UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Variabilidade da vazão do Rio Xingu na região da UHE Belo Monte sob
cenários de projeções multimodelo de mudança climática**

MARCELO GARCIA PEREIRA DE CAMARGO

Orientador: Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi

Dissertação de Mestrado elaborada para o
Programa de Pós-Graduação em
Geoquímica e Geotectônica do Instituto de
Geociências da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

SÃO PAULO

2019

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Variabilidade da vazão do Rio Xingu na região da UHE Belo Monte sob cenários de projeções multimodelo de mudança climática

MARCELO GARCIA PEREIRA DE CAMARGO

Orientador: Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi

Dissertação de Mestrado

Nº 821

COMISSÃO JULGADORA

Dr. André Oliveira Sawakuchi

Dr. Gilberto de Martino Jannuzzi

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves

SÃO PAULO
2019

*Em questões de ciência, a autoridade de milhares
não vale o humilde raciocínio de um único indivíduo*

Galileo Galilei (1632)

Há pouco mais de dois anos, dediquei minha monografia à
memória de duas das pessoas mais importantes da minha vida

Dessa vez, dedico às duas mais importantes, sem precisar usar,
com saudade, a palavra “memória”

Gi e mãe, essa é pra vocês!

Marcelo

Agradecimentos

No ano de 2013, aos dezoito anos, um aluno ingênuo foi louco pelos corredores do Instituto de Geociências da USP atrás do Prof. André Sawakuchi. Afinal, era a cadeira de Geologia do Petróleo, disciplina que ele pretendia especializar-se desde cedo até a exaustão. Hoje, dia 24 de Janeiro de 2019 (que por sinal é a data limite para entrega deste trabalho, devo confessar), quase seis anos depois, digo que não poderia ter acertado melhor na escolha de um ‘tutor pra vida acadêmica’. Petróleo? Uma iniciação científica muito bacana, mas parou lá – o André tinha a ambição (ou sadismo, como pensava eu) de me arremessar para o coração da Amazônia.

Ao André (eventualmente, Fruta, após caipirinhas, Frutinha, e dá para piorar...), devo cada lição que carrego comigo sobre como se faz ciência, e quais as melhores formas de contribuir para a compreensão dos fenômenos que nos fascinam. Agradeço, especialmente, à maneira como essa parceria construiu-se: lembro que, desde quando o conheci, no terceiro semestre do curso de Geologia, fiquei impressionado como ele “colocava-se no mesmo patamar” que um mero recém-bicho para passar conhecimentos muito além da teoria. Humildade deu lugar a confiança mútua, que se tornou independência e maturidade, duas das marcas atuais da relação orientador-orientado que dou máxima importância. Neste mestrado, tive o verdadeiro privilégio de conduzir a pesquisa com completa autonomia e ritmo, sabendo que, sempre que necessário, o suporte estava logo ali. E, se o resultado mostrar-se útil em alguns anos, sua participação nisso é inestimável. Agradeço novamente, também, aos Profs. Drs. Victor Sacek e Gyrlene Aparecida Mendes da Silva, obrigado pelo enorme suporte!

Em sequência, agradeço a minha mãe, Maria Lúcia, à Giovana (amorção) e a meus familiares, cujo orgulho no primo/sobrinho/afilhado pós-graduando trouxe enorme motivação (e muito obrigado por não ficarem perguntando sobre emprego!). Ao meu irmão canino Zago (perdão pelo plágio, exmo. ex-reitor), por ser, bem, um cachorro.

À extensa lista de amigos e colegas que estiveram por aí nesses vinte e quatro meses e tiveram papel crucial na manutenção da minha sanidade: Ameba, Akira, Avatar, Bito, Dailson, Doby, Frango, Joreg, Laura, Mari (e Luziabo!), Maria, Mika, Milani, Nazaré, Quideu, Seiji, Tomilhe, povo da internet, po-vo de Altamira e Belém, povo de Sorocaba e outros povos que eventualmente esqueci. À M.J., pelo apoio ao longo do ano.

Finalmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que possibilitou a execução deste trabalho por meio do processo 2017/12470-2, e ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, por ser tanto refúgio quanto motivo de fuga, vez ou outra.

Apresentação

Os resultados desta dissertação de mestrado são apresentados na forma do manuscrito *Impacts of climate change on Brazil's Xingu River flow and its effects upon the fate of Amazon's giant hydropower plant Belo Monte* (Camargo et al., in prep.), a ser submetido ao periódico *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. O artigo consta neste trabalho como Apêndice A, e foi redigido seguindo diretrizes editoriais em língua inglesa.

Dado tal formato, a presente dissertação possui o objetivo geral de complementar os resultados representados pelo manuscrito anexo com texto em português, composto por Introdução, Síntese bibliográfica, Métodos, Resultados e discussões e, por fim, Conclusões.

RESUMO

Camargo, M.G.P., 2019, Variabilidade da vazão do Rio Xingu na região da UHE Belo Monte sob cenários de projeções multimodelo de mudança climática [Dissertação de Mestrado] São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 54 p.

A Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Belo Monte está localizada no Rio Xingu, na chamada “Volta Grande do Xingu”. Inaugurada em 2016, a UHE Belo Monte é a maior hidrelétrica brasileira em termos de potência instalada. No entanto, dos 11.233 MW instalados, a geração efetiva média de energia é estimada em 4.500 MW. Isto se dá pela alta sazonalidade do Rio Xingu, cuja vazão varia em até 40 vezes entre meses de seca e cheia. Além disso, esta estimativa de geração efetiva não considera os cenários de mudança climática e as projeções climáticas para a Amazônia, que em parte indicam taxas menores de precipitação na região do Leste, além de aumento na frequência de eventos extremos de seca. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é simular a vazão do Rio Xingu no período 2020-2050 a partir de projeções de precipitação oferecidas por cinco modelos climáticos internacionais, e também discutir os possíveis efeitos de mudanças na vazão sobre a produção de energia pela UHE Belo Monte, além da possível intensificação dos impactos já existentes sobre a população humana e ecossistemas da Volta Grande. Utilizou-se modelo numérico hidrológico que simula a vazão por meio de cálculos de escoamento superficial derivado da interação entre topografia e precipitação. Resultados apontam variabilidade nas projeções de precipitação multimodelo, com tendência de redução. Após calibração do modelo com a simulação de vazões históricas e comparação entre valores simulados e observados, pode-se prosseguir à simulação com base nas projeções de precipitação futura. Resultados das simulações indicam, para quatro dos cinco modelos climáticos, reduções na vazão da ordem de 20 a 30%, comparativamente às históricas. Tal redução possui implicações de caráter econômico, envolvendo a produção energética da UHE Belo Monte, que deverá decrescer em proporção similar, e também socioambientais, tais como a intensificação dos conflitos pelo uso da água, além da ampliação de impactos sobre ecossistemas aquáticos e de floresta alagável. Neste contexto, destacam-se os impactos causados à população diretamente afetada pela implementação do reservatório Pimental, que alterou drasticamente a dinâmica hidrossedimentológica da calha do Rio Xingu. Assim, o trabalho discute possíveis cenários e consequências socioambientais em face da mudança climática global.

Palavras-chave: Bacia do Rio Xingu, UHE Belo Monte, mudança climática, simulação numérica hidrológica.

ABSTRACT

Camargo, M.G.P., 2019, Xingu River's discharge variability over Belo Monte hydropower plant's region under scenarios of multimodel climate change projecions [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 54 p.

The Belo Monte hydropower plant is located on the Brazilian portion of the Amazon rainforest, in the so-called "Big Bend" of the Xingu River. Officially inaugurated in May 2016, the Belo Monte Dam is the largest entirely Brazilian hydroelectric power plant in terms of installed capacity, and the fourth one in the world. However, of the 11.233 MW of installed capacity, the effective generation of energy will be 4.500MW, on average. This happens due to the high seasonality of the Xingu River, whose discharge can change by up to 40 times between dry and wet seasons. Nevertheless, this estimation of the effective energy generation does not consider climate change scenarios projected for the Amazon, which often suggest that eastern Amazon, especially the Xingu River basin, might be considerably drier in the next decades, with drought events happening more frequently and with a higher intensity. In this context, the main goal of this work is to simulate Xingu River's future discharge (2020-2050) based on future precipitation projections obtained from five of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) climatic models. It also focus on discussing the possible effects of relevant changes in the river's discharge over Belo Monte Dam's hydropower generation capacity, as well as on the highly significant socio-environmental impacts that already exist. For this purpose, a numeric hydrological model was applied, simulating discharge through runoff calculations derived from the interaction between topography and rainfall. Results point out a decreasing trend in surface water availability, with a 20-30% lower discharge in 2050 when compared to historical data for four out of five models. These results have concerning implications not only on the economic sphere, impacted by Belo Monte's future energy generation, which might decline in a similar proportion, but also over socio-environmental aspects, such as an increase in water conflicts and intensification of impacts over aquatic and floodplain ecosystems. In this context, this work also discusses possible socio-environmental consequences and scenarios regarding global changes in climate.

Keywords: Xingu River Basin, Belo Monte hydropower plant, climate change, numerical hidrologic simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação ao tema	3
1.2. Objetivos e relevância científica	5
2. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Desmatamento nas bacias dos rios Amazonas e Xingu	9
2.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa por reservatórios hidrelétricos	11
2.3. Paleoprecipitação no Leste Amazônico e correlações com nível d'água	12
2.4. Impactos sociais, econômicos e ambientais da UHE Belo Monte	18
3. MÉTODOS	15
3.1. Material utilizado	17
3.2. Funcionamento do modelo	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1. Projeções de precipitação para o período 2020-2050	25
4.1. Simulações de Vazão Futura do Rio Xingu	29
5. CONCLUSÕES	31
 REFERÊNCIAS	 35
APÊNDICE A	39

Capítulo 1

Introdução

The furnaces of the world are now burning about 2,000,000,000 tons of coal a year. When this is burned, uniting with oxygen, it adds about 7,000,000,000 tons of carbon dioxide to the atmosphere yearly. This tends to make the air a more effective blanket for the earth and to raise its temperature. The effect may be considerable in a few centuries.

Coluna publicada em um jornal local de Warkworth, Nova Zelândia, em 14 de agosto de 1912

1.1. Apresentação ao tema

Desde a década de 1970, usinas hidrelétricas constituem a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil (Tolmasquim, 2016). Em 2017, o país apresentava capacidade instalada total de 624.3 TWh, dos quais 407.3 TWh foram oriundos de fontes hidráulicas, ou aproximadamente 65% (MME/EPE, 2018). Com planos de expansão na capacidade instalada total da ordem de 30% nos próximos dez anos (MME/EPE, 2018), chegou-se a projetar que ao menos 50% dos projetos futuros de grandes usinas hidrelétricas destinar-se-iam à Amazônia Legal (MME/EPE, 2015), região que ao longo da década de 2010 já concentra 85% da expansão de geração hidráulica nacional (Fearnside, 2016b).

A principal representante da recente expansão da energia hidrelétrica na Amazônia é a Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Belo Monte, inaugurada em maio de 2016. Trata-se da maior hidrelétrica inteiramente nacional e, quando finalizada, será a quarta maior hidrelétrica do mundo em termos de potência instalada. Localizada na Bacia do Rio Xingu, na chamada “Volta Grande do Xingu”, próximo ao município de Altamira – PA (Fig. 1), a UHE Belo Monte possui duas barragens, Pimental e Belo Monte. A primeira barra o canal principal do Rio Xingu, destinando parte de sua vazão a um reservatório secundário adjacente ("artificial"), conectado ao rio por meio do chamado canal de derivação, além de possuir 233 MW de potência instalada. Tal reservatório, somado ao trecho alagado pelo reservatório da calha do rio, de aproximadamente 70 km de extensão a montante de Pimental, irá compor os reservatórios de 478 km² da hidrelétrica.

A barragem de Belo Monte, por sua vez, barra área de baixa elevação para formar o reservatório artificial e abrange a Casa de Força Principal, com capacidade para dezoito turbinas de 611,1 MW cada, totalizando 11.000 MW. O trecho da Volta Grande do Xingu a jusante da barragem de Pimental é conhecido como Trecho de Vazão Reduzida (TVR). O TVR terá vazões mínimas liberadas pela barragem de acordo com o mês, em dois regimes hidrológicos alternados ao longo dos anos.

Figura 1. Imagem de radar da Volta Grande do Xingu, em Janeiro de 2016, com indicações das principais feições relacionadas à UHE Belo Monte.

De acordo com dados oficiais (Norte Energia, 2016), dos 11.233 MW totais instalados, a UHE Belo Monte gerará em média 4.471 MW, ou 40% da capacidade total. Isto se dá pela alta sazonalidade da vazão do Rio Xingu (Fig. 2), cujas vazões podem variar em até quarenta vezes dentro de um mesmo ano hidrológico. Como a UHE Belo Monte é considerada usina hidrelétrica do tipo fio d'água, a redução na vazão do rio implica na diminuição direta do potencial hidrelétrico da usina. Este dado levanta preocupação em relação ao real custo-benefício deste empreendimento, considerando o montante investido inicialmente estimado em R\$ 19 Bilhões (MME/EPE, 2010), evoluindo ao longo dos anos para pelo menos R\$ 31 Bilhões (Norte Energia, 2016) e os impactos socioambientais associados à construção e operação da usina (e.g. Fearnside, 2016a).

Desde sua concepção como projeto, a UHE Belo Monte foi alvo de discussões de caráter econômico, social e ambiental, com forte oposição das comunidades científica, indígena e ribeirinha (e.g. Painel de Especialistas, 2009). Parte dos questionamentos ambientais, sociais e econômicos já levantados devem ainda considerar cenários de mudanças climáticas, pois inúmeros modelos climáticos

projetam aumento da frequência de eventos extremos nas próximas décadas devido à elevação da temperatura global (IPCC, 2014). Mudanças de precipitação mais severas são esperadas para áreas tropicais, onde extremos futuros de precipitação estariam correlacionados à variabilidade climática interanual passada (O'Gorman, 2012). No leste e sudeste da Amazônia, onde está situada a Bacia do Rio Xingu, espera-se aumento da duração e intensidade da estação seca (Malhi et al. 2008).

Figura 2. Diagramas de caixa (*boxplots*) elaborados a partir da série histórica de vazões do Rio Xingu no período 1971-2016 medidas na localidade de Altamira (PA). Destacam-se a expressiva variabilidade interanual da estação chuvosa, em particular no trimestre Março-Abril-Maio, e a alta sazonalidade observada.

Cenários climáticos com redução de precipitação podem aumentar a extensão e intensidade de impactos sociais e ambientais das UHEs instaladas em rios da Amazônia. Não obstante, o projeto oficial da UHE Belo Monte apoia-se exclusivamente em séries históricas de vazão e precipitação (Norte Energia, 2010) em detrimento da análise mais aprofundada sobre a potencial variação futura dessas variáveis climáticas, como consequência do aumento de temperatura global.

1.2. Objetivos e relevância científica

Considerando o contexto em que o problema descrito insere-se, o principal objetivo deste trabalho é a projeção da vazão futura do Rio Xingu por meio de simulação numérica hidrológica, tendo como base projeções de precipitação para o período 2020-2050 obtidas a partir de cinco modelos climáticos. Estes resultados sustentam discussões acerca dos impactos socioeconômicos e ambientais

observados e esperados para a Volta Grande do Xingu, riscos operacionais e viabilidade econômica enfrentados pela UHE Belo Monte para as próximas décadas, e qual o real custo-benefício de investimentos em energia hidrelétrica em rios amazônicos.

O presente trabalho justifica-se em especial pela relevância atual dos estudos sobre o impacto da mudança climática na Amazônia, visto o papel fundamental que este bioma exerce sobre a disponibilidade de água superficial no Brasil (Fisch, 1998). Não obstante, a magnitude da “questão Belo Monte” para o Governo do Brasil e sua população, em termos dos impactos sociais e ambientais *versus* benefícios econômicos e energéticos, constitui tema essencial no cenário político-econômico nacional, dado o grande número de empreendimentos hidrelétricos em fase de construção ou planejamento em rios amazônicos. Trata-se de uma das maiores e mais caras obras de engenharia do País (Ministério do Planejamento, 2016), com elevada capacidade para geração de energia elétrica. Por outro lado, envolve impactos ambientais sem precedentes (e.g. Winemiller et al., 2016) e eficiência energética discutível (e.g. Fearnside, 2016b; Lees et al., 2016). Assim, o estudo de questões relacionadas a mudança climática e seu impacto sobre o regime de precipitação do leste amazônico é de suma importância para o planejamento energético do País, sendo tais questões pouco abordadas em estudos sobre a viabilidade energética e impactos ambientais da UHE Belo Monte (e.g. MME/EPE, 2010).

Capítulo 2

Síntese bibliográfica

*If you want a picture of the future, imagine a boot
stamping on a human face – forever*

O'brien para Winston, em 1984, de George Orwell

2.1. Desmatamento nas bacias dos rios Amazonas e Xingu

Além da recente expansão hidrelétrica brasileira, atividades agropastoris ao longo das últimas décadas ocasionaram à bacia do Rio Xingu marcantes alterações em sua vegetação típica (Fig. 3), devido ao desmatamento que tais atividades inerentemente costumam impulsionar (Hayhoe et al. 2011, Lathuillière et al. 2012, Macedo et al. 2012). A influência do desmatamento na dinâmica hidrológica e sedimentar afeta a produção de energia hidrelétrica (Stickler et al. 2013) na Amazônia e pode reduzir a capacidade de adaptação de ecossistemas aquáticos a cenários com estações de seca mais intensas e longas (Malhi et al. 2008). No entanto, a natureza da relação entre desmatamento e alterações no escoamento superficial, i.e., se o desmatamento na região de cabeceira/recarga de um corpo d'água promove, efetivamente, aumento ou diminuição do fluxo d'água em um rio, ainda é estudada (e.g. Guimberteau et al., 2018).

Os efeitos do desmatamento no potencial hídrico do Rio Xingu vão desde importantes mudanças em processos que restringem o fluxo da água da chuva até o rio, como infiltração e evapotranspiração (Guimberteau et al., 2016), como também impactos regionais sobre a formação de chuvas (Stickler et al., 2013). Desta forma, pode-se interpretar que o desmatamento pode tanto aumentar a vazão de um rio, ao restringir processos que retiram água do sistema e promover maior escoamento superficial, como também diminuir a vazão, ao inibir a formação de núcleos de precipitação e diminuir a disponibilidade de água na bacia hidrográfica.

Stickler et al. (2013) concluem que, se o desmatamento projetado para 2050, da ordem de 40%, afetasse somente a Bacia do Xingu, a vazão do Rio Xingu aumentaria em até 12% devido à menor evapotranspiração na área de drenagem, apesar de o desmatamento também afetar a precipitação. Porém, quando o desmatamento de toda a Bacia do Amazônica é avaliado conjuntamente, o impacto regional sobre a formação de chuvas implicaria em vazões até 36% inferiores às históricas. Destaca-se que valores de 40% de área desmatada nas bacias em questão até 2050 são considerados plausíveis, e até mesmo conservadores (Soares-Filho, 2006) quando comparados a projeções de até 80-90% de desmatamento em cenários extremos, até o final do século.

Figura 3. Evolução (1984-2018) do desmatamento nos arredores do Território Indígena do Xingu, região de cabeceira do Rio Xingu localizado no Mato Grosso. Imagens Landsat disponibilizadas pela NASA

2.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa por reservatórios hidrelétricos

Através da decomposição de matéria orgânica, reservatórios hidrelétricos produzem gases biogênicos, especialmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O CH_4 e CO_2 são os dois mais importantes gases de efeito estufa, sendo que o primeiro é 34 vezes mais eficiente em reter calor na atmosfera que o segundo, e a concentração de ambos na atmosfera está em contínua ascensão desde, ao menos, a metade do século XX (IPCC, 2014).

Faz-se mandatário, portanto, que as principais e potenciais fontes e sumidouros desses gases sejam estudados e caracterizados, a fim de se buscar as mais sustentáveis práticas para mitigação de emissões de GEEs. Contudo, o balanço da emissão de GEEs por usinas hidrelétricas instaladas em rios de áreas tropicais, como a Amazônia, apresenta diversas incertezas, principalmente pela falta de estudos prévios à implantação das barragens e às generalizações derivadas de estudos de rios de pequeno porte de zonas temperadas (Mallia e Lewis 2013). O caráter renovável e a relativa baixa emissão de gases de efeito estufa são considerados fatores positivos das usinas hidrelétricas brasileiras, os quais têm justificado o planejamento e construção de grandes usinas hidrelétricas nos rios amazônicos (Fearnside, 2008). Assim, benefícios de ordem nacional, como soberania e segurança energética, ou global, como baixa emissão de GEEs justificariam impactos socioambientais locais e regionais.

A influência de hidrelétricas no balanço de carbono de rios amazônicos ainda é tema incerto. Isto se deve em grande parte à falta de dados precisos sobre processos biogeoquímicos que controlam a produção, consumo e emissão de gases estufa em rios tropicais (Hu & Cheng, 2013). No entanto, a hipótese de que hidrelétricas em rios amazônicos podem apresentar emissões de GEEs iguais ou superiores às de termelétricas alimentadas por hidrocarbonetos já foi aventada por estudos anteriores, com resultados que indicam ampla contribuição de reservatórios hidrelétricos para o saldo global de carbono emitido para a atmosfera (Barros et al., 2011;). Deemer et al. (2016), por sua vez, mostram que fatores relacionados à produtividade de cada reservatório são melhores indicadores de emissões de GEEs que latitude e idade do reservatório.

Caso confirmadas, tais hipóteses reservam implicações de caráter negativo acerca da real sustentabilidade oferecida por empreendimentos hidrelétricos, comumente generalizados como oferecendo energia totalmente limpa e renovável (Steinhurst et al., 2012). A consequência principal e imediata seria a grave derrubada de tal generalização, dando lugar a severo ponto negativo, representado pelas altas emissões previamente observadas em reservatórios de rios tropicais (Rosa et al., 2004; Faria et al., 2015).

2.3. Paleoprecipitação no Leste Amazônico e correlações com nível d'água

Modelos climáticos que realizam projeções de cenários climatológicos futuros podem ser continuamente aprimorados com o objetivo de aumentar o grau de confiabilidade das projeções (Randall et al., 2007). Neste contexto, o entendimento da evolução do clima da Amazônia em escala milenar é ferramenta essencial para reduzir incertezas em relação a sua exata natureza e variabilidade (Robinson e Dowsett, 2010).

A evolução do clima da Amazônia durante o Holoceno é há décadas estudada (e.g., Colinvaux et al. 1996; Behling et al. 2001; Maslin e Burns 2001; Pessenda et al. 2001; Turcq et al. 2002). No entanto, existe marcante carência de estudos com alta resolução temporal que abordaram a evolução hidroclimática da Amazônia e das áreas adjacentes para os últimos 3 ka (e.g., Meggers 1994; Cohen et al. 2005; Bush et al. 2008; Reuter et al. 2009). Meggers (2004) caracterizou, com base em evidências arqueológicas, períodos de seca marcante na Amazônia ao redor de 450, 950, 1250 e 1550 AD. Estas ocorrências estão correlacionadas a registros climáticos da porção costeira norte do Peru associados a eventos de mega-El Niño (Moy et al., 2002) que possivelmente também teriam sido responsáveis por fases de seca na Amazônia.

Por meio de micro-partículas de carvão, Bush et al. (2008) mostraram que picos na ocorrência de incêndios correlacionam-se com eventos anormalmente fortes de El Niño. Contudo, forte correlação também foi observada entre o mesmo registro de micro-partículas de carvão e mínima atividade solar. Já em escala orbital, um marcante dipolo zonal na precipitação sobre as porções oeste e leste da Amazônia foi descrito (Cruz et al. 2009; Cheng et al., 2013). Enquanto a porção leste da Amazônia apresentara marcante diminuição na precipitação (Cruz et al. 2009; Prado et al. 2013a; 2013b), a porção oeste da Amazônia registrou a transição do Holoceno inferior para o

Holoceno tardio com expressivo aumento na precipitação (van Breukelen et al. 2008; Cheng et al., 2013; Prado et al. 2013a; 2013b). Acredita-se que tal dipolo climático seria causado pelo significativo aquecimento convectivo sobre a porção oeste da Amazônia em situações de elevada insolação de verão no hemisfério sul que produz subsidência sobre a porção leste da Amazônia e regiões adjacentes (e.g., NE do Brasil).

No contexto da dinâmica hidrológica do Rio Xingu, verifica-se que eventos extremos, tanto de precipitação quanto de seca, com frequência multidecadal a milenar, são observáveis na porção oriental da Amazônia pelos mais variados indicadores (e.g. Bush et al., 1998; Cruz et al., 2005; Anhuf et al., 2006; Cheng et al., 2012; Wang et al., 2017). Sendo assim, interpreta-se que o comportamento do Rio Xingu seguramente variou em escala expressivamente maior que a observada desde o início da série histórica. Ao se aplicar informações obtidas a partir de estudos paleoclimáticos para a calibração de modelos climáticos, que até o momento não são capazes de simular inúmeras mudanças climáticas abruptas observadas no registro geológico (Lenton, 2011), simulações hidrológicas também têm seu grau de incerteza reduzido.

Considerando o fato que vazão se correlaciona positivamente com nível d'água medido em estações fluviométricas, por vezes até de maneira linear (Coe e Birkett, 2004), pode-se estender a interpretação de paleovazões e projeções de vazão futura para a inferência da variação do nível d'água em tais cenários. Dessa maneira, a visão voltada especialmente para o melhor entendimento possível da variabilidade da cota do Rio Xingu apresenta-se como importante ferramenta, à medida que impactos socioambientais causados pela formação do reservatório natural nos arredores de Altamira (PA) continuam a intensificar-se (Fearnside, 2018). A estagnação facilmente observável na Volta Grande do Xingu modificou significativamente a variação do nível d'água, afetando não só expressiva fauna e flora, muitas vezes endêmicas da Volta Grande do Xingu (Pérez, 2015), mas também atividades sociais e econômicas, tais como transporte fluvial (especialmente impactado ao longo do TVR) e pesca (impactada tanto a montante quanto a jusante da barragem de Pimental).

Finalmente, simulações da vazão futura potencialmente podem traduzir-se como projeções do nível futuro, variável que, por sua vez, possui a vantagem de ser

mais prática em termos de observações e análises, além de ter mais importância para os habitantes da Volta Grande do Xingu. Ao mesmo tempo, em cenários onde há projeção de redução da vazão, o consequente rebaixamento do nível d'água poderia expor áreas às margens do Rio Xingu, o que, apesar de aumentar a disponibilidade territorial, pode também amplificar impactos da variabilidade natural do nível d'água (i.e., cheias e secas), tais como processos desde intemperismo físico e químico e erosão até contribuição para assoreamento do reservatório, sendo, portanto, outro fator de risco no contexto do efeito da mudança climática sobre o rio. O aprofundamento de tal discussão, no entanto, depende fortemente da forma como ocorrerá a manutenção do nível do reservatório da hidrelétrica nas próximas décadas.

2.4. Impactos sociais, econômicos e ambientais da UHE Belo Monte

A dinâmica fluvial e sedimentar da Volta Grande do Xingu foi alterada de maneira irreversível para operação da UHE Belo Monte. Dentre as inúmeras consequências da implementação do reservatório hidrelétrico, pode-se destacar -se a eliminação de nichos ecológicos de espécies endêmicas de peixes reofílicos e litofílicos, tais como diversas espécies de acaris (e.g. Loricariids, *Hyphancistrus zebra*) e de importância socioeconômica (Gonçalves 2011), visto que impactos antropogênicos não só constituem o principal fator de estresse para o meio ambiente (Best, 2019) como podem reduzir a resiliência de ecossistemas aquáticos às mudanças climáticas (Malhi et al. 2008). Adicionalmente, a redução da disponibilidade futura de água poderá intensificar estes impactos, visto que haverá dificuldades para simulação do ciclo hidrológico natural, conforme previsto no plano da obra.

Por sua vez, a realocação de populações ribeirinhas, que vivem da pesca e da agricultura familiar, constitui grave problema social ainda em aberto e fortemente associado à variabilidade hidrológica futura (Magalhães e Cunha, 2017). Finalmente, caso cenários de potencial redução da vazão futura concretizem-se, as consequências não se restringem à esfera socioambiental, mas também econômica. Considerando o já elevado custo de implementação da UHE Belo Monte, cenários de seca poderão implicar no aumento no custo de geração de energia, medido em R\$/MWh gerado. Sendo assim, outro importante argumento em defesa da geração hidrelétrica de energia pode ser reavaliado caso seja constatado que o custo-benefício da UHE Belo Monte ao longo das próximas décadas poderá vir a ser cada vez inferior.

Capítulo 3

Métodos

– O que eu sempre digo a você? Tudo precisa ser levado em consideração. Se o fato não se encaixar na teoria, deixe a teoria de lado!

Detetive Hercule Poirot, em *O Misterioso Caso de Styles*, de Agatha Christie

3.1. Material utilizado

A principal ferramenta utilizada ao longo deste trabalho para projeções da vazão do Rio Xingu é a simulação hidrológica. Para isto, empregou-se o módulo de hidrologia do modelo numérico originalmente desenvolvido por Sacek (2014) para o cálculo de processos geodinâmicos na América do Sul.

O modelo numérico requer duas variáveis de entrada – topografia e precipitação. Para topografia, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) ETOPO1 (Amante e Eakins, 2009), fixado na escala de tempo deste trabalho na resolução de 1 arco-minuto. Com relação à precipitação, utilizou-se séries históricas obtidas a partir de estações pluviométricas distribuídas ao longo da Bacia do Rio Xingu e disponibilizadas pelo sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), até dados do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS), que compreende série histórica (1981-2016) de precipitação em escala global, representado por *grid* de células com resolução espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Também utilizou-se reconstruções de precipitação obtidas a partir de cinco modelos de circulação geral atmosférica (*General Circulation Models*, GCMs) elaborados para o *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5* (CMIP5), que faz parte do Quinto Relatório do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC A R5, 2014), previamente aplicados na América do Sul (Silva, 2015; Sorribas et al., 2016). Por fim, com relação ao clima futuro, projeções de precipitação para o período 2020-2050 foram obtidas a partir dos mesmos cinco modelos do CMIP5. A escolha do intervalo de 30 anos (2020-2050) para simulações de vazões futuras visa alinhamento com período coerente com o ciclo de vida típico de usinas hidrelétricas (Carvalho, 2008).

A Tabela 1, a seguir, sumariza os conjuntos de dados que compõem o material deste trabalho.

Tabela 1. Sumário dos conjuntos de dados utilizados neste trabalho.

Nome	Instituição	Período	Resolução Horizontal (lat x lon)	Referência
Modelo Digital de Elevação ETOPO1	<i>National Geophysical Data Center</i>	Presente	1 arco-minuto (0.016°)	Amante e Eakins (2009)
Estação Fluviométrica	Agência Nacional de Águas	1986-2016	Local (diversos)	Hidroweb
Estação Pluviométrica	Agência Nacional de Águas	1986-2016	Local (Altamira)	Hidroweb
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group</i>	1986-2016	Até 0.05° x 0.05°	Funk et al. (2015)
CNRM-CM5	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques</i>	1986-2005 e 2020-2050	1.4° x 1.4°	Voldoire et al. (2011)
GFDL-ESM2M	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	1986-2005 e 2020-2050	2.022° x 2.5°	Dunne et al. (2012)
HadGEM2-AO	<i>Met Office Hadley Centre</i>	1986-2005 e 2020-2050	1.25° x 1.875°	Collins et al. (2011)
MIROC5	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies</i>	1986-2005 e 2020-2050	1.4° x 1.4°	Watanabe et al. (2010)
MRI-CGCM3	<i>Meteorological Research Institute</i>	1986-2005 e 2020-2050	1.12° x 1.12°	Yukimoto et al. (2012)

Com relação às projeções futuras dos cinco modelos do CMIP5, optou-se pela utilização exclusiva do cenário RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*, Caminho Representativo de Concentração) do IPCC, que resulta de suposições de caráter socioeconômico, político e tecnológico quanto às possíveis forçantes radioativas até o ano de 2100 (Vuuren et al., 2011). Na prática, o cenário RCP 8.5 pode ser descrito como o cenário em que as taxas de variação observadas para os mais diversos indicadores continuarão evoluindo sem restrição, sendo, portanto, o cenário futuro com impactos mais significativos dos quatro disponíveis, no qual haverá o maior aumento populacional, de demanda energética e de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), levando assim à maior forçante radioativa, ou seja, maior potencial de aquecimento global. Deve-se ressaltar que, apesar de o cenário RCP 8.5 apontar consequências de gravidade significativamente maior, ainda assim é tão plausível quanto os outros três RCP, sendo amplamente utilizado na literatura (e.g. Guimberteau et al., 2016; Sorribas et al., 2016).

3.2. Funcionamento do modelo

A simulação da vazão é condicionada pela determinação do padrão de escoamento superficial a partir do modelo digital de elevação e algoritmo que assume escoamento entre duas células vizinhas na direção de maior gradiente topográfico. A malha utilizada para representar a topografia é regular e consiste em células quadradas, que permitem que o fluxo de água em uma certa célula ocorra para uma das oito células vizinhas. No caso de mínimos locais (Fig. 4), utiliza-se o algoritmo baseado no trabalho de Sacek (2014), que permite que a água de mínimos locais (lagos) escoe para o mínimo global (nível de base).

Figura 4. Ilustração do escoamento superficial de água entre células vizinhas na direção de maior gradiente topográfico. Fonte: Garcia-Castellanos (2002).

A partir do MDE e da aplicação do algoritmo descrito, o modelo hidrológico interconecta as células do modelo topográfico para gerar as bacias hidrográficas, que por sua vez podem ser melhor detalhadas e aprimoradas por meio de geoprocessamento (Fig. 5). Após a elaboração do modelo das bacias hidrográficas, calcula-se a vazão em um ponto a partir do deslocamento de massa de água superficial de uma célula para outra em determinado intervalo de tempo característico de escoamento τ . Esta representação assume certa velocidade média para o escoamento superficial e não leva em consideração a variação da velocidade de escoamento em função da declividade e geometria do canal.

Figura 5. Rede de drenagens de parte da Bacia do Rio Xingu, obtido após aplicação do algoritmo de escoamento superficial sobre imagens *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM).

Qualitativamente, um intervalo de tempo característico τ pequeno significa que a vazão em certo ponto da bacia de drenagem responde rapidamente à variação na precipitação sobre a bacia. Já valores altos de τ implicam no atraso na resposta da vazão do rio em relação a uma perturbação na taxa de precipitação. Deve-se ressaltar que, na presente formulação, τ é dependente do espaçamento da malha, ou seja, se o espaçamento entre os pontos aumentar, seria necessário aumentar proporcionalmente o τ para obter um cenário numérico equivalente.

Passado cada intervalo τ , o escoamento de água entre células vizinhas transporta o volume de água presente na célula naquele momento adicionando-se a água proveniente da precipitação local no intervalo de tempo. A precipitação é imposta em cada célula do modelo de acordo com dados de entrada e pode variar espacial e temporalmente. Além disso, aplica-se um fator f que representa uma fração da quantidade efetiva de água proveniente de precipitação que contribui com a vazão efetiva do rio. O fator f é expresso em porcentagem de mm dia^{-1} , de modo que valores de f próximos a zero representam expressiva restrição na contribuição da pluviosidade para a vazão do rio, simulando processos como infiltração e evapotranspiração, que retiram água do sistema rio-atmosfera.

A partir das séries históricas, o modelo hidrológico é calibrado por meio de sucessivas simulações de vazão com alternância dos parâmetros τ e f (Fig. 6). Calcula-se a diferença entre a vazão simulada para determinado período passado com base em série histórica de precipitação, e a vazão efetivamente observada. Deste modo, pode-se caracterizar a precisão do modelo numérico em simular a vazão histórica. Após extensa calibração, procede-se à simulação de vazão futura por meio dos parâmetros da rodada de calibração que apresentarem menor desvio-padrão, calculado de maneira automática ao comparar valores simulados e observados, e projeções de precipitação futura como arquivo de entrada, no lugar de séries históricas.

Figura 6. Simulação da vazão histórica do Rio Xingu, como parte da calibração do modelo hidrológico para distintos tempos de residência da água, a partir de dados históricos de precipitação CHIRPS (1980-2016). Pontos vermelhos representam dados observacionais da vazão do Rio Xingu em Altamira (1981-2015). À direita, são indicadas as diferenças entre valores simulados e observados, além do desvio padrão de cada análise

Capítulo 4

Resultados e discussões

Infelizmente, muitos esforços na busca de soluções concretas para a crise ambiental acabam, com frequência, frustrados não só pela recusa dos poderosos, mas também pelo desinteresse dos outros. As atitudes que dificultam os caminhos de solução, mesmo entre os crentes, vão da negação do problema à indiferença, à resignação acomodada ou à confiança cega nas soluções técnicas.

Trecho da Carta Encíclica *Laudato si'*, escrita em 2015 por Jorge Mario Bergoglio, o Papa Francisco

4.1. Projeções de precipitação para o período 2020-2050

Projeções de precipitação futura foram obtidas a partir de cinco modelos climáticos que compõem o CMIP5 (vide Tabela I) para o período 2020-2050. Os resultados (Fig. 7) foram tratados estatisticamente e dispostos em diagramas *boxplot* divididos em trimestres (Dezembro, Janeiro e Fevereiro – DJF; Março, Abril e Maio – MAM; Junho, Julho e Agosto – JJA; Setembro, Outubro e Novembro – SON), para melhor visualização de feições tais como variabilidade e potencial de extremos de cada modelo, definidos a partir da precipitação média histórica como referência. Observa-se que os distintos modelos concordam em particular nos trimestres SON e DJF (Setembro a Fevereiro), correspondentes à estação chuvosa na Bacia do Rio Xingu. Neste contexto, pode-se interpretar que a maior parte dos modelos indica que a frequência e intensidade de eventos climáticos de seca (medianas e quartis Q75 e Q25 inferiores aos históricos) deverão ser mais significativos no período 2020-2050 quando comparado à série histórica.

Paralelamente, nos trimestres MAM e JJA (Maio a Agosto), correspondentes à estação seca na Bacia do Rio Xingu, há maior variação entre modelos. Contudo, ressalta-se a diferença de escalas (e.g., no trimestre JJA quatro dos cinco modelos, incluindo série histórica, apresentam precipitações máximas da ordem de 1 mm dia⁻¹) e grande variabilidade dos dados históricos nessas estações.

Figura 7. *Boxplots* da precipitação (em mm dia⁻¹) histórica sobre a Bacia do Rio Xingu (cinza), além das projeções de precipitação para o período 2020-2050, obtidas a partir de cinco modelos climáticos.

Anomalias futuras de precipitação, i.e., a diferença entre cada valor simulado e a média histórica para o mesmo período, foram calculadas respectivamente com relação ao período 2020-2050 e histórico (Fig. 8).

Figura 8. Anomalias de precipitação futura calculadas para o período 2020-2050 com base nas projeções de precipitação dos cinco modelos utilizados. A linha preta representa a média móvel de 12 meses.

Similar à distribuição anterior, os resultados demonstram que, para três dos modelos abordados neste estudo, anomalias negativas de precipitação são dominantes nas projeções, sugerindo que eventos de seca poderão tornar-se mais frequentes e intensos. Não é possível observar tal comportamento para os modelos HadGEM2-AO, que apresenta anomalias periódicas e simétricas, e MRI-CGCM3, que, em consonância com a análise anterior, apresenta certa dominância de anomalias positivas.

Em média, projeta-se que a precipitação sobre a Bacia do Rio Xingu sob cenário de mudança climática irá decrescer em aproximadamente 10-20% no período 2020-2050, quando comparado às médias históricas. Há, contudo, expressiva – porém intrínseca - variabilidade nas projeções entre modelos, fato que aumenta a incerteza em relação às interpretações. No entanto, ao utilizar-se o trimestre DJF para exemplificar tal variabilidade, nota-se que, apesar de um entre os cinco modelos climáticos utilizados (o estadunidense GFDL-ESM2M) apontar reduções da ordem de 50% ou mais na precipitação (comparado a valores históricos), valores estes significativamente inferiores aos dos outros quatro modelos (o francês CNRM-CM5; o britânico HadGEM2-AO e os japoneses MIROC5 e MRI-CGCM3), ainda é possível observar tendência geral de diminuição na precipitação, mesmo que de maneira menos acentuada. Não obstante, a presença de frequentes e significativas anomalias negativas de precipitação corrobora a hipótese de que as próximas décadas serão menos chuvosas no leste amazônico.

4.1. Simulações de Vazão Futura do Rio Xingu

Após a calibração do modelo numérico hidrológico, procede-se à simulação de vazão alimentada pelas projeções de precipitação futura derivadas dos cinco modelos climáticos utilizados (Fig. 9). Como o cenário calculado é iniciado “seco”, sem escoamento superficial, de modo que os primeiros meses de simulação não simulam apropriadamente a vazão observada, leva certo tempo para o modelo adquirir configuração mais realista da vazão. Assim, adotou-se o procedimento de duplicar o primeiro ano de precipitação no início da simulação, de modo que a simulação foi iniciada um ano antes da data indicada. Por este motivo, o primeiro ano do período simulado é descartado da análise.

Figura 9. Simulações da vazão futura (2020-2050) do Rio Xingu após calibração do modelo numérico, para $\tau = 3.5$ horas e $f = 30\%$ e com base nas projeções futuras de precipitação dos cinco modelos climáticos. A curva preta representa a simulação histórica para o período 1986-2016, e as linhas tracejada e pontilhada representam, respectivamente, a média histórica de vazões de cheia do período avaliado ($Q = \sim 19.512 \text{ m}^3/\text{s}$) e a vazão necessária para a geração plena de energia, mantendo-se o comprometimento com liberação de água para o Trecho de Vazão Reduzida ($Q = \sim 24.000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Os resultados das simulações de vazão futura do Rio Xingu apontam predominância de cenários onde ocorre redução na vazão, em relação à série histórica. Observa-se que, ao passo que a média histórica de cheias é superior a 19.000 m³/s, apenas um entre os cinco modelos climáticos projeta vazões da mesma ordem, ou superiores. Ressalta-se que a própria simulação de vazão histórica (curva preta) situa-se abaixo desta linha, devido à natureza intrínseca do modelo hidrológico, que ao longo da calibração mostrou limitações com relação à simulação das maiores vazões de cheia registradas na série histórica. Tal fato leva a crer que ainda há certo viés do modelo para simular vazões mais altas, possivelmente causado pelo reduzido número de graus de liberdade e variáveis de entrada. Além disso, seguem-se esforços contínuos para a melhor representação de vazões de cheia (especialmente as maiores observadas no registro histórico), de modo a diminuir o erro associado às simulações de vazão futura.

Não obstante, a redução de vazão observada em quatro dos cinco experimentos (cujos modelos climáticos também apontaram redução na precipitação sobre a bacia) é da ordem de 20 a 30% inferior em relação à média histórica, podendo alcançar valores de até 50% em anos que apresentam projeções de significativas anomalias negativas associadas. Tais valores são de ordem superior aos do potencial viés observado para vazões de cheia, ou seja, apesar da limitação inerente ao modelo numérico, a redução observada ainda é significativa o bastante para ser avaliada.

A simulação realizada a partir do modelo climático MRI-CGCM3, similarmente aos resultados já observados, projeta aumento na disponibilidade de água do Rio Xingu, devido principalmente às vazões nas estações de seca. Com relação às simulações referentes aos modelos CNRM-CM5 e HadGEM2-AO, apesar da tendência de redução geral da vazão observada, destaca-se que as vazões mínimas simuladas são, por sua vez, superiores às observadas historicamente. A aparente incongruência representada pela relativa valorização de vazões de seca e redução de vazões de cheia (quando comparadas às históricas) ocorre devido à forma inerente como cada um dos modelos climáticos projeta o comportamento pluviométrico futuro na região do leste amazônico, neste caso indicando que, para tais modelos, apesar da redução geral na vazão, as estações de seca potencialmente não serão tão afetadas quanto as de cheia.

Potencial hidrelétrico futuro

O acionamento conjunto das dezoito turbinas Francis presentes na Casa de Força Principal ao término da instalação (vazões nominais de 775 m³/s por turbina, segundo Nota Técnica EPE-DEE-RE004/2010-R0, de 2010) e o comprometimento mínimo com a liberação de água para o Trecho de Vazão Reduzida, representada pelo Hidrograma de Consenso (MME/EPE, 2010) implicam que, nos meses de cheia (trimestre MAM), durante os quais espera-se operar a plena capacidade, serão necessárias vazões da ordem de 20.000 a 25.000 m³/s. Este valor é reforçado pelo fato de se tratar de projeto hidrelétrico do tipo fio d'água, no qual efetivamente se faz necessário a ocorrência de vazões de tal ordem para a manutenção da geração energética.

Ao analisar os resultados da simulação de vazão futura do Rio Xingu, é possível observar que apenas um dos quatro modelos climáticos é capaz de reproduzir vazões condizentes com as atuais, que eventualmente ultrapassam a média histórica de vazões de pico, mas ainda assim permanecem abaixo da vazão necessária para o funcionamento completo da UHE Belo Monte sem comprometimento da destinação de parte da vazão para o TVR. As simulações realizadas com base nos outros quatro modelos climáticos apontam vazões ainda menores.

Desta forma, faz-se imprescindível analisar de maneira crítica os cenários hidrológicos decorrentes da mudança climática projetada para as próximas décadas. Em outras palavras, as simulações indicam que, nos próximos 30 anos, em quatro dos cinco cenários projetados, o Rio Xingu terá sua vazão significativamente reduzida, que afetaria diretamente seu potencial de geração de energia hidrelétrica. Tal interpretação possui consequências de expressiva gravidade, pois desafia a resiliência e segurança energética oferecida pela UHE Belo Monte ao país.

Capítulo 5

Conclusões

There's optimists and pessimists

I don't know which is worse

Ringo Starr - Hopeless

5. CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho sugerem que a UHE Belo Monte, pilar da recente expansão hidrelétrica brasileira, pode ser extensamente afetada por alterações no regime de precipitação da Bacia do Rio Xingu decorrentes da mudança climática. O principal produto apresentado corresponde a simulações da vazão futura do Rio Xingu com base em projeções de precipitação de cinco modelos climáticos para o período 2020-2050, de modo a avaliar o impacto da mudança climática na vazão do rio e operação da usina hidrelétrica. Obtiveram-se valores da ordem de 20 a 30% de redução média de vazões, quando comparado à série histórica de vazão em Altamira (PA).

Considerando os temas já abordados, tais projeções de vazão futura suportam a necessidade de reavaliação do real custo-benefício de empreendimentos hidrelétricos de grande escala, particularmente os localizados em rios tropicais, tais como Mekong e Congo (Winemiller et al., 2016). Os resultados não só possuem importantes implicações na esfera econômico-energética, em que as projeções futuras de vazão reduzida podem ser interpretadas como potencial redução na geração efetiva de energia ao longo das próximas décadas, como também representam potencial intensificação de impactos socioambientais na região da Volta Grande do Xingu, tais como conflitos relacionados à água no Trecho de Vazão Reduzida, além da intensificação de impactos sobre ecossistemas aquáticos e de planícies de inundação.

Não obstante limitações intrínsecas aos métodos aplicados, como o número reduzido de graus de liberdade, favorecendo assim simplicidade e velocidade das simulações, as projeções futuras de vazão fornecem um importante ponto de vista alternativo em relação à questão hidrelétrica na Amazônia. O método aplicado possui potencial para outras regiões ao redor do mundo, e há grande espaço para aprimoramento do modelo numérico, buscando a melhor eficiência tanto em termos de acurácia durante a calibração, quanto de simplicidade e tempo de análise.

Ao passo que energia hidrelétrica permanece sendo uma das fontes de eletricidade mais baratas e bem-sucedidas em escala global, também é extremamente vulnerável a variações climatológicas, projetadas para ocorrer em maior frequência e intensidade futuramente. Em outras palavras, é possível que, nas próximas décadas,

a geração hidrelétrica de energia torne-se cada vez menos confiável, sustentável e até mesmo renovável (ou, ao menos, que o fator ‘segurança energética’ de hidrelétricas seja revisitado).

Por fim, deve-se ressaltar a importância de trabalhos científicos destinados à Amazônia e à preservação da biodiversidade e riqueza sociocultural por ela abrigadas há dezenas de milhares de anos. Não só a floresta possui enorme significado estratégico em termos de soberania nacional, como se faz patrimônio essencial para o correto ‘funcionamento’ do clima a nível global, devendo, portanto, ser de comum interesse a preservação e uso/ocupação sustentáveis, quando estritamente necessário. Caso contrário, os cenários descritos ao longo desta dissertação podem vir a estar absolutamente corretos, ou, em último caso, otimistas demais.

REFERÊNCIAS

- Amante, C., Eakins, B.W., 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA, doi: 10.7289/V5C8276M.
- Barros, N., et al., 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, v. 4, no. 9, p. 593, doi: 10.1038/ngeo1211.
- Behling, H., Negrelle, R.R., 2001. Tropical rain forest and climate dynamics of the Atlantic lowland, Southern Brazil, during the Late Quaternary. *Quaternary Research*, v. 56, no. 3, p. 383-389, doi: 10.1006/qres.2001.2264.
- Best, J., 2019. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, v.12, p. 7-21, doi: 10.1038/s41561-018-0262-x.
- Bush, M. B., Silman, M. R., McMichael, C., Saatchi, S., 2008. Fire, climate change and biodiversity in Amazonia: a Late-Holocene perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 363, no. 1498, p. 1795-1802, doi: 10.1098/rstb.2007.0014.
- Carvalho, J.F., 2008. Prioridades para investimentos em usinas elétricas. *Estudos Avançados*, v. 22, no. 64, p. 215-225, doi: 10.1590/S0103-40142008000300013.
- Cheng, H., Sinha, A., Cruz, F.W., Wang, X., Edwards, R.L., d'Horta, F.M., Ribas, C.C., Vuille, M., Stott, L.D., Auler, A.S., 2013. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity, *Nature communications*, v. 4, p.1411, doi: 10.1038/ncomms2415.
- Coe, M.T., Birkett, C.M., 2004. Calculation of river discharge and prediction of lake height from satellite radar altimetry: Example for the Lake Chad basin. *Water Resources Research*, v. 40, no. 10, doi: 10.1029/2003WR002543.
- 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. *Journal of Hydrology*, v. 369, no. 1-2, p. 165–174, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.043.
- Cohen, M. C., Souza Filho, P. W., Lara, R. J., Behling, H., & Angulo, R. J., 2005. A model of Holocene mangrove development and relative sea-level changes on the Bragança Peninsula (northern Brazil). *Wetlands Ecology and Management*, v.13, no. 4, p. 433-443, doi: 10.1007/s11273-004-0413-2.
- Colinvaux, P.A., De Oliveira, P.E., Moreno Patiño, J., 1996. Amazon Pollen manual and atlas, Amsterdam: Harwood Academic Publishers.
- Collins, W. J, et al., 2011. Development and evaluation of an Earth-System model—HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, v. 4, no. 4, p. 1051-1075, doi: 10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Cruz, F. W., et al., 2009. Orbitally driven east–west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, v. 2, no. 3, p. 210-214, doi: 10.1038/ngeo444.
- Deemer, B. R., et al., 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, v. 66, no.11, p 949-964, doi: 10.1093/biosci/biw117.
- Dunne, J. P., et al., 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, v. 25, no. 19, p. 6646-6665, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- EPE-DEE-RE-004/2010-R0. Estudos para Licitação da Expansão da Geração: Cálculo da Garantia Física da UHE Belo Monte. Empresa de Pesquisa Energética. 2010.
- Faria, F. A., Jaramillo, P., Sawakuchi, H. O., Richey, J. E., Barros, N., 2015. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. *Environmental Research Letters*, v. 10, no. 12, 124019, doi: 10.1088/1748-9326/10/12/124019.
- Fearnside, P. M. 2008. The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecology and Society*, v. 13, no.1, doi: 10.5751/ES-02451-130123.

- Fearnside, P. M., 2016a. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. *World Development*, v. 77, p. 48-65, doi: 10.1016/j.worlddev.2015.08.015.
- Fearnside, P. M., 2016b. Tropical dams: to build or not to build? *Science*, v. 351, no. 6272, p. 456-457, doi: 10.1126/science.351.6272.456-b.
- Fearnside, P. M., 2018. Brazil's Amazonian forest carbon: the key to Southern Amazonia's significance for global climate. *Regional Environmental Change*, v. 18, no. 1, 47-61, doi: 10.1007/s10113-016-1007-2.
- Fisch, G., Marengo, J. A., Nobre, C. A., 1996. Clima da Amazônia. Boletim do Climanálise Especial – Comemoração dos 10 anos. Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a>>. Acesso em: 22/07/2018.
- Funk, C., et al. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, v. 2, 150066, doi: 10.1038/sdata.2015.66.
- Garcia-Castellanos, D., 2002. Interplay between lithospheric flexure and river transport in foreland basins. *Basin Research*, v. 14, no. 2, p. 89-104, doi: 10.1046/j.1365-2117.2002.00174.x.
- Gonçalves, A. P. 2011. Ecologia e etnoecologia de *Hypancistrus zebra* (Siluriformes: Loricariidae) no rio Xingu, Amazônia brasileira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Biológicas, Belém, 2011. 133 pp.
- Guimberteau, M., et al., 2016. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 430, doi: 10.5194/hess-21-1455-2017.
- Guimberteau, M., et al., 2018. ORCHIDEE-MICT (v8. 4.1), a land surface model for the high latitudes: model description and validation. *Geoscientific Model Development*, v. 11, no. 1, p. 121, doi: 10.5194/gmd-11-121-2018.
- Hayhoe, S. J., et al., 2011. Conversion to soy on the Amazonian agricultural frontier increases streamflow without affecting stormflow dynamics. *Global Change Biology*, v. 17, no. 5, p. 1821-1833, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02392.x.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri, R. K., Meyer, L. A. (eds.). IPCC, Geneva, Suíça. <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>>. Acesso em 22/02/2018.
- Lathuillière, M. J., Couto, E. G., Johnson, M. S., 2012. Virtual and Embedded Nutrient Flows from Soybean Production in Mato Grosso, Brazil. In AGU Fall Meeting Abstracts , v. 1, p. 0974.
- Lees, A.C., Peres, C.A., Fearnside, P.M., Schneider, M., Zuanon, J.A.S., 2016. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. *Biodiversity Conservation*, v.25, p. 451-466, doi: 10.1038/nclimate1143.
- Lenton, T. M., 2011. Early warning of climate tipping points. *Nature climate change*, v. 1, no. 4, p. 201.
- Macedo, M. N., DeFries, R. S., Morton, D. C., Stickler, C. M., Galford, G. L., Shimabukuro, Y. E., 2012. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, no. 4, p. 1341-1346, doi: 10.1073/pnas.1111374109.
- Magalhães, S.M., Cunha, M.C. (s.), 2017. A expulsão de ribeirinhos em Belo Monte: São Paulo: SBPC, 448 p.
- 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*, v. 319, no. 5860, 169-172.

- Mallia, E., Lewis, G., 2013. Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of Ontario, Canada. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, no. 2, 377-391, doi: 10.1007/s11367-012-0501-0.
- Marengo, J. A., Nobre, C. A., 2009. Clima da Região Amazônica. In: Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G., Dias, M. A. (s.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 197-212.
- Maslin, M.A. Burns, S.J., 2001. Reconstruction of the Amazon basin effective moisture availability over the past 14,000 years. *Science*, v. 290, p. 2285-2287, doi: 10.1126/science.290.5500.2285.
- Meggers, B J. 2004. Numbers from Nowhere Revisited: Response to Stahl. *Review of Archaeology*, v. 25, p. 31–39.
- Meggers, B. J., 1994. Archeological evidence for the impact of mega-Nino events on Amazonia during the past two millennia. *Climatic change*, v. 28, no. 4, p. 321-338, doi: 10.1007/BF01104077.
- Ministério do Planejamento, Governo Federal, 2016. 10 Maiores obras do PAC 2. Disponível em <<http://www.pac.gov.br/i/f1e1c8ab>>. Acessado em 22/10/2018.
- MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2010. Cálculo da Garantia Física da UHE Belo Monte. Estudos para a Licitação da Expansão da Geração. Brasília, EPE-DEE-RE-004/2010-R0, p. 1-32.
- MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2015. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília, p. 1-447.
- MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2018. Balanço Energético Nacional 2018, Relatório Síntese, Ano base 2017. Disponível em <ben.epe.gov.br>. Acessado em 18/10/2018.
- Moy, C. M., Seltzer, G. O., Rodbell, D. T., Anderson, D. M., 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, v. 420, no. 6912, p. 162, doi: 10.1038/nature01194.
- Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Lettenmaier, D. P., Lohmann, D., Wood, E. F., 2001. Predicting the discharge of global rivers. *Journal of Climate*, v. 14, p. 3307-3323, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<3307:PTDOGR>2.0.CO;2.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NWS (National Weather Service). Tropical Weather. <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tropics_intro.html>. Acesso em 11/11/2018.
- Norte Energia S.A, 2016. UHE Belo Monte. <<http://norteenergiasa.com.br/revista/>>. Acessado em 20/10/2016.
- O'Gorman, P. A., 2012. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nature Geoscience*, v. 5, no. 10, p. 697-700, doi: 10.1038/ngeo1568.
- Paiva, R. C. D., et al., 2013. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, v. 49, no. 3, p. 1226-1243, doi: 10.1002/wrcr.20067.
- Pérez, M.H., 2015. Where the Xingu bends and will soon break. *American Scientist*, v.103, p. 395–403, doi: 10.1511/2015.117.395.
- Pessenda, L. C., et al., 2001. Origin and dynamics of soil anic matter and vegetation changes during the Holocene in a forest-savanna transition zone, Brazilian Amazon region. *The Holocene*, v. 11, no. 2, p. 250-254, doi: 10.1191/095968301668898509.
- Prado, L. F., Wainer, I., Chiessi, C. M., 2013a. Mid-Holocene PMIP3/CMIP5 model results: Intercomparison for the South American monsoon system. *The Holocene*, no. 0959683613505336, doi: 10.1177/0959683613505336.
- Prado, L. F., Wainer, I., Chiessi, C. M., Ledru, M. P., & Turcq, B., 2013b. A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America. *Climate of the Past*, v. 9, no. 5, p. 2117-2133, doi: 10.5194/cp-9-2117-2013.

- Randall, D. A., et al., 2007. Climate models and their evaluation. In *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (FAR)* (p. 589-662). Cambridge University Press.
- Reuter, J., Stott, L., Khider, D., Sinha, A., Cheng, H., Edwards, R. L., 2009. A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, v. 36, no. 21, doi: 10.1029/2009GL041051.
- Rosa, L. P., Dos Santos, M. A., Matvienko, B., Dos Santos, E. O., Sikar, E., 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change*, v. 66, no. 1-2, p. 9-21, doi: 10.1023/B:CLIM.0000043158.52222.ee.
- Sacek, V., 2014. Drainage reversal of the Amazon River due to the coupling of surface and lithospheric processes. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 401, p. 301-312, doi: 10.1016/j.epsl.2014.06.022.
- Santos, S. M., Hernandez, F. M. (s.), 2009. Painel de Especialistas: Análise Crítica do Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte, p. 1-230.
- Silva, G. A. M., Mendes, D. 2015. Refinement of the daily precipitation simulated by the CMIP5 models over the north of the Northeast of Brazil. *Frontiers in Environmental. Science*, v. 3, doi: 10.3389/fenvs.2015.00029.
- Soares-Filho, B.S. et al., 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v. 440, no. 7083, p. 520–523, doi: 10.1038/nature04389.
- Sorribas, M. V., et al., 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, v. 136, p. 555-570, doi: 10.1007/s10584-016-1640-2.
- Steinhurst, W., Knight, P., Schultz, M., 2012. Hydropower greenhouse gas emissions. *Conservation Law Foundation*, v. 6.
- Stickler, C. M., Coe, M. T., Costa, M. H., Nepstad, D. C., McGrath, D. G., Dias, L., Rodrigues, H. O., Soares-Filho, B. S., 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, no. 23, p. 9601-9606, doi: 10.1073/pnas.1215331110.
- Tolmasquim, M. T., Gorini, R., Matsumura, E., Soares, J., Oliveira, L., 2016. The Brazilian commitment to combating climate change: energy production and use. *Empresa de Pesquisa Energética-EPE*, Rio de Janeiro, Brazil, p. 1-96.
- Turcq, B., et al., 2002. Accumulation of anic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology*, v. 148, no. 1, p. 319-342, doi: 10.1016/S0037-0738(01)00224-X.
- Van Breukelen, M. R., Vonhof, H. B., Hellstrom, J. C., Wester, W. C. G., Kroon, D., 2008. Fossil dripwater in stalagmites reveals Holocene temperature and rainfall variation in Amazonia. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 275, no. 1, p. 54-60, doi: 10.1016/j.epsl.2008.07.060.
- Voldoire, A., et al., 2013. The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, v. 40, no. 9-10, p. 2091-2121, doi: 10.1007/s00382-011-1259-y.
- Vuuren, D. P., et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109, no. 5, doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Watanabe, S., et al., 2011. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 845, doi: 10.5194/gmd-4-845-2011.
- Winemiller, K.O., et al., 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, v. 351, no. 6269, p. 128-129, doi: 10.1126/science.aac7082.
- Yukimoto, S., et al., 2012. A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—model description and basic performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 2, no. 90, p. 23-64, doi: 10.2151/jmsj.2012-A02.

APÊNDICE A

Manuscrito a ser submetido ao periódico *Renewable and Sustainable Energy Reviews*

Impacts of climate change on Brazil's Xingu River flow and its effects upon the fate of Amazon's giant hydropower plant Belo Monte

Camargo, M.G.P.^{1*}; Sacek, V.²; Silva, G.A.M.³; Sawakuchi, A.O.¹

*marcelogpcamargo@gmail.com

1 – Institute of Geosciences, University of São Paulo. Rua do Lago, 562, São Paulo, SP, Brazil, 05508-080.

2 – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo. Rua do Matão, 1226, São Paulo, SP, Brazil, 05508-090.

3 – Sea Institute, Federal University of São Paulo, Rua Jardim Silva, 136, Santos, SP, Brazil, 11015-020.

Abstract:

Considering the unquestionable relevance in Brazil's total energy production capacity, hydropower expansion in Brazil is projected to continue for at least a decade, especially in the Amazon region. However, climate change effects over the Amazon rainfall and future surface water availability were not extensively explored in official projects and energy expansion reports. In this context, the present study aims to provide insights into the effects of climatic change upon eastern Amazon, particularly the Xingu River Basin, and apply a numerical hydrologic model to simulate Xingu River's future discharge, based on future rainfall projections from five CMIP5 GCMs. Our findings show that rainfall is expected to decrease in four out of the five scenarios, although there is considerable variability between GCMs. Discharge simulations were conducted for both historical and projected rainfall, and results show that in the next 30 years, the Xingu River is expected to have a 20-30% reduced discharge, when compared to historical values. These results should help open up the discussion of new energy policies for Brazil. Also, we emphasize that a special attention needs to be care out regarding the impact of the climate change on the availability of the main resource for the hydroelectrics: the rainfall.

Keywords: Xingu River Basin, Belo Monte hydropower plant, climate change, numerical hydrologic simulation.

1. Introduction

Historically, hydropower has been the major source of electricity in Brazil for the last four decades (Tolmasquim, 2016). For instance, in 2017 it contributed with 407.3 TWh of a total electric supply of 624.3 TWh, or impressive 65.2% (MME/EPE, 2018). Recent studies about future energy supply and demand commissioned by the Brazilian government (MME/EPE, 2017) project a 13.8 GW or 14% increase in installed hydropower capacity until 2026, mostly in the Amazon region, which in the last few years already accounted for 85% of new installed capacity (Fearnside, 2016a).

The main responsible for the recent hydropower expansion in Amazon is Brazil's giant Belo Monte hydropower plant, located in Eastern Amazon's Xingu River, in the so-called 'big bend of the Xingu', in the State of Pará. The Belo Monte hydropower plant was officially inaugurated in May 2016 and, upon its completion in 2019, it will have a total installed capacity of 11,233 MW, placing it as the fourth largest hydroelectric power station in the world, and the largest one located entirely in Brazil. With a total cost that varied from 6 to 9 billion US dollars during its construction (Brazilian Ministry of Planning, 2016), the project consists in two run-of-river dams, Pimental, which effectively impounds the Xingu River, diverting part of its flow through a bypass channel connected to an intermediary artificial reservoir formed by the Belo Monte dam (Fig. 1). When combined, the reservoir in the Xingu River, with approximately 70 kilometers length, and the artificial reservoir make up a total flooded area of 478 km² (Norte Energia, 2016).

Figure 1. Radar image showing Xingu River's "big bend" as of January/2016, in the context of Xingu River's basin (gray), with Belo Monte's main features highlighted.

Since its conception as a project, the Belo Monte hydropower plant was heavily criticized by scientific, indigenous and local communities (Painel de Especialistas, 2016) and has been the subject of several discussions and studies regarding its significant socio-environmental impacts, costs and effective power generation (e.g. Fearnside, 2015, Winemiller *et al.*, 2016).

One of the most controversial aspects of the Belo Monte hydropower plant is its average power generation throughout the year, projected to be around 4.571 MW, or approximately 40% of the total installed capacity (MME/EPE, 2010). This happens both due to the fact that RoR projects, despite considered a fast and sustainable mode of hydropower generation (Kumar and Karoch 2014), have a reduced reservoir area and a higher natural flow dependence (Egré and Milewski 2002), and to the fact that the Xingu River's discharge is highly seasonal, varying up to 40 times between dry and wet seasons, meaning that only during a short 2-month window (see Fig. 2), Belo Monte will be able to produce electricity up to its full capacity while also maintaining the reservoir's level. As for the dry season, which historically lasts about 4 to 5 months (Fig. 2), most – if not all – turbines have to be shut down for water management purposes, especially due to the fact that there's an official commitment (MME/EPE, 2010) of water releasing to the region located downstream of the Pimental Dam, called the Stretch of Reduced Instream Flow (SRIF). The SRIF, hosting several endemic species of fishes (Gonçalves, 2011) as well as local indigenous and riverside people, has already been heavily affected by water scarcity since the damming of the river, with water conflicts being expected to rise rapidly in the next few years.

Figure 2. Average monthly discharge for the Xingu River between 1971 and 2016, measured on a local river gauge located in Altamira, PA.

Another concerning topic regarding Belo Monte hydropower plant, effectively neglected by the official project and following studies (e.g. MME/EPE, 2010, Norte Energia, 2011, 2016), is the projected future water supply of the Xingu River's Basin under scenarios of climate change, and how it could impact its generation capacity. Extensive experiments made by several Global Circulation Models (GCMs) for the

Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), also featured on Intergovernmental Panel on Climate Change's (IPCC) Fifth Assessment Report (AR5), have projected less precipitation and lower local runoff in the next decades on eastern Amazon, especially over the Xingu River Basin (e.g. Sorribas *et al.*, 2016; Stickler *et al.*, 2013).

Considering the facts that (1) Belo Monte's cost-benefit is still not well-established, since the project's cost increased by 50% during the construction and the average yearly production is expected to be around 40% of the total installed capacity and (2) climate models often project a drier eastern Amazon in the next decades, this work aims to provide simulations of Xingu River's future discharge for the next 30 years, based on precipitation projections from five CMIP5 models and by using a hydrological numerical model (Sacek, 2014) that simulates drainage systems based on topography and rainfall data. After calibrating the model with historical rainfall data and comparing measured and simulated discharges for a set period of time, it is possible to simulate Xingu River's future discharge and convert it into power generation, given that in RoR systems production depends primarily on the river's natural flow (Carvalho, 2008).

2. Numerical model inputs and operation

In order to simulate Xingu River's future discharge, we utilized the hydrological module of a numerical model originally developed for calculating geodynamic processes (Sacek, 2014). The model requires two input variables – topography and precipitation. For topography, we used ETOPO1 Digital Elevation Model (DEM) (Amante and Eakins, 2009) fixated in this work's time scale with a 1 arc-minute resolution. Regarding precipitation, historical data ranging from Brazilian's National Water Agency's (ANA) weather stations distributed over Xingu River's basin to CHIRPS InfraRed rainfall dataset and also reconstructed precipitation from five CMIP5 models for the 1980-2015 period was utilized. As for future rainfall projections, we collected the results for monthly precipitation simulations between 2020 and 2050 from the r1i1p1 ensemble of the same five models under the RCP8.5 scenario (Vuuren *et al.*, 2011). Despite GCM runs reaching as late as the end of the century, a 30-year period was chosen in order to better fit the life cycle of a hydroelectric plant. Finally, a 40-year historical series of the Xingu River's daily natural flow was obtained from one of ANA's river gauges located in Altamira (PA). All datasets and sources are listed in Table I.

Table I. Dataset collection used in this work.

Name	Institution	Period	Horizontal Resolution (lat x lon)	Reference
ETOPO1 Digital Elevation Model	National Geophysical Data Center	Present	1 arc-minute (0.016°)	Amante & Eakins (2009)
Estação Fluviométrica	Agência Nacional de Águas	1986-2016	Local (several)	Hidroweb
Estação Pluviométrica	Agência Nacional de Águas	1986-2016	Local (Altamira)	Hidroweb
CHIRPS	Climate Hazards Group	1986-2016	Até 0.05° x 0.05°	Funk et al. (2015)
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques	1986-2005 & 2020-2050	1.4° x 1.4°	Voldoire et al. (2011)
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1986-2005 & 2020-2050	2.022° x 2.5°	Dunne et al. (2012)
HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre	1986-2005 & 2020-2050	1.25° x 1.875°	Collins et al. (2011)
MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	1986-2005 & 2020-2050	1.4° x 1.4°	Watanabe et al. (2010)
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	1986-2005 & 2020-2050	1.12° x 1.12°	Yukimoto et al. (2012)

The application of both algorithms (rainfall over cells and sink removal) generates cell interconnectivity, accurately shaping the Xingu watershed (Fig. 3). It is also assumed that the surface water flow between one cell and another happens in a characteristic time span τ , i.e., water runoff speed is considered to be constant, thus changes in speed due to channel declivity or geometry are not evaluated. Quantitatively, a small τ implies that the water flow in a certain region of the drainage basin responds rapidly to a variation in the rainfall over the basin, while higher values imply a delay between changes in precipitation and the river's discharge response. In each time step τ , water drainage happens by transporting the whole volume of water from a cell to its adjacent one, while also adding local rainfall for that time interval. Rainfall is imposed on each cell according to the available input data, and may change spatially and temporally. Additionally, only a fraction f of the total precipitation contributes to surface runoff, representing an effective precipitation that directly recharges the river system. This factor f is necessary to ensure the mass balance between the observed precipitation and the measured discharge over the last decades.

Figure 3. Xingu River basin in the context of *Shuttle Radar Topographic Mission* DEM.

2.1. Model calibration

Before running future discharge simulations, the model was used to run simulations based on historical rainfall CHIRPS data, and the results were statistically compared to historical discharge for the period 1981-2015. Four typical time steps τ previously established were tested in this experiment, in order to find the best water residency time in each cell to be applied for further analysis. Results were compared to the observed discharges for the same period, measured on a river gauge in Altamira city, and standard deviations between simulated and observed discharges were calculated (see Table II). Results show that $\tau = 3.5$ hours is the most suitable cell water residency time (Fig. 4). Additionally, we observed that a fraction $f = 0.3$ is appropriate to preserve mass balance between effective precipitation and water discharge.

It is also worth noticing that, despite the fact that there are hydrologic models that simulate a river's flow with minimum error (Sorribas et al., 2016), these are usually significantly more complex or focused on significantly smaller watersheds, and often offer higher experiment durations (Fan et al., 2016). The main advantage of the use of a simple hydrologic model consists on its cost-benefit regarding analysis time and results accuracy, i.e., if extensive calibration is applied in order to reduce uncertainty, projections of future discharge become more reliable, with a significantly reduced analysis time.

Figure 4. Xingu River's historical discharge simulations as part of numerical model's calibration for several water residency times, based on historical CHIRPS precipitation data (1980-2016). Red dots represent observed discharges of the Xingu River in Altamira (1981-2015). On the right, differences between simulated and observed results are shown, as well as standard deviation.

3. Rainfall over the Xingu River basin

3.1. Present-day climatology

In order to better understand the hydropower potential of the Xingu River's Big Bend, in the sector of the Belo Monte hydropower plant, it is essential to analyze the temporal and spatial patterns of rainfall over the 530,000 km² watershed (ref). Rainfall in Amazon is significantly heterogeneous (Marengo, 2008) both spatial and seasonally, with at least three abundant precipitation cores that initiate during southern-hemisphere spring and maximize by summer (Fisch et al., 1996).

In a general way, rainfall over Amazon is climatologically influenced by the South American Monsoon System (SAMS, Zhou and Lan, 1998), and its variability is associated with Sea Surface Temperature (SST) anomalies on both Pacific and Tropical Atlantic oceans (Marengo and Nobre, 2009).

There are also two relevant climate systems that act over the Amazon (i) the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), a low pressure tropical belt consisting of deep convective cells formed by the encounter of trade winds (Schneider et al., 2014), which shifts from north to south of the Equator due to changes on SST and atmospheric circulation (NOAA/NWS, 2011) and (ii) the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), consisted of a NW-SE elongated convective zone typically originated over the Amazon Basin, that carries humidity from both the Atlantic Ocean and the Amazon to Brazil's centre-southern regions (Carvalho et al., 2004). In addition, the fact that the Xingu River basin is roughly N-S oriented and occurs approximately from 1°30' S to 15° S led to significant heterogeneity in the region's pluviosity (Fig. 5).

Fig. 5. Average historical precipitation (1971-2011) over Xingu River Basin divided by trimesters.

Extracted from Franco et al., 2018

Rainfall over the Xingu River basin is highly seasonal, with maximum rainfall in summer (December-January-February, DJF), during which NW-SE oriented SACZ accounts for over 11 mm day⁻¹ rainfall. By

Fall (March-April-May, MAM), the ITCZ is responsible for higher rainfall on the northern portion of the basin, whereas the June-July-August (JJA) period is characteristically the driest season. During September-October-November (SON), southwestern convection starts to re-establish, with increments in rainfall. (Franco et al 2018, CPRM, 2018).

3.2. Multimodel future precipitation projections

Projections of future rainfall were extracted for the study area from five traditionally utilized (refs) CMIP5 models for the 2020-2050 period (Fig. 6). When compared to historical rainfall values, it is observed that projections for different GCMs mostly agree on drier wet seasons (DJF, SON) and slightly wetter dry seasons (MAM, JJA). In addition, variability between models is significant.

Figure 6. Historical 40-year average and multimodel projections of future rainfall (2020-2050). Values in mm day⁻¹. Note for different scales.

In average, precipitation is projected to decrease by roughly 10-20% during the 2020-2050 period, compared to historical (1976-2016) values. Also, the presence of significant negative rainfall anomalies might lead to an overall drought of the watershed. Interestingly, most models also project that the dry season (JJA) is expected to have a small increment in rainfall, although with lower impacts on the water budget than the projected decline during the wet season, when the Belo Monte hydropower plant is expected to operate at its maximum capacity.

In addition, future precipitation anomalies, i.e., the difference between each simulated value and the historical average for the same period, were calculated (Fig. 7) respectively considering the periods 2020-2050 and 1971-2011.

Figure 7. Multimodel future rainfall anomalies in mm day^{-1} . Black line represents 12-month moving average.

Results show that, similarly to the previous distribution, in four of the five used models, negative rainfall anomalies are more dominant than positive ones, suggesting that drought events will be more frequent and with a higher intensity.

3.3. Future discharge simulations

After calibrating the numerical model by comparing observed and simulated discharges, five sets of simulations were conducted regarding future rainfall projections provided by CMIP5 models (Fig. 8).

As observed before, the simulations for four out of five CMIP5 models projections point out a lower natural flow in the Xingu River for the 2020-2050 period, which is related to the reduced water availability projected for the Xingu River basin. The results range from 5 to 40% higher flood discharges, i.e., the maximum discharge throughout the year, usually occurring in April. The reason for displaying flood discharges is because they determine Belo Monte's full generation capacity as well as the flood pulse of the Xingu River in the SRIF, which is critical to sustain aquatic and flooding forest ecosystems. more water available for other uses such as agriculture, since for the rest of the year the river's flow is severely reduced, impacting both Belo Monte's operation and human activities. The simulation results for these months do not show an expressive increasing in discharge.

Figure 9. Xingu River's future discharge simulations (2020-2050) after model calibration, with $\tau = 3.5$ hours and $f = 30\%$, based on projections of future rainfall of the five GCMs. Black curve represents historical discharge simulation, while traced and dotted lines represent, respectively, Xingu River's historical average high-water discharge for the 1971-2015 period ($Q = \sim 19.512 \text{ m}^3/\text{s}$), and the total required discharge for complete energy generation, while maintaining SRIF commitment ($Q = \sim 24.000 \text{ m}^3/\text{s}$).

4. Discussion

4.1. Climate change and the Belo Monte hydropower plant

Climate projections for the Amazon basin often result in spatially heterogeneity on its hydrological regime (Randall, 2007). The response of surface water availability to climate forcing in several CMIP5 models shows wetter conditions over northwestern regions and drier conditions over southeastern regions of the Amazon basin, based on multi-model ensemble anomalies against interannual variability (Sorribas et al., 2016). Therefore, it is important to consider future climate scenarios to evaluate the viability of future hydropower projects in the Amazon basin, especially in rivers from southeastern Amazon like the Xingu and Tapajós Rivers (Ref), where climate projections point to drier conditions in the next few decades.

Projections of precipitation increase over the western Amazon and Andean region are currently under debate (Guimberteau et al., 2018). Recent studies which couple climate and ecology data suggest that south-southeastern Amazon is particularly vulnerable, representing the region with lowest future water supply (Sorribas et al., 2016). Simulations performed by Sorribas et al. (2016) indicate a decrease in low-flows in the northern Branco River, southern Madeira and Xingu Rivers, and in the lower Amazon River at Óbidos (Sorribas et al., 2016).

Several analysis suggest contrasting patterns for future hydrological in both western and eastern Amazon (Coe et al., 2012). Different climate forcings yield results that demonstrate a large variability among models, implying that hydrological simulations are highly dependent on each of the GCMs outputs (ref).

Several hydrologic simulations based on each GCM projection were carried out for the Xingu River for the 2020-2050 period. Our findings show that, following the same pattern observed before for future rainfall projections, the surface water availability in the Xingu River basin is expected to decrease in 4 out of 5 scenarios, with changes in discharge ranging from +5 to +40% when compared to historical values, with an average 25 percent increment, considering a 5% uncertainty.

Despite different results, all five GCMs presented significant changes in future surface water availability, which in both ways lead to conflict between hydropower generation and maintenance of ecosystems in the Xingu River. A 10% increase in the river's natural flow would imply meaningful impacts in the reservoir's level, ultimately leading to a more complex management of levels up- and downstream of Pimental Dam. It could also be harmful to the SRIF, since a sudden releasing of water from the reservoir can rapidly change downstream water levels, which can bring risks to vital activities such as navigation and fishing.

In contrast, a 20-30% decline in the river's future discharge could be risky for sustainable maintenance of both ecosystem and dam operation. Considering the fact that even in the present moment it is not clear that Belo Monte's cost-benefit is in fact competitive (e.g. de Jong et al., 2015) when compared to other types of energy, similar negative impacts of a decreasing in discharge would be expected over its energy generation capacity, especially considering the fact that it is a RoR project. Nevertheless, when adding the minimal water releasing commitment (MME/EPE, 2010) to the SRIF, even more total discharge is required to generate energy up to its full capacity, with estimations ranging from 20,000 to 25,000 m³ s⁻¹ to supply both needs.

It should be noted that, even though our findings mostly agree with recent similar studies (e.g. Sorribas et al., 2016), deforesting, which is a major source of shifts in both local and regional precipitation regimes (Stickler et al., 2013), while also impactful on surface water runoff potential (Guimberteau et al 2016), is not accounted by the applied method. However, the impacts of deforesting upon the long-term discharge of a tropical river such as the Xingu is still not a consensus (Stickler et al., 2013, Guimberteau et al., 2018), since an increment in deforestation rates would increase the river's natural flow by improving surface runoff and reducing water loss by evapotranspiration (Guimberteau et al., 2016), while also having a negative effect upon regional rainfall, ultimately leading to reduced water availability.

4.3. Hydropower in Amazon under climate change scenarios: is it really worth it?

Over the last few years, several studies addressed relevant aspects of hydropower expansion around the world, particularly in tropical rivers (Winemiller et al., 2016, Best, 2019, Fearnside, 2018). Large-scale damming is considered one of the main anthropogenic stressors on the world's big rivers (Best, 2018), and Brazil's recent approach into the question has been, at least, debatable. Despite successive warnings (REFS), Brazilian government's agenda for energy expansion is still mainly related to hydropower in Amazon (REF).

Considering the fact that our findings suggest that the major player in this expansion, which is the Belo Monte Dam, might be heavily affected by climate change and produce considerably up to 20-30% less energy than projected during peak discharges, we believe that these results strongly support the re-evaluation of real cost-benefit of damming large Amazon rivers. Our results have concerning implications not only on the economic sphere, affected by Belo Monte's potentially lower future energy generation, considering the facts that simulations for four out of five GCMs pointed a 20-30% decreasing in Xingu River's flow, but also over socio-environmental aspects, such as an increase in water conflicts and intensification of impacts over aquatic and floodplain ecosystems.

When compared to other types of energy, hydropower is often considered a clean, cheap renewable energy (ref), and accounts globally for over 70% of all renewable energy (World Energy Council). However, it should be noted that damming a tropical river is significantly more impactful to the environment than in other contexts (REF). Often underestimated, this fact is particularly important when assessing the real cost-benefit of the energy produced by hydroelectric power plants (REF). In addition, our results imply that in the next few decades, the cost per MWh of Belo Monte's produced energy is expected to gradually increase, up to the point that other types of renewable energy, such as solar photovoltaic or wind power, will become increasingly more competitive (e.g. de Jong et al., 2015).

5. Conclusions

Despite its unquestionable relevance in Brazil's energy production, hydropower expansion in Amazon is projected to continue at least during the next decade. However, climate change effects upon Amazon's rainfall and future surface water availability are mainly neglected in official projects and energy expansion reports.

Despite limitations of the applied methods, our findings provide a reasonable insight into the real cost-benefit of a giant dam in a tropical river. We believe that the same method can be applied to similar regions, such as Mekong and Congo rivers, in order to evaluate expected changes on surface water availability, which can lead to a significantly better management of water and energy resources, while also preventing and mitigating future environmental impacts.

At the same time that hydroelectricity remains one of the cheapest and most successful sources of energy in global scale, it is also extremely vulnerable to changes in climate (ref?), which are projected to become more frequent and intense in the next decades (ref). In other words, it is possible that hydropower will gradually become less reliable, renewable and sustainable, and more expensive. If that's the case, our findings should help open up the discussion of new energy policies for Brazil, with greater energy security, efficiency and sustainability.

Acknowledgements

The authors would like to thank São Paulo Research Foundation (FAPESP, grant no. 2017/12470-2 for providing the financial aid for the present work.