal of Sediment Research 37 (2022) 54–69



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Sediment Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijsrc

Original Research

Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model

Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão ^{a,*}, Madson Tavares Silva ^a, Thomás Rocha Ferreira ^a, Lorena Conceição Paiva de Ataíde ^b, Cleber Assis dos Santos ^c, Aline Maria Meiguins de Lima ^d, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva ^a, Francisco de Assis Salviano de Sousa ^a, Denis José Cardoso Gomes ^e

^a Academic Unit of Atmospheric Sciences, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil

^b Institute of Technology, Civil Engineering Graduate Program, Federal University of Pará, PPGEC/ITEC/UFPA Belém, PA, Brazil

^c Earth System Science Center, National Institute of Space Research, São José dos Campos, SP, Brazil

^d Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, PA, Brazil

^e Department of Physics, Center for Natural and Exact Sciences, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 March 2020

Received in revised form

11 April 2021

Accepted 12 April 2021

Available online 26 April 2021

Keywords:

Hydrological modeling

Sediment yield

Amazon basin

SWAT model

ABSTRACT

Land use and land cover (LULC) changes strongly affect local hydrology and sediment yields. The current study focused on a basin in the Brazilian Amazon and had the following three objectives: (1) to perform an effective diagnosis of flow and sediment yield, (2) to evaluate the impacts of LULC changes over the last 40 years on the hydro-sedimentological variables, and (3) to investigate the impacts of the possible trends or breaking points in the flow, surface runoff, and sediment yield series. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model validation showed that the simulated results were consistent with the data measured in the dynamic reproduction of flow seasonality. Furthermore, changes in LULC altered surface runoff, sediment yield, and flow according to the Mann-Kendall and Pettitt non-parametric tests. It was also observed that the sub-basins in which pastureland is predominant are more susceptible to increased surface runoff and sediment yield. According to trend and homogeneity tests, these sub-basins had break points in the time series of these variables. On the other hand, in the sub-basins whose land cover is predominantly forest, the time series is homogeneous and trendless. The current study highlighted the impacts that 40 years of LULC changes in an Amazonian basin had on hydro-sedimentological variables, which, in turn, can play an important role in changing the hydrological cycle, consequently these changes can also impact diverse human activities in the region, such as agribusiness, livestock, energy production, food security, and public water supply. Thus, it is concluded that the SWAT model is a good estimator of hydro-sedimentological processes in Amazonian basins and can be used by decision makers in the management of water and environmental resources.

© 2021 International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation/the World Association for Sedimentation and Erosion Research. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Current global trends such as population and economic growth, which often lead to increased food demands, exert great pressure on environmental resources worldwide (Aghsaee et al., 2020; Grey et al., 2014). These trends trigger changes in land use and land cover (LULC) with major impacts on hydrological processes (Aghsaee et al., 2020; Anand et al., 2018; Chow et al., 1988;

Coe et al., 2009; de Oliveira-Serrão et al., 2020; Guo et al., 2008; Scanlon et al., 2007). In addition to changes in the hydrological cycle, research attests to changes in the consumptive uses of water (energy production, food security, public water supply and industrial purposes). Studies have also demonstrated the environmental effects on the total suspended sediment and nutrient concentrations (Hwang et al., 2016), groundwater recharge and base flow (Budiyanto et al., 2015), flood frequency and interval (Alexakis et al., 2014), peak runoff (Ahn et al., 2014; Serrão et al., 2019; Silva et al., 2018a), and evapotranspiration (Silva et al., 2018b; Souza-Filho et al., 2016). According to Aghsaee et al. (2020), the main factors that contribute to LULC changes are

* Corresponding author.

E-mail addresses: oliveiraserrao@gmail.com, edivaldoafonso@estudantes.ufcg.edu.br (Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão).

<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.002>

1001-6279/© 2021 International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation/the World Association for Sedimentation and Erosion Research. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

ANEXO B

(Documentação complementar do SWAT para BHTA)

Artigo -1

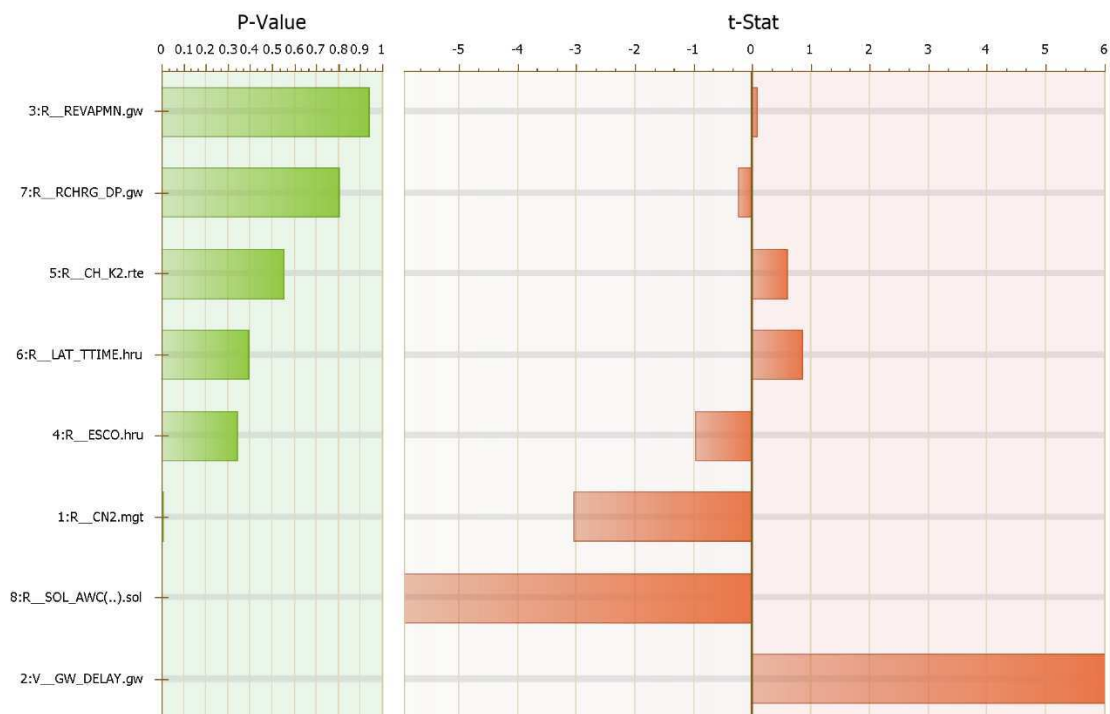


Fig. A1. Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT durante as etapas iniciais.

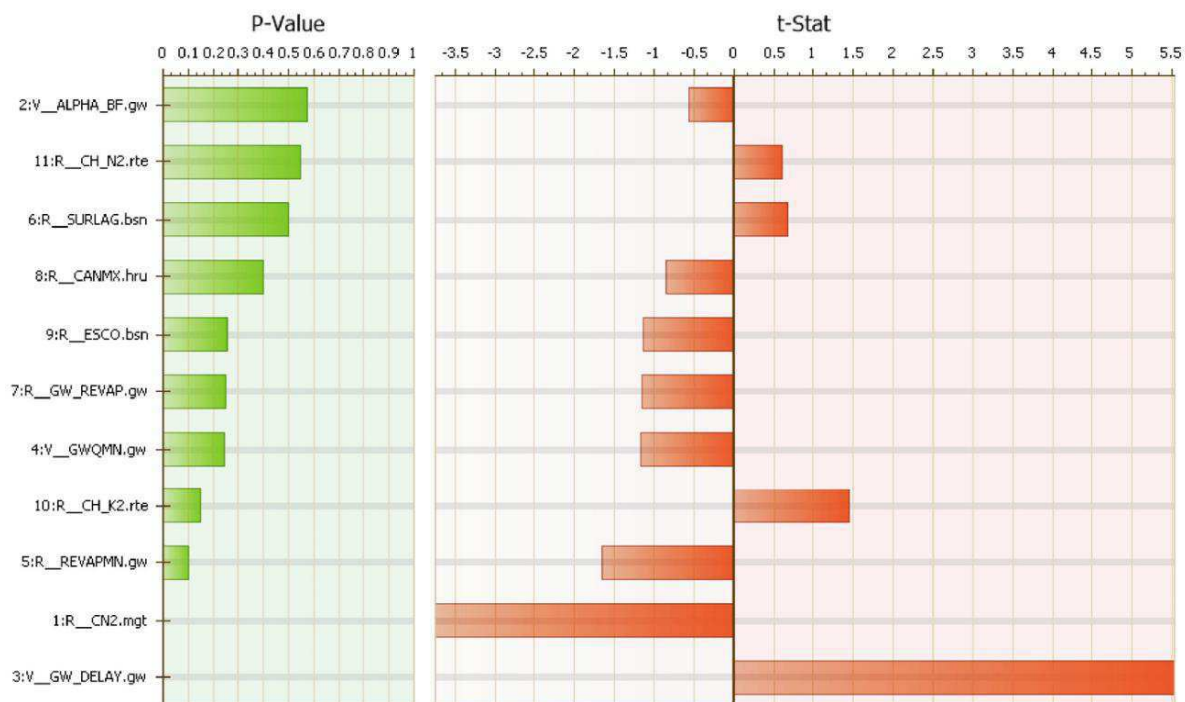


Fig. A2. Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT para a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia (Final)

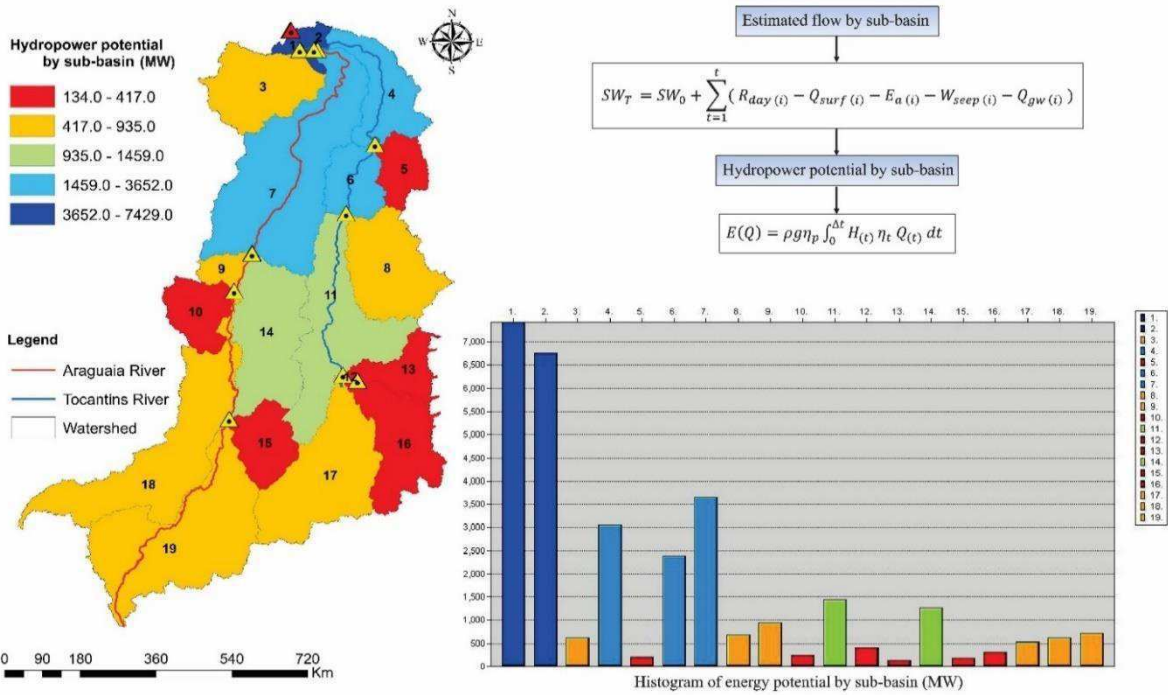


Fig. A3. Potencial hidrelétrico por sub-bacia e equações governantes. (Artigo-1)

Artigo- 2

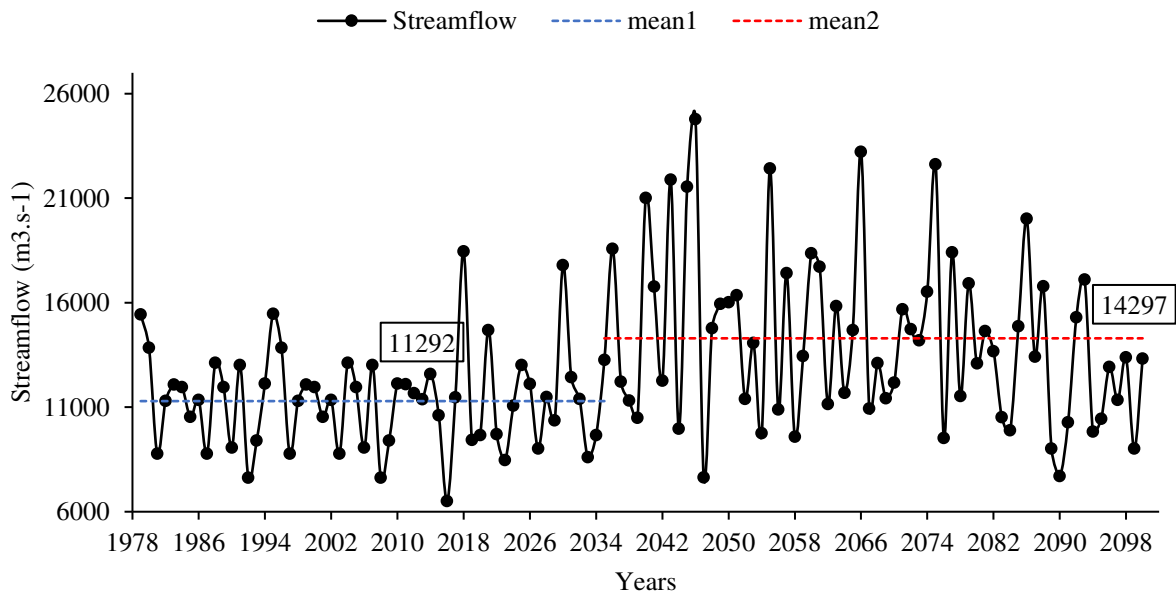


Fig. A4. Média anual da vazão atual e da vazão de acordo com os cenários de uso da terra; e pontos de mudança na série temporal. (Artigo-2)

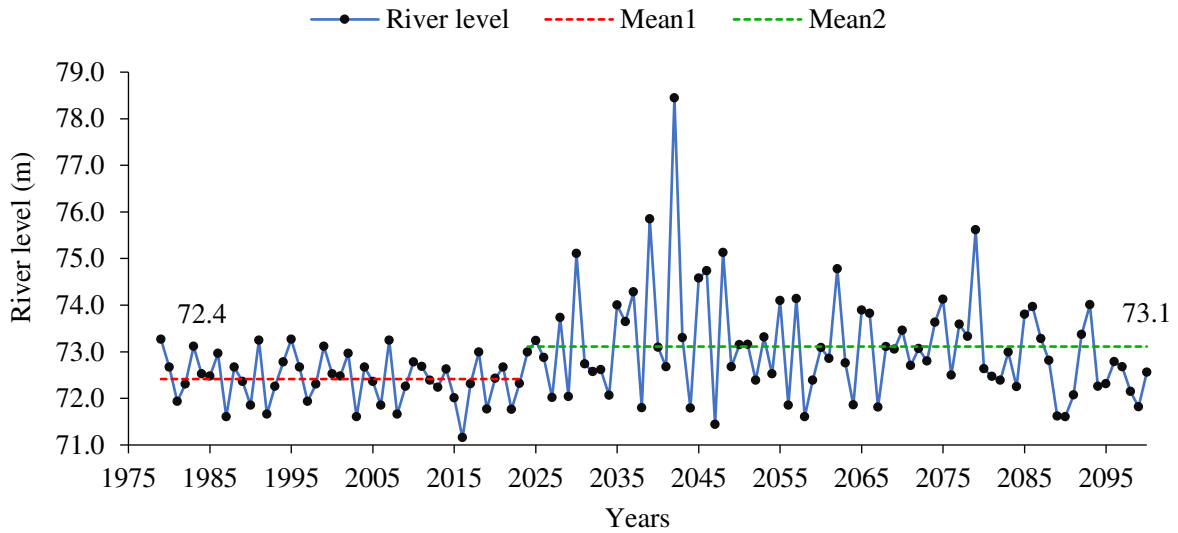


Fig. A5. Média anual do nível atual da UHT e o nível de acordo com os cenários de uso da terra; e pontos de mudança na série temporal. (Artigo-2).

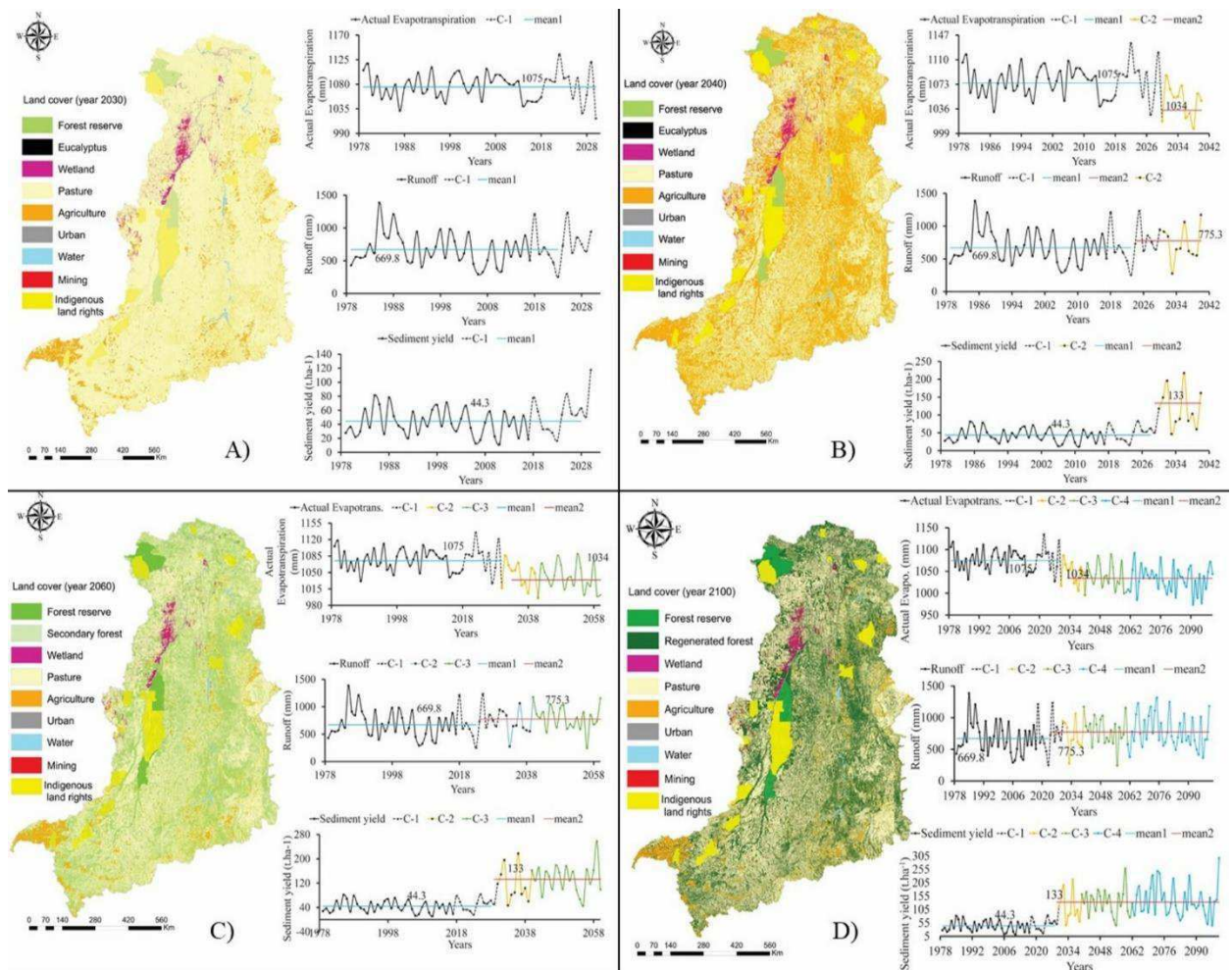


Fig. A6. Cenários de uso da terra e impactos nas séries temporais hidrosedimentológicas (Artigo-2).

Artigo- 3

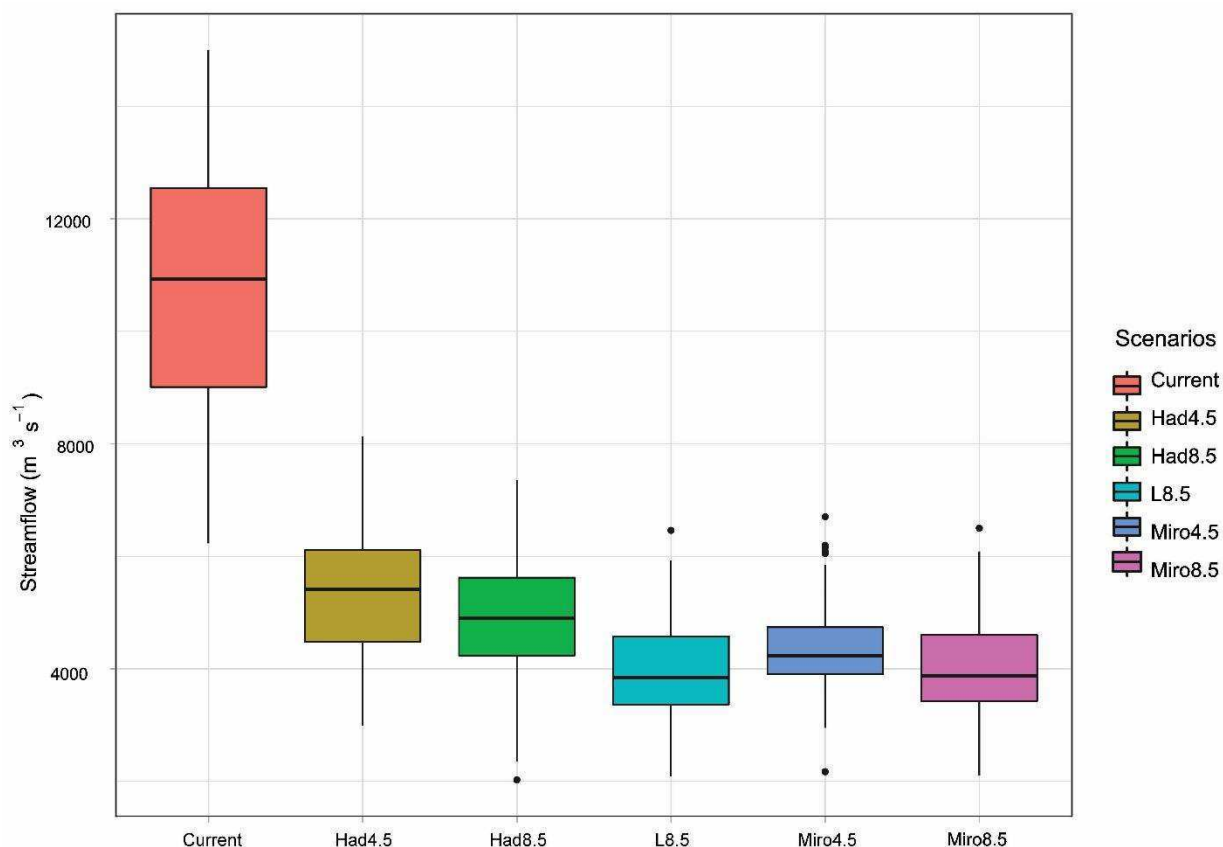


Fig. A7. Vazão anual para a BTHA e os cenários climáticos e acoplado (Artigo-3)

Tabela A1. Impactos na vazão mensal por cenário, em relação à linha de base. (As cores indicam o grau de impacto. Vermelho para impacto extremo, maior. Azul para impacto médio e intermediário). (Artigo-3).

Months	Had4.5	Had8.5	Miro4.5	Miro8.5	L8.5
1	-28.6	-37.7	-50.8	-51.1	-56.1
2	-29.6	-33.1	-42.4	-43.3	-45.6
3	-37.0	-40.5	-44.1	-48.5	-48.4
4	-51.5	-51.9	-52.9	-59.2	-56.5
5	-60.2	-57.5	-59.1	-68.9	-62.2
6	-68.3	-65.5	-67.0	-77.7	-70.1
7	-84.6	-82.7	-84.2	-91.4	-86.0
8	-96.0	-94.8	-95.6	-98.1	-96.2
9	-98.8	-98.4	-98.9	-99.3	-99.1
10	-93.1	-97.8	-98.0	-95.0	-98.6
11	-63.3	-87.8	-92.3	-86.5	-94.8
12	-36.4	-63.4	-72.5	-67.1	-78.3
Mean	-62.3	-67.6	-71.5	-73.8	-74.3

Tabela A2. Impactos na energia mensal por cenário, em relação à linha de base. (As cores indicam o grau de impacto. Vermelho para impacto extremo, maior. Azul para impacto médio e intermediário). (Artigo-3).

Scenario	Season			
	Summer	Autumn	Winter	Spring
Had4.5	-41.1	-62.6	-93.1	-65.5
Had8.5	-45.4	-61.5	-92.0	-82.5
Miro4.5	-52.5	-62.7	-92.9	-87.1
Miro8.5	-54.3	-70.1	-96.2	-83.2
L8.5	-56.2	-65.6	-93.7	-90.1

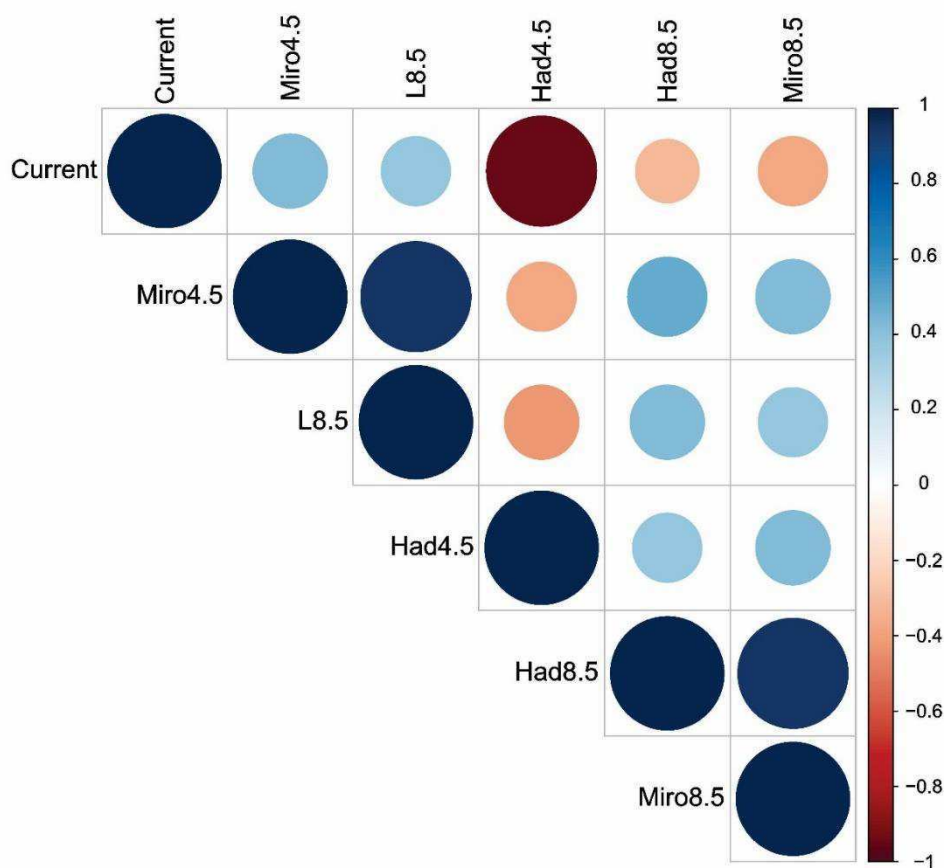


Fig. A8. Correlação da produção de energia em diferentes cenários futuros. (Artigo-3).

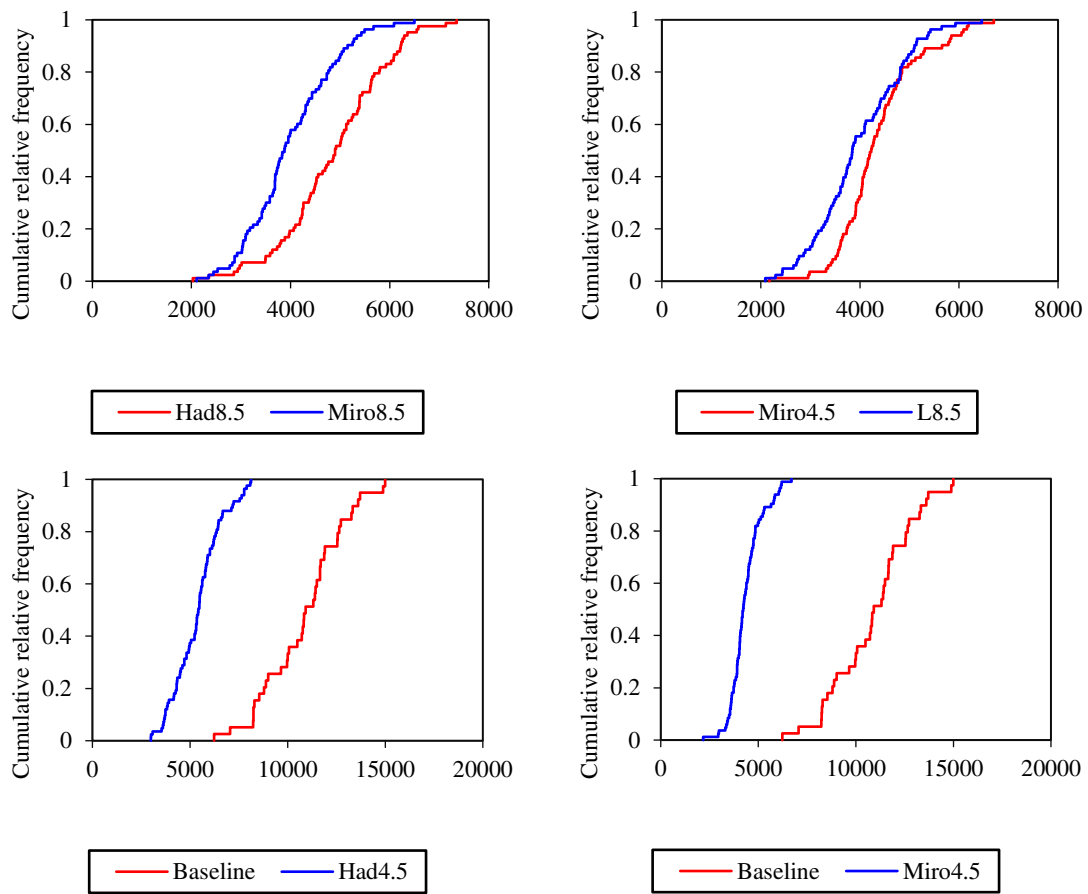


Fig. A9. Kolmogorov-Smirnov test for energy produced at TAW (strong, positive and negative correlation) according to the scenarios. (Artigo-3).

SWAT

Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico no modelo SWAT e determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Equação 1, também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

Em que: SW_t : conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm); t : tempo (dias); P : precipitação pluvial (mm); Q_{sup} : escoamento superficial (mm); ET : evapotranspiração (mm); W_a : percolação (mm), e Q_{sub} : fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

A subdivisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU, *hydrologic response units*) possibilita uma análise mais detalhada das diferenças de evapotranspiração, e outras componentes do ciclo hidrológico para os diferentes tipos de usos e características do solo. O escoamento superficial é medido para cada HRU e, em seguida, é quantificado o total para a bacia inteira, melhorando a análise do balanço hídrico da bacia.

Escoamento Superficial

A estimativa do escoamento superficial é realizada pelo Método da Curva Número (CN) elaborado em 1954 pelo do *Soil Conservation Service* (SCS), representado nas Equações 2 e 3

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (2)$$

$$Q_{sup} = 0, P \leq 0,2S \quad (3)$$

Em que Q_{sup} : escoamento superficial diário (mm); P : precipitação pluvial diária (mm), e

S : parâmetro de retenção.

Essa metodologia foi desenvolvida para fornecer de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (Neitsch, 2005). Bastante difundido, este método possui relevância

e prestígio no âmbito da hidrologia, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das predições (Zhang et al., 2013).

O parâmetro de retenção é em função: 1. do tipo e uso, 2. do manejo, 3. Da inclinação do solo e 4. dá permeabilidade, além de 5. ser temporalmente dependente das variações da quantidade de água no solo e é obtido através da Equação 4

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

O parâmetro CN é fundamental ao estudo do escoamento superficial, sendo dependente da relação de informações de uso e cobertura do solo, das características pedológicas e das condições de umidade antecedentes da área em estudos. Dessa forma, o CN é função da combinação dos diferentes grupos hidrológicos do solo, conforme suas características físicas e de infiltração, com os diversos usos e manejos do solo (Sartori et al., 2005a). O fator CN foi determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo 1 representando um solo totalmente permeável e 100 um solo que converterá toda a precipitação em escoamento, logo um solo impermeável (Neitsch, 2005).

Evapotranspiração Potencial:

O SWAT calcula a evapotranspiração potencial através do método de Penman-Monteith, de acordo com a Equação 5. Onde leve em consideração diversas variáveis tais quais: radiação solar (S), temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V). É o método mais recomendado no âmbito acadêmico e recomendado pela FAO-56 (Silva, 2016).

$$ETP = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (5)$$

Sendo que: R_n: Saldo de Radiação (Mj/m² dia⁻¹); G: Fluxo de calor no solo (Mj m⁻² dia⁻¹); T_a: Temperatura média do ar (°C); u₂: Velocidade média diária do vento a 2m de altura; e_s: Pressão de saturação de vapor média diária (kPa); e_a: Pressão atual de vapor média diária (kPa); Δ: Declividade da curva de pressão de vapor; Γ: Constante psicrométrica (kPa/°C).

Evapotranspiração real:

A evapotranspiração real é calculada através da evaporação da água interceptada pelas plantas e evaporada pelo solo, e em seguida, a quantidade de água transpirada pelas plantas. O modelo considera que, se a evapotranspiração potencial for inferior à quantidade de água interceptada pelas plantas no dossel seja Eq. (6):

$$E_a = E_0 \rightarrow R_{INT(f)} = R_{INT(i)} - E_a \quad (6)$$

Se superior seja Eq. (7).

$$E_{can} = R_{INT(i)} \rightarrow R_{INT(f)} = 0 \quad (7)$$

Sendo: E_a = evapotranspiração real diária (mm); E_{can} = a quantidade de evaporação diária livre nas plantas (mm); E_0 = evapotranspiração potencial diária (mm); $R_{INT(i)}$ = a quantidade inicial diária da água livre nas plantas (mm); $R_{INT(f)}$ = a quantidade final diária da água livre nas plantas em um dia (mm). Uma vez que qualquer água livre dentro do dossel foi evaporada, a demanda de água evaporativa restante ($E'_o = E_0 - E_{can}$) é dividida entre a vegetação e solo.

Transpiração:

A transpiração é calculada pelas equações 8 e 9 e é a quantidade de transpiração que ocorrerá em um determinado dia quando a planta está crescendo sob condições ideais.

$$E_t = \frac{E'_o \cdot LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq .30 \quad (8)$$

$$E_t = E'_o \quad LAI > 3.0 \quad (9)$$

Em que E_t é a transpiração máxima em um determinado dia (mm), E'_o é a evapotranspiração potencial ajustada para evaporação de água livre dentro dossel (mm), e LAI é o índice de área foliar.

Escoamento Lateral

O Escoamento Lateral é caracterizado a partir do momento em que a água percolada verticalmente acha uma camada impermeável, acumula-se, e pela formação de uma zona saturada dá origem ao escoamento lateral. O cálculo desta componente é feito a partir do modelo de armazenamento cinemático, através da Equação 10.

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot Slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (10)$$

Em que Q_{lat} = é a descarga de água da rampa de saída (mm.dia⁻¹); $SW_{ly,excess}$ = é o volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área (mm); K_{sat} = é a condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹); slp = é a declividade da rampa (m.m⁻¹); ϕ_d = é a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm⁻¹); L_{hill} = é o comprimento da rampa (m).

Sedimentos

A erosão do solo foi estimada no modelo SWAT através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS). A MEUPS é a versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) apresentada na Equação 11.

$$Sed = 11,8 (Q_{sup} + q_{pico} + \text{ÁREA}_{HRU})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (11)$$

Sendo sed : produção de sedimentos após evento de precipitação no dia, em toneladas; Q_{sup} : escoamento superficial (mm); q_{pico} : vazão de pico do escoamento (m³/s); Área_{HRU} : área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha); K : erodibilidade do solo [(0,013ton m² hr)/(m³ ton cm)]; C : é o fator de uso e manejo do solo (adimensional); LS : fator topográfico (adimensional); P : fator das práticas conservacionistas (adimensional), e $CFRG$: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

Enquanto a Equação Universal da Perda de Solos (USLE) trabalha com a precipitação como indicador de energia erosiva, a MUSLE utiliza o escoamento superficial para simular a erosão e o transporte de sedimentos.

Dados tabulares de solo

TIPOS DE SOLO

CARACT.	CLVA	CNF	PVAD	CAM	FFC	Gxdb	LUV
NLAYERS	3	3	3	2	3	3	3
HYDGRP	C	C	C	B	D	D	C
SOL_ZMX	3300	3300	3300	600	2000	2000	600
ANION_EXCL	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,42
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
TEXTURE	STV-L- FSL-FSL	STV-L- FSL-FSL	STV-L- FSL-FSL	STV-L- FSL-FSL			
SOL_Z1	300	300	300	300	300	300	200
SOL_BD	1,4474	1,5441	1,5553	1,37	1,36	1,66	1,38
SOL_AWC	0,1181	0,1008	0,0564	0,13	0,14	0,13	0,14
SOL_K	0,6513	5,5999	51,6526	0,67	5,76	7,09	5,7
SOL_CBN	1,506	1,385	1,165	1,5	2,99	3,94	1,1
CLAY	44,9	29,5	11,5	26	33,35	50	19
SILT	12,8	13,5	6,5	55	37,1	49,55	27
SAND	42,3	57	82	19	29,55	0,45	54
ROCK	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,2128	0,2314	0,24	0,17	0,08	0,04	0,17
USLE_K	0,1031	0,1163	0,0919	0,16	0,13	0,29	0,15
SOL_EC	1	1	1	1	1	1	1
SOL_PH	3	3	3	2	3	3	3

Onde, NLayer - Número de camadas; SOL_Z – profundidade da superfície do solo até o fundo da camada; SOL_BD – massa específica aparente; SOL_AWC – capacidade de água disponível na camada; SOL_CBN – carbono orgânico; SOL_K – condutividade hidráulica saturada; CLAY – teor de argila; Valores estimados. SILT – teor de silte; SAND – teor de areia; ROCK – teor de pedregulhos e pedras; SOL_ALB – albedo; USLE_K – coeficiente de erodibilidade do solo; SOL_EC – condutividade elétrica e SOL_PH – o valor de PH do solo.

SWAT-CUP

Fator de calibração através da faixa de incerteza

R-factor

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t_i=1}^n (y_{t_i}^{M_{97.5\%}} - y_{t_i}^{M_{2.5\%}})}{\sigma_{obs}} \quad (12)$$

Em que: $y_{t_i}^{M_{97.5\%}}$, e $y_{t_i}^{M_{2.5\%}}$ são os limites superior e inferior do 95PPU; e σ_{obs} é o desvio padrão dos dados observados.