

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - PPG CLIAMB

**BALANÇO DE ÁGUA NA AMAZÔNIA: O PAPEL DO
DESFLORESTAMENTO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

WESLEY DE BRITO GOMES

Manaus, Amazonas

Junho, 2018

WESLEY DE BRITO GOMES

**BALANÇO DE ÁGUA NA AMAZÔNIA: O PAPEL DO
DESFLORESTAMENTO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Orientador: Prof. Dr. Francis Wagner Silva Correia

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e à Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente, área de concentração Interações Clima-Biosfera da Amazônia.

Manaus, Amazonas

Junho, 2018



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA E UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS.

Aos 29 dias do mês de junho do ano de 2018, às 14:00 horas, no Auditório do Prédio LBA, INPA/Campus II, sito à Av. André Araújo, 2936 – Bairro de Petrópolis, reuniu-se a Comissão Julgadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Francis Wagner Silva Correia (Presidente), Prof. Dr. Tercio Ambrizzi (USP) e o Prof. Dr. José Augusto Paixão Veiga (UEA), tendo como suplente o Prof. Dr. Vinícius Busciolli Capistrano (UEA), sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública do trabalho de dissertação de Wesley de Brito Gomes intitulado “Balanço de Água na Amazônia: o papel do desflorestamento e das mudanças climáticas”, orientado pelo Prof. Dr. Francis Wagner Silva Correia (UEA).

O Presidente da Comissão Julgadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Julgadora de Defesa Pública. A Comissão Julgadora, então, se reuniu e os membros emitiram os seguintes pareceres:

Nome	Parecer	Assinatura
Francis Wagner Silva Correia	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
Tercio Ambrizzi	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
José Augusto Paixão Veiga	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	

Nada mais havendo a relatar, foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Julgadora.

G633 Gomes, Wesley de Brito
Balanço de água na Amazônia: o papel do desflorestamento e das mudanças climáticas / Wesley de Brito Gomes. --- Manaus: [s.n.], 2018.
92 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA/UEA, Manaus, 2018.
Orientador : Dr. Francisco Wagner da Silva Correa.
Área de concentração : Clima e Ambiente.

1. Interação biosfera. 2. Desmatamento –Amazônia. 3. Efeito estufa. I. Título.

CDD 634.956

Sinopse

Avaliou-se os impactos no balanço de água na bacia Amazônica ao longo do século XXI, decorrentes do aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera e ao desflorestamento por meio de modelagem climática e hidrológica.

Palavras-chave: Amazônia, desflorestamento, modelo regional, modelagem hidrológica.

*Dedico à minha esposa e minhas filhas,
Inglith Ramires dos Santos;
Sthefany dos Santos Gomes;
Susany dos Santos Gomes;
Sabriny dos Santos Gomes.*

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos:

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela oportunidade concedida em cursar o Mestrado em Clima e Ambiente;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão da bolsa de estudo; Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por disponibilizar o Supercomputador TUPA para realização das integrações numéricas, o Laboratório de Modelagem do Sistema Climático Terrestre (LABCLIM) da UEA por disponibilizar a estrutura física computacional – Cluster Tambaqui.

Ao Prof. Dr. Francis Wagner Silva Correia, pelo comprometimento e dedicação demonstrados no decorrer da pesquisa, e por tudo que me ensinou;

Agradeço ao Mestre Paulo Moura pela ajuda, suas dicas para solucionar problemas do Python foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Aos colegas do Laboratório de Modelagem do Sistema Climático Terrestre (LABCLIM), em especial aos amigos Vinícius Machado, Luan Rogério Rodrigues Carvalho, Willy Ragi, Rildo, Paulo Ricardo, Adriane Brito, Guilherme, Rafael, Jean Antunes, Frank, Francisco Alciney, Josyanne, Djanir e Gusthavo, pela amizade e troca de informações ao longo desses anos. E ao Leonardo Vergasta por sua amizade, dedicação e contribuições. Também aos colegas da Pós-Graduação e às amizades que fiz no LBA o meu muitíssimo obrigado;

Em especial a elas: minha Esposa Inglith Ramires dos Santos e aos meus bens mais valiosos que são minhas filhas Sthefany, Susany e Sabriny, que sempre estão ao meu lado nos momentos difíceis, e pelo apoio, incentivo e compreensão em todas as decisões tomadas em busca dos meus objetivos, mesmo que isso decorra em muitas ausências físicas.

A meus pais João Batista e Maria Gomes e a meu irmão Warley que nunca mediram esforços para que eu pudesse completar mais este projeto de vida.

Muito obrigado a todos.

“Não faz sentido olhar para trás e pensar: devia ter feito isso ou aquilo, devia ter estado lá. Isso não importa. Vamos inventar o amanhã, e parar de nos preocupar com o passado.”

Steve Jobs

“Quanto mais nos elevamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo de modelagem climática e hidrológica a fim de avaliar os impactos decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa GEE's (cenário RCP 8.5) e cenários futuros de desflorestamentos no balanço de água na bacia Amazônica, com ênfase na bacia do Rio Madeira. Para isso, utilizou-se Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH), forçado com o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere) versão 2.5. No clima presente, o modelo regional Eta conseguiu representar as características de sumidouro de umidade na bacia Amazônica, apresentando taxas de precipitação maior que a evapotranspiração. No cenário RCP 8.5 (desflorestamento 2015), o modelo apresentou sensibilidade na temperatura sobre toda a América do Sul, com aumento mais intenso sobre a bacia Amazônica (4-5°C). Neste cenário, a precipitação reduziu 11%, a evapotranspiração 6% e a convergência de umidade 9%. As mudanças no balanço de água foram intensificadas nos cenários futuros de desflorestamentos, mostrando que o aumento dos GEE's e as mudanças no uso da terra contribuíram sinergicamente para alterar o balanço de água sobre a bacia Amazônica. Com os desflorestamentos, observaram-se reduções de 13% (2050) e 19% (2100) na precipitação, e de 12% (2050) e 20% (2100) na evapotranspiração sobre a bacia. Predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo (MRN) na inclusão dos desflorestamentos, no qual, a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na convergência de umidade sobre a região. Apesar das mudanças na circulação regional, e conseqüentemente no transporte e convergência de umidade, os efeitos da redução na evapotranspiração nos cenários de desflorestamento foram mais importantes para redução da precipitação. Nos processos hidrológicos sobre a bacia do rio Madeira, observou-se aumento das descargas na maioria das estações fluviométricas em todos os cenários. O aumento na precipitação à montante da bacia e as mudanças nos parâmetros do solo, associada às alterações no uso da terra, contribuíram para o aumento das descargas e da área de inundação sobre a bacia do Madeira. As mudanças no balanço de água na Amazônia, principalmente sobre a bacia do Madeira, devido aos fatores antropogênicos se caracterizam um cenário preocupante, pois podem desencadear alterações significativas nos ecossistemas naturais amazônicos. Se as políticas públicas de conservação não agirem no sentido de deter a degradação ambiental (desflorestamento) e reduzir as emissões dos gases do efeito pela queima de combustíveis fósseis, as alterações no ciclo da água podem ter efeitos negativos com prejuízos e danos no meio ambiente, nos recursos hídricos, nos principais setores da economia (agricultura, indústria, navegação fluvial, geração de energia elétrica), afetando de forma direta as comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da bacia Amazônica.

ABSTRACT

The present work aims to conduct a climate and hydrological modeling study in order to evaluate the impacts arising from the increase of GHG greenhouse gases (scenario RC P8.5) and future scenarios of deforestation and their impact on the water balance in the Amazon Basin, with particular emphasis on the Madeira River basin. For this, the Regional Model Eta and the Hydrological Model of Large-scale Hydrological Model (MGB-IPH), forced with the Brazilian Model of the Earth System (Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere) version 2.5 were used. In the present climate, the Eta regional model was able to represent the moisture sink characteristics in the Amazon basin, presenting precipitation rates higher than evapotranspiration. In the scenario RCP 8.5 (deforestation 2015), the model showed temperature sensitivity over all of South America, with a more intense increase over the Amazon basin (4-5°C). In this scenario, precipitation decreased 11%, evapotranspiration 6% and moisture convergence 9%. Changes in water balance were intensified in future deforestation scenarios, showing that the increase in GHGs and changes in land use contributed synergistically to altering the water budget over the Amazon basin. With deforestation, reductions of 13% (2050) and 19% (2100) were observed in the precipitation, and 12% (2050) and 20% (2100) reductions in evapotranspiration over the basin were also observed. The Negative Feedback Mechanism (NFM) was predominant in the inclusion of deforestation, in which the relative reduction in evapotranspiration was greater than the reduction in precipitation, leading to an increase in the convergence of moisture over the region. Despite changes in regional circulation, and consequently in moisture transport and convergence, the effects of reduced evapotranspiration on deforestation scenarios were more important in reducing precipitation. In the hydrological processes of the Madeira River basin, there was an increase in discharges at most fluviometric stations in all scenarios. The increase in precipitation upstream of the basin and changes in soil parameters, associated with changes in land use, contributed to the increase of discharges and the flood area over the Madeira basin. The changes in the water balance in the Amazon, mainly in the Madeira basin due to the anthropogenic factors, are a worrying scenario, since they can trigger significant alterations in the natural Amazonian ecosystems. If public conservation policies do not act to halt environmental degradation (deforestation) and reduce greenhouse gas emissions by burning fossil fuels, changes in the water cycle can have negative effects on the environment and cause losses to the hydrological resources and in the principal sectors of the economy (agriculture, industry, river navigation, power generation), directly affecting communities living along the banks of rivers, especially the vulnerable populations of the Amazon basin.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SIGLAS	xvi
INTRODUÇÃO	17
OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 1 - Avaliação das mudanças climáticas no balanço de água da Bacia Amazônica para cenário de emissões RCP 8.5	20
ABSTRACT:.....	21
RESUMO:.....	21
INTRODUÇÃO	22
MATERIAIS E MÉTODOS	24
Cenários de Emissões.....	24
Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica.....	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
AVALIAÇÃO DO MODELO	27
MUDANÇAS MÉDIAS SAZONAIS	29
a) Temperatura (TP2m).....	29
b) Evapotranspiração, Convergência e Fluxo de Umidade.....	31
c) Precipitação.....	34
CICLO ANUAL	36
BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA AMAZÔNICA	39
CONCLUSÕES	40
AGRADECIMENTOS	42
CAPÍTULO 2 - Avaliação do balanço de água na Bacia Amazônica sob o RCP 8.5 e cenários de desflorestamento	43
ABSTRACT:.....	44
RESUMO:.....	44
INTRODUÇÃO	45
MATERIAIS E MÉTODOS	47
Cenários de Emissão e Mudanças no Uso da Terra.....	47
Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica.....	49
RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
AVALIAÇÃO DO MODELO	52
MUDANÇAS MÉDIAS SAZONAIS	54
a) Temperatura a 2m e Evapotranspiração.....	54
b) Precipitação, Convergência e Fluxo de Umidade.....	56

CICLO ANUAL	60
BALANÇO DE ÁGUA PARA BACIA AMAZÔNICA	63
CONCLUSÕES	65
AGRADECIMENTOS	66
CAPÍTULO 3 - Avaliação dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra e do cenário de emissões (RCP 8.5) no balanço de água na Bacia do Rio Madeira	67
ABSTRACT:	68
RESUMO:	68
INTRODUÇÃO	69
MATERIAIS E MÉTODOS	71
Área de Estudo	72
Dados	73
Cenários de Emissão e Desflorestamento	74
Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica	75
Remoção do Viés	77
RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
RAMO ATMOSFÉRICO DO BALANÇO DE ÁGUA	78
RAMO TERRESTRE DO BALANÇO DE ÁGUA	83
Desempenho da remoção do viés e calibração	83
Descargas	87
Áreas de inundação	90
CONCLUSÕES	91
AGRADECIMENTOS	92
SÍNTESE	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO DE ÁGUA DA BACIA AMAZÔNICA PARA CENÁRIO DE EMISSÕES RCP 8.5.

Figura 1: Precipitação sazonal do clima presente (verão - DJF) (mm dia^{-1}) simulada pelo (a) ETA-BESM-OA e (e) BESM-OA, e das observações/reanálise: (b) Era-Interim, (c) CMAP, (d) GPCP. Biais (diferença entre modelo e observações / reanálise) são mostradas em: (f) ETA-EraInterim, (g) ETA-CMAP e (h) ETA-GPCP. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.28

Figura 2: Precipitação sazonal do clima presente (inverno - JJA) (mm dia^{-1}) simulada pelo (a) ETA-BESM-OA e (e) BESM-OA, e das observações/reanálise: (b) Era-Interim, (c) CMAP, (d) GPCP. Biais (diferença entre modelo e observações / reanálise) são mostradas em: (f) ETA-EraInterim, (g) ETA-CMAP e (h) ETA-GPCP. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.29

Figura 3: Clima atual (1979-2005) temperatura sazonal de 2 m ($^{\circ}\text{C}$): (a) DJF para verão e (c) JJA para inverno, e mudanças na temperatura de 2 m projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta- BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.31

Figura 4: Clima atual (1979-2005) evapotranspiração sazonal (mm dia^{-1}): (a) verão para DJF e (c) inverno para JJA, e mudanças na evapotranspiração projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta- BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.33

Figura 5: Clima presente (1979-2005) fluxo de umidade sazonal ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) e convergência (mm dia^{-1}): (a) DJF para verão e (c) JJA para inverno, e mudanças no fluxo e convergência de umidade projetada (2071-2100) em comparação ao período atual para Eta-BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: Verão - DJF (b) e Inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.34

Figura 6: Clima atual (1979-2005) precipitação sazonal (mm dia^{-1}): (a) verão para DJF e (c) inverno para JJA, e mudanças na precipitação projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta- BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.36

Figura 7: Média do ciclo anual dos componentes do balanço de umidade simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5. (a) Bacia Amazônica; (b) Amazônia Setentrional; (c) Amazônia Meridional: Precipitação (PRE, mm dia^{-1}); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia^{-1}); Convergência de umidade (-CON convergência e +CON divergência, mm dia^{-1}).38

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DO BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA AMAZÔNICA SOB O RCP 8.5 E CENÁRIOS DE DESFLORESTAMENTO.

Figura 1: Cenários de cobertura vegetal a serem utilizados nas simulações com o modelo regional ETA. (a) Mapa de vegetação elaborado pelo Projeto ProVeg com áreas desflorestadas (ano base 2015); (b) Cenário projetado para o ano de 2050 e c) Cenário projetado para o ano de 2100. Ambos cenários elaborados pelo modelo DINÂMICA. Resolução: 1x1 km. Cores: Verde (floresta), Amarelo (Cerrado), Azul (Água) e Vermelho (Pastagem degradada).....49

Figura 2. Média do ciclo anual da precipitação (mm dia^{-1}) simulada pelo ETA-BESM-OA e das observações/reanálise: Era-Interim; CMAP e GPCP. (a) Bacia Amazônica, (b) porção norte da Bacia Amazônica e (c) porção sul da Bacia Amazônica.53

Figura 3. Impactos na temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da temperatura para o cenário CPCD15; (B) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da temperatura para o cenário CPCD15; (F) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.55

Figura 4. Impactos na evapotranspiração (mm dia^{-1}) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da evapotranspiração para o cenário CPCD15; (B) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da evapotranspiração para o cenário CPCD15; (F) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos..56

Figura 5. Impactos na precipitação (mm dia^{-1}) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da precipitação para o cenário CPCD15; (B) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da precipitação para o cenário CPCD15; (F) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.59

Figura 6. Distribuição média da divergência de umidade (valores positivos sombreados representam convergência, mm dia^{-1}) e Vetor fluxo de umidade (vetores, medidos em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) para o clima presente (1979-2005) e a diferença entre o clima futuro (2071-2100) e o clima presente projetada pelo modelo Eta-BESM-OA decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (CPCD15); 2 – clima futuro (C85CD15); 3 – clima futuro (C85CD50); 4 – clima futuro (C85CD100). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.. 59

Figura 7. Média mensal do ciclo anual dos componentes do balanço de água simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5 e cenários de desflorestamento para 2015, 2050 e 2100. (a) Bacia Amazônica; (b) Amazônia Setentrional; (c) Amazônia Meridional: Precipitação (PRE, mm dia^{-1}); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia^{-1}); Convergência de umidade (-CON convergência e +CON divergência, mm dia^{-1}). 62

CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA E DO CENÁRIO DE EMISSÕES (RCP 8.5) NO BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA DO RIO MADEIRA.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Madeira. Destacam-se também o modelo digital de elevação (MDE) e as estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) selecionadas para avaliação do modelo MGB-IPH: Guajará-Mirim (15250000), Porto Velho (15400000), Ariquemes (15430000), Tabajara (15580000), Humaitá (15630000) e Manicoré (15700000). 73

Figura 2 – Cenários de cobertura vegetal para bacia do rio Madeira utilizados nas simulações do modelo regional Eta-BESM_OA e no modelo hidrológico MGB-IPH. (a) Mapa de vegetação elaborado pelo Projeto ProVeg com áreas desflorestadas para o ano base 2015; (b) Cenário projetado para o ano de 2050 e c) Cenário projetado para o ano de 2100 a partir do modelo de vegetação DINAMICA 75

Figura 3 – Impactos decorrentes dos cenários de emissão (RCP 8.5) e desflorestamento para a bacia do rio Madeira - período úmido (DJF): Linhas de cima para baixo mostram: 1 - Temperatura a 2m ($^{\circ}\text{C}$); 2 - Precipitação (mm dia^{-1}); 3 - Evapotranspiração (mm dia^{-1}); 4 - Convergência de umidade (mm dia^{-1}): Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 (b, f, j, n) e Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 com desflorestamentos 2050 (c, g, k, o) e 2100 (d, h, l, p) As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos. 81

Figura 4 – Impactos decorrentes dos cenários de emissão (RCP 8.5) e desflorestamento para a bacia do rio Madeira - período seco (JJA): Linhas de cima para baixo mostram: 1 - Temperatura a 2m ($^{\circ}\text{C}$); 2 - Precipitação (mm dia^{-1}); 3 - Evapotranspiração (mm dia^{-1}); 4 - Convergência de umidade (mm dia^{-1}): Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 (b, f, j, n) e Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 com desflorestamentos 2050 (c, g, k, o) e 2100 (d, h, l, p) As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos. 82

Figura 5 – Média mensal do ciclo anual dos componentes do balanço de umidade (Precipitação (PRE, mm dia⁻¹); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹); Convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5 e cenários de desflorestamento para 2015, 2050 e 2100 para bacia do rio Madeira.. 83

Figura 6 – Ciclo anual da precipitação simulada pelo modelo Eta não corrigido (Eta-Ncorrigido), Eta com correção de viés (Eta-Corrigido) e as reanálises do Era-Interim com desvio padrão para a bacia do rio Madeira correspondente ao clima atual (1979-2005). Unidades: mm dia⁻¹ 85

Figura 7 – Diagrama de Taylor para a precipitação média sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) simulada pelo modelo Eta sem correção (PRE-NC-ETA) e Eta com correção de bias (PRE-CC-ETA) durante o período 1979-2005. As reanálises do Era-Interim são consideradas como ponto de referência. 86

Figura 8 – Variação sazonal da vazão e precipitação para o clima presente (vermelho) e cenários futuros de emissão de GEE's (RCP 8.5) com desflorestamento de 2015 (azul) e com projeções de desflorestamento para 2050 (amarelo) e 2100 (verde). As estações fluviométricas na bacia rio Madeira avaliadas neste estudo são: a) Guajará-Mirim (15250000), b) Porto Velho (15400000), c) Ariquemes (15430000), d) Tabajara (15580000), e) Humaitá (15630000) e f) Manicoré (15700000). Unidade: vazão (m³ s⁻¹) e precipitação (mm dia⁻¹).... 89

Figura 9 – Variação sazonal da área inundação para o clima presente (vermelho) com desvio padrão e cenários futuros de emissão dos GEE's (RCP 8.5) com desflorestamento de 2015 (azul) e com projeções de desflorestamento para 2050 (amarelo) e 2100 (verde). 90

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO DE ÁGUA DA BACIA AMAZÔNICA PARA CENÁRIO DE EMISSÕES RCP 8.5.

Tabela 1: Mudanças médias sazonais (em %) projetadas pelo modelo Eta-BESM-OA com RCP 8.5 para o clima futuro (2071-2100), em relação ao clima presente (CP, 1979-2005) para o verão austral (DJF); inverno austral (JJA) e para média anual, dos componentes do balanço de umidade – Temperatura (TP2m, °C), precipitação (PRE, mm dia⁻¹), evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹), convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) e escoamento superficial (RUN, mm dia⁻¹) na bacia Amazônica, Amazônia setentrional e Amazônia meridional..... 40

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DO BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA AMAZÔNICA SOB O RCP 8.5 E CENÁRIOS DE DESFLORESTAMENTO.

Tabela 1: Parâmetros biofísicos utilizados de acordo com o tipo de vegetação. 48

Tabela 2: Mudanças médias anuais (em %) e tendências (mm dia⁻¹) dos componentes do balanço de água – Temperatura (TP2m, °C), precipitação (PRE, mm dia⁻¹), evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹), convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) e escoamento superficial (RUN, mm dia⁻¹) projetadas pelo modelo Eta-BESM-OA para os três experimentos de clima futuro (C85CD15, C85CD50 e C85CD100), em relação ao clima presente (CPCD15), na bacia Amazônica, Amazônia setentrional e Amazônia meridional. 64

CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA E DO CENÁRIO DE EMISSÕES (RCP 8.5) NO BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA DO RIO MADEIRA.

Tabela 1 – Estações fluviométricas da Agência Nacional de Aguas (ANA) e áreas de drenagem correspondente. 74

Tabela 2 – Desempenho do modelo MGB-IPH obtido para calibração (1990-1994) e validação (1995-2005): índice de eficiência de Nash-Sutcliffe entre vazões observadas e simuladas (ENS), índice de eficiência de Nash-Sutcliffe entre logaritmo das vazões observadas e simuladas (ENSlog) e o erro no volume total (ΔV)..... 86

LISTA DE SIGLAS

ABRACOS – Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observatory Study.

AGCM – Modelo de Circulação Geral da Atmosfera.

BESM-OA – Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5.

CLP – Camada Limite Planetária.

CMAP – Merge Analysis of Precipitation.

CMIP – Coupled Model Intercomparison Project.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

ESM – Earth System Model.

GEE – Gases de Efeito Estufa.

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate.

GPCP – Global Precipitation Climatology Project.

IAF – Índice de área foliar.

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.

JBN – Jatos de Baixos Níveis.

LBA – Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia.

LUCC – Mudanças no Uso e Cobertura da Terra.

MCR – Modelos Climáticos Regionais.

MGB-IPH – Modelo Hidrológico para Grandes Bacias.

MOM4p1 – Modelo Oceânico Modular versão 4p1.

MRN – Mecanismo de Retroalimentação Negativo.

MRP – Mecanismo de Retroalimentação Positivo.

OGCM – Modelo de Circulação Geral Oceânico.

PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite.

RCP – Representative Concentration Pathway.

SRES – Special Report on Emission Scenarios.

SSiB – Simplified Simple Biosphere Model.

TSM – Temperatura da Superfície do Mar.

UHE – Usina Hidrelétrica

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é a única grande extensão contínua de floresta tropical úmida do mundo com uma área total de aproximadamente 6,3 milhões de km², com cerca de 5 milhões de km² em território brasileiro, o que representa 56% das florestas tropicais da Terra. Devido a sua grande extensão, a floresta Amazônica desempenha papel importante nos balanços globais de carbono e água entre a superfície e a atmosfera (Cox *et al.*, 2004; Marengo, 2006). A bacia Amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, pois apresenta taxa de precipitação maior que evapotranspiração, sendo esta proveniente tanto da floresta tropical devido a intensa reciclagem de água (Rocha *et al.*, 2015), quanto do transporte de umidade proveniente do oceano Atlântico tropical (Nepstad *et al.*, 2008; Malhi *et al.*, 2008; Satyamurty *et al.*, 2013). No contexto regional, a floresta Amazônica tem papel fundamental na determinação do regime hidrológico tanto na própria bacia, decorrente da ciclagem de água, quanto em outras regiões do continente sul-americano por meio do transporte de umidade na região dos Jatos de Baixos Níveis – JBN (Arraut e Satyamurty 2009; Rocha *et al.*, 2015). A Amazônia atua como fonte indispensáveis de energia por meio de sua intensa evapotranspiração e liberação de calor latente de condensação na média e alta troposfera em nuvens convectivas tropicais, contribuindo para a geração e manutenção da circulação atmosférica em escalas regional e global (Artaxo *et al.*, 2005; Fearnside, 2005; Marengo, 2006; Malhi *et al.*, 2008).

Apesar dos serviços ambientais fornecidos pela floresta, a bacia Amazônica é vulnerável às variabilidades e mudanças no sistema climático, devido tanto às variações naturais associadas aos modos de variação dos Oceanos Pacífico e Atlântico (El Niño Oscilação Sul – ENOS, Oscilação Decadal do Pacífico – ODP e Oscilação Multidecadal do Atlântico – OMA), quanto às antropogênicas decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa (GEE's) e as mudanças no uso e cobertura da terra (LUCC): desflorestamento, atividades agrícolas e urbanização (Zhang *et al.*, 2015; Marengo e Espinoza, 2016; Sorribas *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2017). Nos últimos anos a variabilidade no clima tem afetado os principais rios da bacia Amazônica. O aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas e enchentes produziram prejuízos e danos no meio ambiente, nos recursos hídricos, na economia e nas cidades e comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da Amazônia (Espinoza *et al.*, 2014; Doughty *et al.*, 2015; Marengo e Espinoza, 2016). Eventos de enchentes e precipitações extremas tem afetado a bacia do rio Madeira recentemente (verão 2013-14), trazendo transtornos e prejuízos para população, tais

como: famílias desabrigadas, interdição de estradas, isolamentos de comunidades, prejuízos na agricultura e transporte (Marengo e Espinoza, 2016).

As projeções de mudanças no clima proveniente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima (IPCC) mostram redução e aumento na precipitação em diferentes regiões da América do Sul no fim do século XXI, com alto grau de incerteza na Amazônia (IPCC AR5, 2013). Outro fator preocupante para o clima são os desflorestamentos na bacia Amazônica. A taxa média de desflorestamento em toda a bacia é de 14.300 km² ao ano. Considerando a série histórica, aproximadamente 16% da floresta Amazônica brasileira foi desflorestada. Na bacia do rio Madeira, a conversão da floresta em áreas agrícolas e ou pastagem para criação de gado tem sido frequente (Trancoso *et al.*, 2009). Somente nos estados localizados na área hidrográfica do rio Madeira o desflorestamento acumulado nos últimos 30 anos é de aproximadamente 230.000 km², representando 53% do total de desflorestamento na Amazônia (INPE, 2017).

Diante das alterações no uso e cobertura da terra na Amazônia e os efeitos das mudanças climáticas globais, uma questão importante levantada na comunidade científica é: *“De que maneira o aumento dos GEE’s e as mudanças futuras no uso da terra podem modificar o balanço de água na bacia do rio Madeira?”*. Visando responder esta pergunta, esse estudo tem por objetivo avaliar os impactos do aumento dos GEE’s e dos desflorestamentos no ciclo da água na bacia Amazônica, e do rio Madeira, utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), cenário de emissões do AR5-IPCC RCP 8.5 e também cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo de modelagem climática e hidrológica a fim de avaliar os impactos decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa e das mudanças no uso e cobertura da terra (desflorestamento) no balanço de água na bacia Amazônica, com ênfase na bacia do Rio Madeira. Para isso foram utilizados o Modelo Climático Regional Eta, o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), cenários de mudanças no uso e cobertura da terra referente ao estado atual e projeções para situações futuras, e também projeções de cenários futuros de emissão dos gases do efeito estufa

produzidos a partir das simulações climáticas do Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Objetivos específicos

- ✓ Avaliar os potenciais efeitos do aumento dos gases do efeito estufa (RCP 8.5) e das mudanças no uso e cobertura da terra (desflorestamento), para o estado atual (2015) e projeções futuras (2050 e 2100) projetadas pelo modelo Eta-BESM-OA nos componentes do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, convergência de umidade e escoamento superficial) na bacia Amazônica;
- ✓ Avaliar o papel das mudanças no uso e cobertura da terra (desflorestamento) e do aumento dos gases do efeito estufa nos componentes do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, convergência de umidade, descargas e área de inundação) na bacia do Rio Madeira (Amazonas) utilizando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB).

Este trabalho está estruturado em formato de artigo científico, possui três capítulos e está estruturada da seguinte maneira: O Capítulo 1, refere-se à avaliação dos impactos do aumento nas emissões antropogênicas dos gases de efeito estufa sobre o balanço de água na bacia Amazônica simulados pelo modelo Eta-BESM-OA para o final do século XXI. O Capítulo 2 refere-se à avaliação dos impactos do aumento dos GEE's e dos desflorestamentos no balanço de água na bacia Amazônica utilizando o modelo regional Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5), cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5 (AR5 IPCC 5th) e cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras. O Capítulo 3, avalia os impactos do aumento dos GEE's e dos desflorestamentos no ciclo da água na bacia do rio Madeira utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), cenário de emissões RCP 8.5 do AR5-IPCC e também cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras.

Ao final, dispõe-se uma síntese dos resultados obtidos em todos os capítulos.

CAPÍTULO 1

Gomes, W.B.; Correia, F.W.S. 2018. Avaliação das mudanças climáticas no balanço de água da Bacia Amazônica para cenário de emissões RCP 8.5. Manuscrito em preparação para *Acta Amazonica*.

Assessment of climate change in the Amazon Basin water balance for emissions scenario RCP 8.5.

ABSTRACT:

In this study we evaluated the impacts of the increased emissions of greenhouse effect gases (RCP 8.5) for the end of the 21st century in the components of the water budget in the Amazon basin, using the Eta regional climate model forced with the Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere version 2. In the present climate, the Eta was able to represent the seasonal variation of precipitation on the continent, correctly positioning the maxima precipitation in both seasons. The Eta-BESM-OA model showed sensitivity to the RCP 8.5 scenario with increase in temperature across the continent with values more intense over the Amazon basin (4-5°C). For the projections of the 21st century, the model simulated reductions of 11% in the precipitation, 6% in evapotranspiration, 9% in moisture convergence and 34% in runoff. The reduction in rainfall was due to reductions in the moisture convergence and evapotranspiration. As the reduction of moisture convergence and the evapotranspiration acted to reduce the precipitation, we noted the configuration of a Positive Feedback Mechanism (PFM). This is worrying, since the PFM can cause instability in the Amazon ecosystems, because they do not have a great capacity to adapt to the magnitude of the changes in climate, especially if they occur in a short period of time.

KEYWORDS: Water Budget, Climate Changes, Future projections, Amazon Basin.

Avaliação das mudanças climáticas no balanço de água da Bacia Amazônica para cenário de emissões RCP 8.5.

RESUMO:

Nesse estudo avaliou-se os impactos do aumento das emissões dos gases do efeito estufa projetado para o fim do século XXI nos componentes do balanço de água na bacia Amazônica, utilizando o modelo climático regional Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 e com cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5. No clima presente, o modelo regional conseguiu representar a variação sazonal da precipitação sobre o continente, posicionando corretamente os máximos de precipitação em ambas as estações de inverno e verão. O modelo Eta-BESM-OA apresentou sensibilidade ao cenário RCP 8.5 apresentando aumento de temperatura em todo o continente com valores mais intensos sobre a bacia Amazônica (4-5°C). Para as projeções do século XXI, o modelo simulou reduções de 11% na precipitação, 6% na evapotranspiração, 9% convergência de umidade e de 34% no runoff. A redução na precipitação foi devido às reduções na convergência de umidade e na evapotranspiração. Como a redução da convergência de umidade e da evapotranspiração agiram para reduzir a precipitação, notou-se a configuração de um Mecanismo de Retroalimentação Positivo. Isso é preocupante, uma vez que, o MRP pode causar instabilidade nos ecossistemas Amazônicos, pois não apresentam grande capacidade de adaptação à magnitude das mudanças no clima, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo.

Palavras-Chaves: Balanço da Água, Mudanças Climáticas, Projeções Futuras, Bacia Amazônica.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical úmida do planeta com uma área total de aproximadamente 6 milhões de km², que representa 56% das florestas tropicais do planeta. Por se localizar nos trópicos, as trocas de energia, umidade e massa entre a superfície e a atmosfera na Amazônia são bastante intensas, fornecendo importantes serviços ambientais, tais como: a manutenção da biodiversidade, o armazenamento e absorção do carbono da atmosfera, o transporte de gases traço e aerossóis, a ciclagem de água por meio da evapotranspiração, o fornecimento de umidade para outras regiões do continente; e dessa forma, contribuindo para manutenção do regime hidrológico em escalas regional e global (Fearnside, 2005; Malhi *et al.*, 2008; Marengo, 2006; Satyamurty *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2015). Devido a sua grande extensão, a floresta Amazônica desempenha papel importante nos balanços globais de carbono e água entre a superfície e a atmosfera (Cox *et al.*, 2004; Marengo, 2006). No presente, a bacia Amazônica comporta-se como um sumidouro de umidade da atmosfera, pois a precipitação é maior que a evapotranspiração, que é proveniente tanto da floresta tropical por meio da intensa reciclagem de água (Rocha *et al.*, 2015), quanto do transporte de umidade proveniente do oceano Atlântico tropical (Satyamurty *et al.*, 2013). Por outro lado, a intensa evapotranspiração da floresta Amazônica constitui-se uma fonte de umidade para outras regiões da América do Sul, desempenhando papel importante no regime de precipitação em regiões distante da bacia Amazônia (Vera *et al.*, 2006). Entretanto, a Amazônia é sensível às variabilidades e mudanças no sistema climático, devido tanto às variações naturais, inerentes ao próprio sistema climático (interações não lineares), quanto às antropogênicas; tais como: o aumento na concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera e as mudanças no uso da

terra, desflorestamento, atividades agrícolas e urbanização (Nobre *et al.*, 2016). Estas mudanças podem afetar o funcionamento dos ecossistemas Amazônicos, aumentar a temperatura, reduzir a capacidade de absorver carbono, alterar o ciclo hidrológico regional, afetando negativamente setores socioeconômicos (agricultura, mineração, indústria, navegação fluvial, geração de energia elétrica) e principalmente, as populações vulneráveis na bacia Amazônica (Marengo *et al.*, 2012; Guimberteau *et al.*, 2013; Chou *et al.*, 2014; Espinoza *et al.*, 2014; Marengo e Espinoza, 2016; Sorribas *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2017). Marengo *et al.*, (2012) avaliaram os impactos da mudança no clima sobre a América do Sul para o século XXI utilizando o cenário de emissões A1B (Special Report on Emissions Scenarios – SRES). Os autores observaram redução da precipitação nas regiões tropicais do continente, incluindo a Amazônia e o Nordeste do Brasil, e aumento sobre o Sudeste da América do Sul. Os efeitos das mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia Amazônica utilizando a nova geração dos Modelos de Circulação Geral do IPCC's Fifth Assessment Report (AR5) (CMIP5) foram avaliados por Sorribas *et al.*, (2016). Os resultados desse estudo indicaram uma condição mais úmida (seca) no oeste (leste) da Amazônia no final do século XXI. Chou *et al.*, (2014) utilizando o modelo regional Eta e as projeções dos cenários Representative Concentration Pathway RCP 4.5 e 8.5 (AR5) observaram redução nos extremos de precipitação e nos dias úmidos consecutivos sobre a bacia Amazônica. A avaliação dos impactos das mudanças climáticas, decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa na atmosfera, é de fundamental importância para o planejamento governamental de longo prazo, auxiliando nos processos de prevenção, mitigação e adaptação dos povos e comunidades aos efeitos negativos das mudanças no clima. Os modelos climáticos globais são importantes ferramentas para o fornecimento de

informações das mudanças no clima sobre diferentes cenários de emissões dos gases do efeito estufa (Taylor *et al.*, 2012). Entretanto, a baixa resolução espacial desses modelos (100 a 200 km) é um fator limitante, pois não conseguem representar adequadamente forçantes de mesoescala e alguns processos físicos (topografias, heterogeneidade da cobertura vegetal, bacias hidrográficas, linhas costeiras, convecção, processos turbulentos e interação superfície-atmosfera), simulando com deficiência as variações de temperatura e precipitação em escala regional (Rummukainen, 2010). Neste sentido, os modelos climáticos regionais (MCR) desempenham papel importante no processo de regionalização (downscaling dinâmico) das simulações dos modelos globais sobre áreas de interesse, no qual, a avaliação dos impactos e vulnerabilidades em escala regional pode ser representada de forma mais precisa e realista (Giorgi, 2006). Desta forma, o presente estudo tem por objetivo avaliar os impactos do aumento dos GEE's nos componentes do balanço de água na bacia Amazônica, utilizando o MCR Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5) com cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5 (AR5 IPCC 5th).

MATERIAIS E MÉTODOS

Cenários de Emissões

Neste estudo utilizou-se o cenário de emissão baseado no Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP 8.5) do Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report - (AR5-IPCC). Os cenários de emissão do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas são baseados em forçantes radiativas antropogênicas para o final do século XXI (IPCC AR5, 2013). Os quatro

diferentes cenários são denominados como: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 e RCP 2.6, que correspondem às forçantes radiativas de 8.5 Wm^{-2} , 6.0 Wm^{-2} , 4.5 Wm^{-2} e 2.6 Wm^{-2} , respectivamente. O primeiro (último) RCP é o mais pessimista (otimista) e resulta em um aquecimento médio global de 2.6°C a 4.8°C (0.3°C a 1.7°C) ao final do século XXI (IPCC AR5, 2013).

Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica

O Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 - BESM-OA 2.5 (Nobre *et al.*, 2013) desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi utilizado para forçar o modelo Eta para condições do clima presente e para o fim do século a partir do cenário de emissões RCP 8.5. O BESM-OA 2.5 é um modelo espectral Euleriano com truncamento T62 e 28 níveis na atmosfera. Este modelo é constituído pelo modelo de circulação geral da atmosfera (AGCM) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE (Figuroa *et al.*, 2016) acoplado ao modelo de circulação geral oceânico (OGCM) - Modelo Oceânico Modular versão 4p1 (MOM4p1) do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate via GFDL's Flexible Modular System (Griffies, 2009). As parametrizações físicas incluem o modelo de superfície Simplified Simple Biosphere Model – SSiB (Xue *et al.*, 1991), o esquema de turbulência na camada limite planetária de Mellor-Yamada 2.0 (Mellor e Yamada, 1982), o esquema de convecção profunda de Grell e Devenyi (2002) e a parametrização de convecção rasa de Tiedtke (1984). O modelo regional Eta foi adaptado para realizar integrações de longo período (Pesquero *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b). A dinâmica do modelo regional é desenvolvida na coordenada vertical eta (Mesinger, 1984), útil para operar em regiões de orografia

íngremes, como a Cordilheira dos Andes, na América do Sul. A precipitação é calculada pelo esquema de parametrização de cumulus de Betts-Miller-Janjic (Janjic 1994) e pelo esquema de microfísica da nuvem Zhao (Zhao *et al.*, 1997). Os esquemas de radiação são do GFDL para ondas curtas Lacis e Hansen (1974) e longas Fels e Schwarzkopf (1975). Os processos de superfície são representados pelo NOAH (Ek *et al.*, 2003), que contém 4 camadas de solo para a temperatura e umidade, assim como 12 tipos de vegetação e 7 tipos de textura de solo. O mapa da vegetação revisado inclui o arco do desmatamento na Amazônia (Sestini *et al.*, 2002). Neste estudo o modelo foi configurado com resolução de 20 km na horizontal e 38 níveis na vertical. Foram realizados dois experimentos numéricos: clima presente e cenário futuro. Para o clima presente, o experimento consistiu em uma integração contínua de 46 anos referente ao período de 1960 a 2005, onde a concentração de dióxido de carbono (CO₂) permaneceu constante em 330 *ppm*. Para o clima futuro, as integrações foram realizadas de forma contínua para o período de 2071 a 2100 (31 anos), utilizando-se o cenário RCP 8.5. Os limites laterais são atualizados com as variáveis de estado do modelo BESM-OA 2.5 a cada intervalo de 6 horas. O modelo atualiza a concentração equivalente de CO₂ a cada 3 anos. O verde da vegetação varia mensalmente, mas o mesmo tipo de vegetação é mantido durante o período de integração. A temperatura da superfície do mar (TSM), a umidade inicial do solo e a temperatura do solo são obtidas do BESM-OA 2.5 com TSM atualizado diariamente no modelo regional Eta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do modelo baseia-se em comparações entre a precipitação simulado pelo modelo Eta e dados observados de diferentes análises, com diferentes resoluções horizontais. Os dados utilizados são derivados do ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) resolução de 1° x 1°, Merge Analysis of Precipitation - CMAP (Xie e Arkin, 1996) resolução de 2.5° x 2.5° e Global Precipitation Climatology Project - GPCP (Xie *et al.*, 2003) resolução de 2.5° x 2.5° para o período 1979-2005. Com o objetivo de avaliar as principais características climatológicas, são examinadas as estações de verão austral (dezembro-janeiro-fevereiro, DJF) e inverno austral (junho-julho-agosto, JJA). As mudanças climáticas para o futuro 2071-2100 são avaliadas em relação ao período de referência, 1979-2005, considerado como o clima atual. A avaliação é baseada principalmente nos componentes do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, convergência de umidade e escoamento) e de temperatura da bacia Amazônica. As simulações de downscaling são referidas como Eta-BESM-OA, em que o modelo Eta é acionado pelo BESM-OA 2.5.

AVALIAÇÃO DO MODELO

A média sazonal da precipitação projetada pelas simulações Eta-BESM-OA com relação ao período de referência (1979-2005) é mostrada nas Figuras 1 e 2 para o verão austral (DJF) e inverno austral (JJA), respectivamente. O modelo regional representou a variação espacial da precipitação sobre a América do Sul em ambas as estações. Os maiores valores sobre a bacia ocorreram em DJF devido ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre grande parte do continente sul-americano, principalmente na bacia Amazônica. O modelo regional posicionou corretamente o máximo de precipitação sobre a bacia,

apesar do BESM-OA 2.5 ter simulado o máximo de precipitação a leste da sua posição climatológica (Figura 1e). O modelo subestimou a precipitação (3 mm dia^{-1}) na maior parte do Brasil e superestimou no Nordeste e sobre a Cordilheira dos Andes. Na estação seca (JJA) os maiores valores de precipitação ocorreram na porção central e norte da bacia devido à variação sazonal da ZCIT e as mudanças na circulação atmosférica sobre o continente. Entretanto, diferente da estação úmida, o modelo superestimou a precipitação (2.5 mm dia^{-1}) em grande parte do território brasileiro, mas subestimou na porção norte do continente. A ZCIT sobre o oceano Atlântico foi simulada abaixo de sua posição climatológica e apresentando valores de precipitação mais intensos do que os observados. Erros sistemáticos sobre os Andes foram observados em ambas as estações, mostrando que o modelo Eta tem dificuldade em simular a precipitação em regiões íngremes.

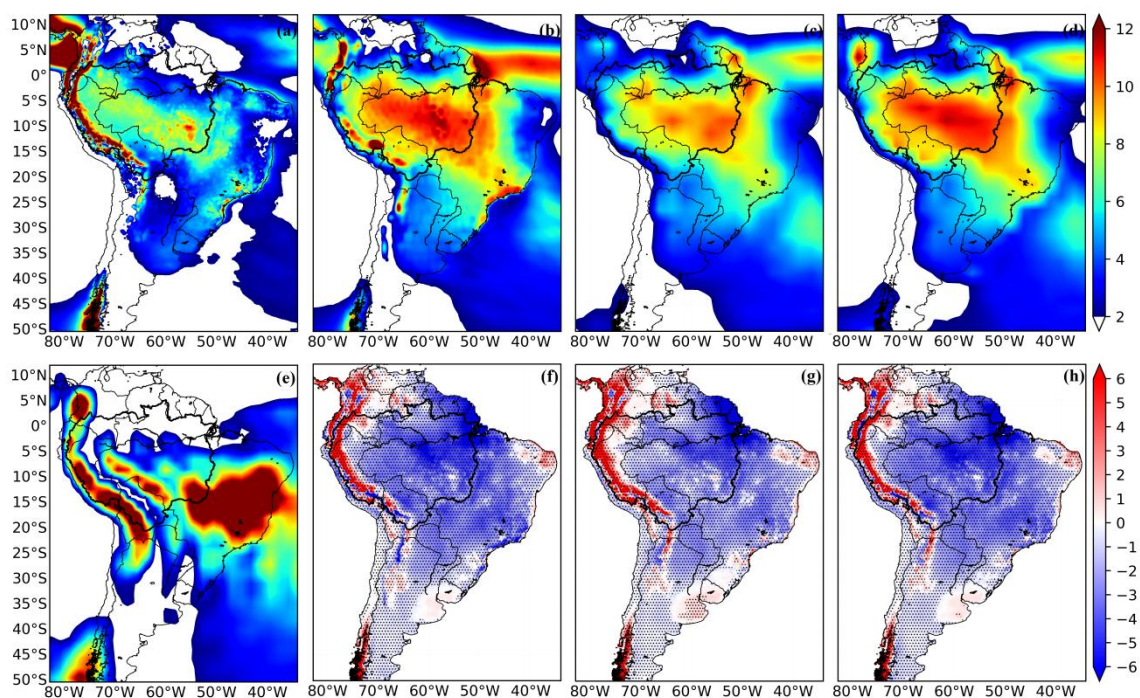


Figura 1: Precipitação sazonal do clima presente (verão - DJF) (mm dia^{-1}) simulada pelo (a) ETA-BESM-OA e (e) BESM-OA, e das observações/reanálise: (b) Era-Interim, (c) CMAP, (d) GPCP. Biais (diferença entre modelo e observações / reanálise) são mostradas em: (f) ETA-EraInterim, (g) ETA-CMAP e (h) ETA-GPCP. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

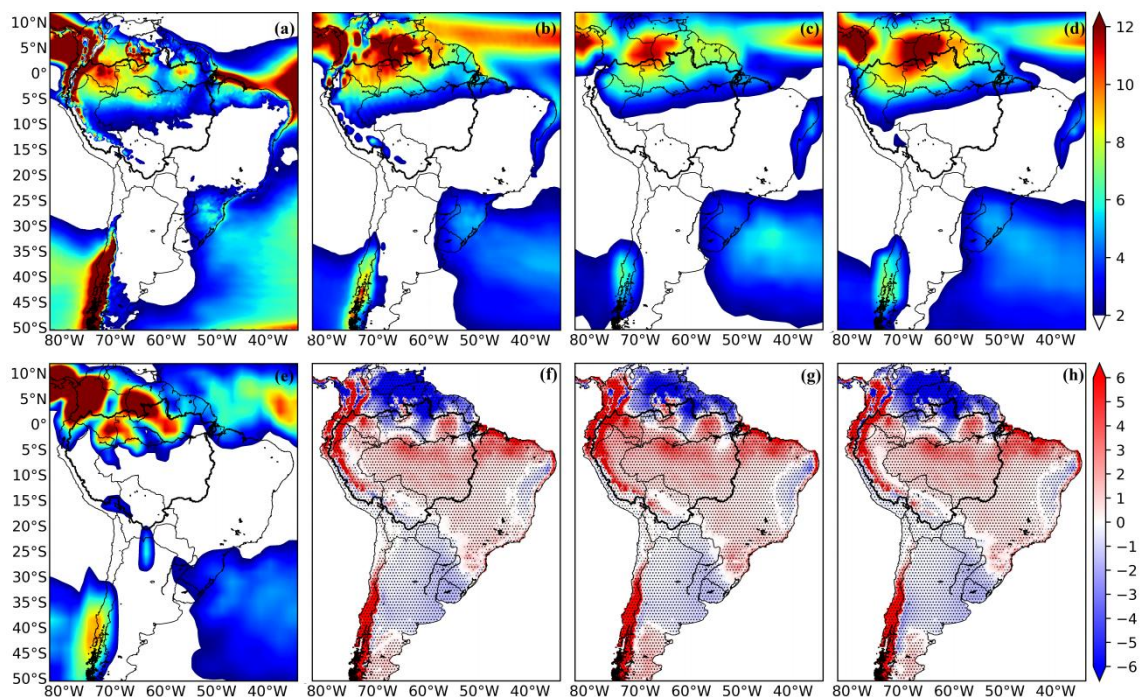


Figura 2: Precipitação sazonal do clima presente (inverno - JJA) (mm dia^{-1}) simulada pelo (a) ETA-BESM-OA e (e) BESM-OA, e das observações/reanálise: (b) Era-Interim, (c) CMAP, (d) GPCP. Bias (diferença entre modelo e observações / reanálise) são mostradas em: (f) ETA-EraInterim, (g) ETA-CMAP e (h) ETA-GPCP. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

MUDANÇAS MÉDIAS SAZONAIS

a) Temperatura (TP2m)

A Figura 3 apresenta a variação média sazonal da temperatura de 2 m projetada pelas simulações de Eta-BESM-OA em relação ao período de referência (1979-2005) e para o timeslice 2071-2100 com o cenário de emissão RCP 8.5. Para ambas as estações, observa-se pouca variação de temperatura sobre a bacia Amazônica no período de referência. Isso ocorre devido à homogênea e intensa disponibilidade de energia durante o ciclo anual nessa região. Na estação úmida, o modelo Eta-BESM-OA é claramente sensível ao aumento dos GEE's apresentando aumento de temperatura em todo o continente sul-americano, com valores significativos nas porções central e norte da bacia (4°C). O aumento na temperatura está associado às mudanças na disponibilidade

de energia (saldo de radiação) à superfície. O aumento do saldo de radiação (não mostrado) produziu aumento nos fluxos de calor sensível e no solo, uma vez que o calor latente foi reduzido, conduzindo, desta forma, a um aumento da temperatura do ar sobre a bacia. Resultados diferentes foram encontrados por Chou *et al.*, (2014) ao avaliarem as mudanças no clima da América do Sul para o século XXI utilizando o modelo regional Eta forçado com dois modelos do sistema terrestre HadGEM2-ES e MIROC5. Segundo os autores, o maior aquecimento sobre o continente não ocorreu na região Amazônica, mas nas regiões central e sudeste do Brasil. No presente estudo, houve aumento de temperatura na maior parte do continente na estação seca. Similarmente, na estação úmida as mudanças mais intensas ocorreram na bacia Amazônia. Em termos sazonais, observou-se o mesmo aumento relativo na temperatura do ar em ambas as estações.

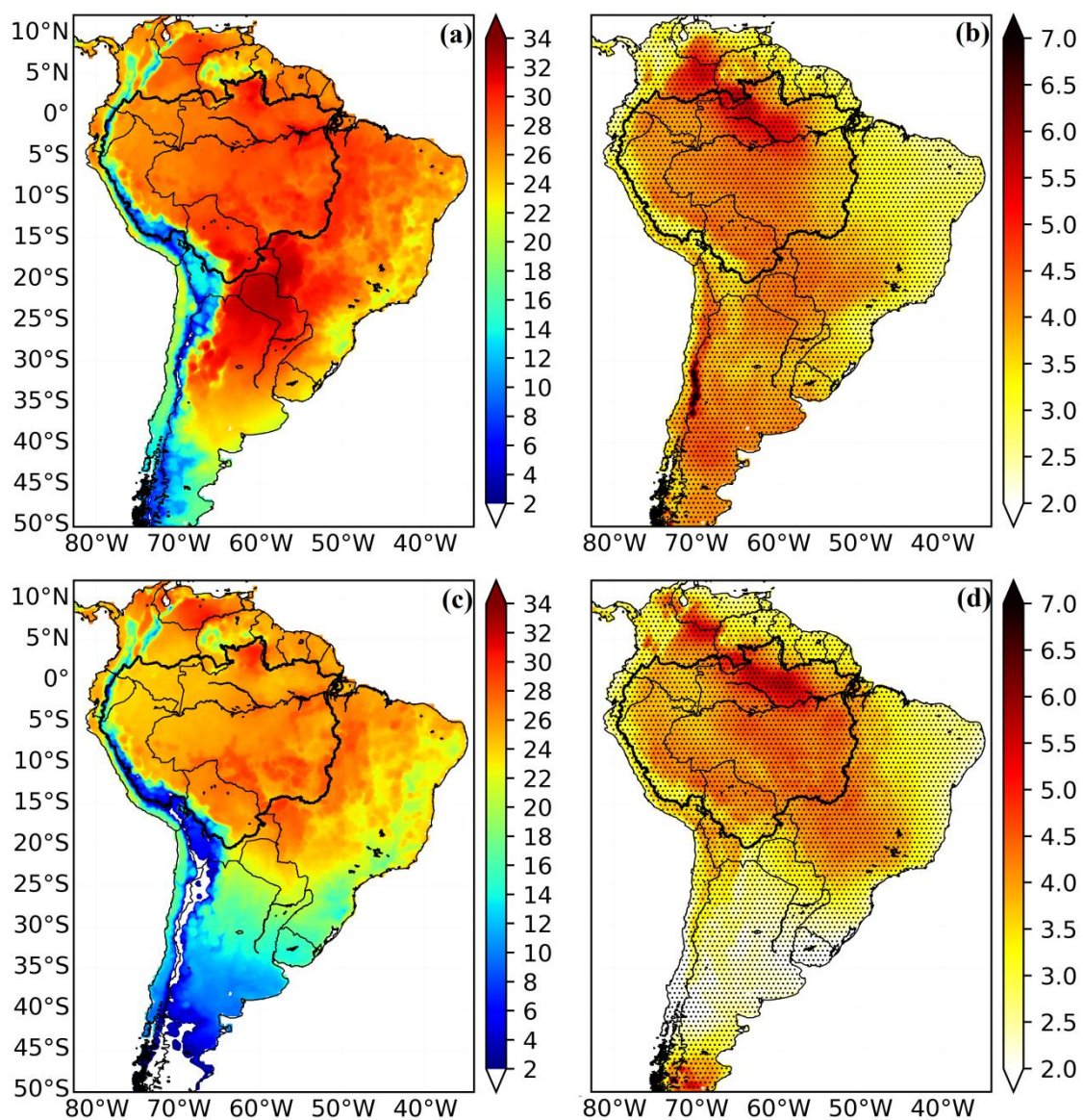


Figura 3: Clima atual (1979-2005) temperatura sazonal de 2 m ($^{\circ}\text{C}$): (a) DJF para verão e (c) JJA para inverno, e mudanças na temperatura de 2 m projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta-BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

b) Evapotranspiração, Convergência e Fluxo de Umidade

A mudança média sazonal da evapotranspiração projetada pelas simulações Eta-BESM-OA, para o verão austral (DJF) e inverno austral (JJA) é apresentada na Figura 4. Em ambas as estações se observa redução na evapotranspiração na bacia Amazônica, com maior abrangência, em termo de área, na estação seca. Na estação úmida, por outro

lado, observa-se reduções nas porções central e norte da bacia (2 mm dia^{-1}), enquanto que nota-se aumento mais ao sul da Amazônia. A redução na evapotranspiração sobre a bacia deve-se às reduções na precipitação e na umidade do solo (não mostrado), o que alterou o particionamento de energia à superfície, e produziu mais calor para aquecer o ar (calor sensível) do que para transpiração das plantas e evaporação da água na superfície (calor latente). Na estação seca, a redução média na evapotranspiração foi maior que na estação úmida devido ao déficit de água no solo observado nesse período. A média e as mudanças de convergência e umidade do fluxo projetadas pelas simulações Eta-BESM-OA, para ambas as estações, são mostradas na Figura 5. As características da circulação atmosférica simuladas sobre o continente durante o verão austral configuram um regime de Monção na América do Sul, estabelecendo um padrão de intensa convergência de umidade e precipitação na Amazônia e no Brasil central (Figuras 5a, c). Durante a estação úmida, a circulação atmosférica simulada pelo modelo regional apresenta uma baixa térmica (circulação ciclônica) persistente na região do Chaco (centrada aproximadamente em 20°S) associada à máxima nebulosidade sobre a Amazônia Central e o Altiplano da Bolívia, no período em que a ZCAS é mais ativa e intensa (Arraut e Satyamurty, 2009). O modelo Eta-BESM-OA representou de forma satisfatória a variação sazonal e espacial do transporte e convergência de umidade no período de referência, apresentando valores positivos (convergência) sobre a bacia Amazônia e negativos (divergência) no Nordeste do Brasil. Para o clima futuro (cenário RCP 8.5), redução na convergência de umidade sobre bacia Amazônica (3 mm dia^{-1}) em ambas as estações foram simuladas no clima futuro, afetando o transporte de umidade e a precipitação sobre a região.

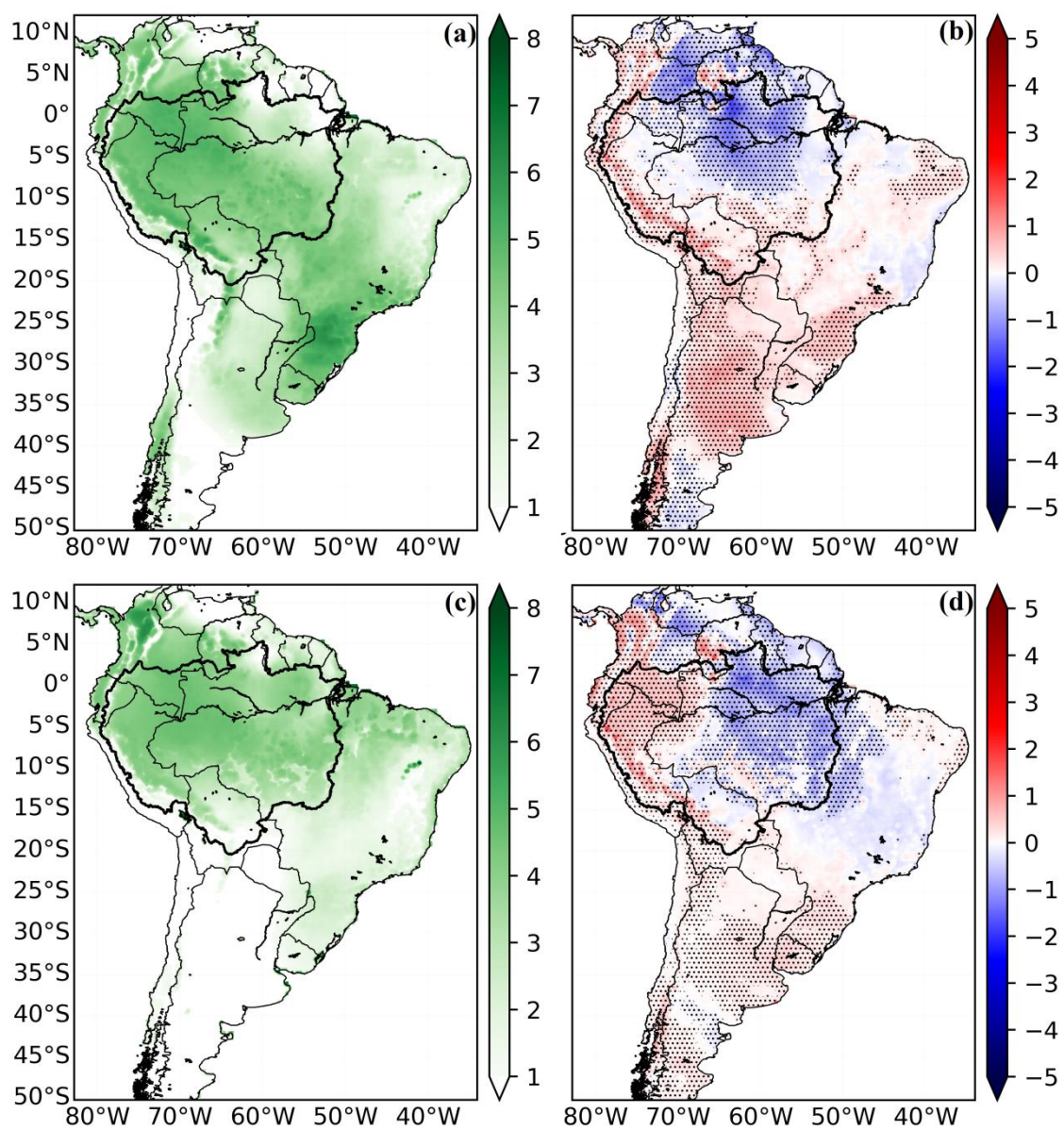


Figura 4: Clima atual (1979-2005) evapotranspiração sazonal (mm dia^{-1}): (a) verão para DJF e (c) inverno para JJA, e mudanças na evapotranspiração projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta-BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

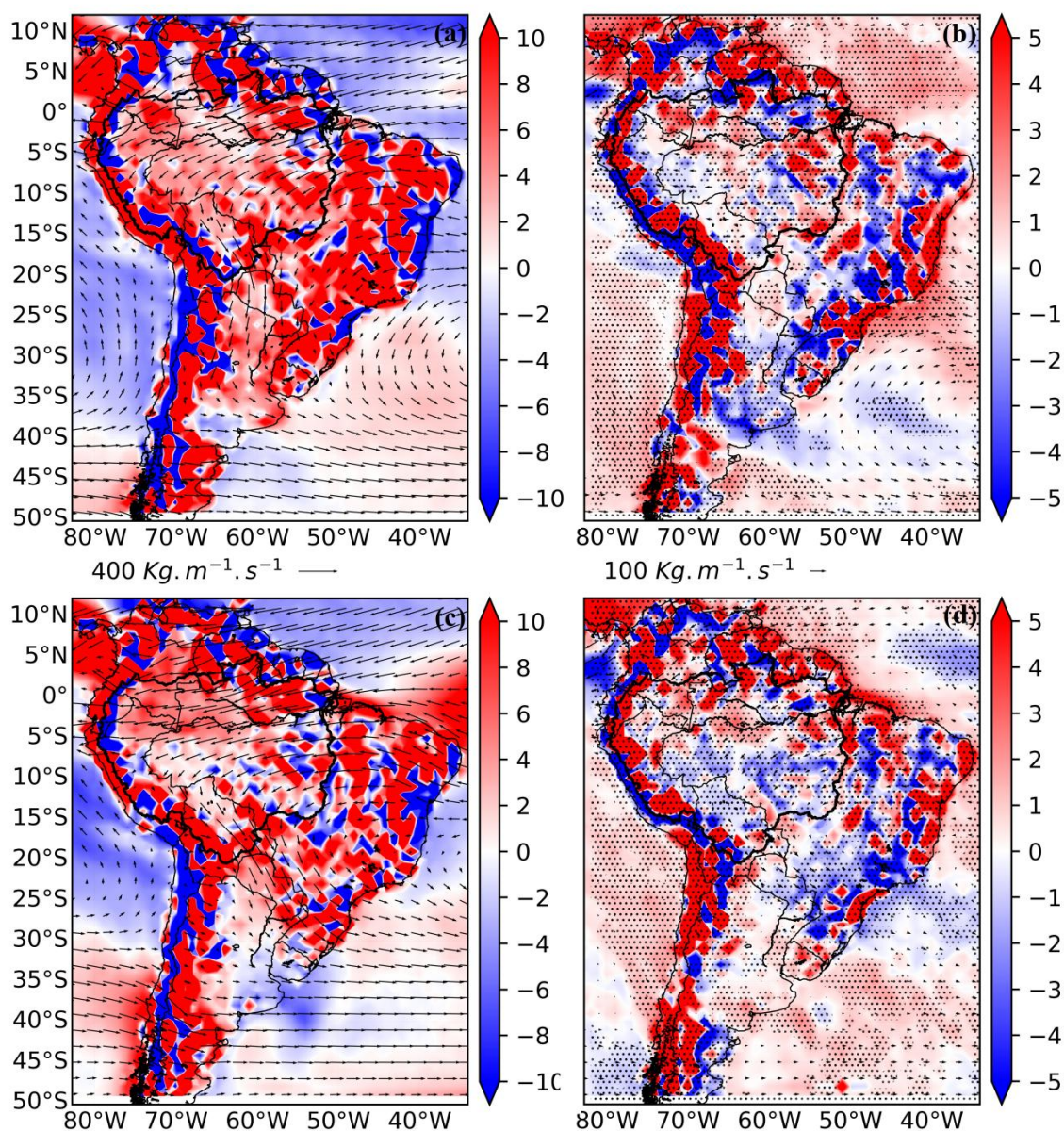


Figura 5: Clima presente (1979-2005) fluxo de umidade sazonal ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) e convergência (mm dia^{-1}): (a) DJF para verão e (c) JJA para inverno, e mudanças no fluxo e convergência de umidade projetada (2071-2100) em comparação ao período atual para Eta-BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: Verão - DJF (b) e Inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

c) Precipitação

A mudança média sazonal da precipitação projetada pelas simulações Eta-BESM-OA para o cenário de emissão RCP 8.5 é mostrada na Figura 6. De forma geral, se observa mudanças na precipitação sobre o continente e no oceano Atlântico Tropical, com

aumento e reduções localizados. Na estação úmida, a redução na precipitação ocorre em uma grande área que se estende desde o norte da bacia Amazônica (3.5 mm dia^{-1}) até o centro-sul do Brasil (2.5 mm dia^{-1}), região de atuação da ZCAS. A mudança sugere redução na frequência de ocorrência de ZCAS ou redução na atividade da ZCAS na produção de precipitação (Ambrizzi e Ferraz, 2015). A ZCIT apresentou-se menos intensa e deslocada ao norte de sua posição climatológica no Atlântico Tropical, o que produziu menos precipitação na Amazônia. Nessas simulações, a região de máxima redução de precipitação é posicionada na bacia Amazônica, não tanto na região central e parte do Sudeste do Brasil como em Chou *et al.*, (2014). Entretanto, os resultados encontrados nas simulações com o Eta-BESM-OA são semelhantes aqueles apresentados por Marengo *et al.*, (2012), quais observaram intensa redução na precipitação em grande parte da bacia Amazônica utilizando projeções do modelo Eta forçado com o modelo global HadCM3 A1B (Special Report on Emission Scenarios-SRES). Na estação seca, persistiu-se a redução de precipitação nas porções central e norte da bacia, mas observou-se aumento no sul da bacia e sobre sudeste do Brasil. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também se apresentou menos intensa produzindo menos precipitação na porção norte da bacia Amazônica e do nordeste do Brasil. A redução na precipitação sobre a bacia foi determinada tanto pela redução na evapotranspiração (2 mm dia^{-1}) quanto na convergência de umidade (3 mm dia^{-1}), mostrando que, as mudanças antropogênicas decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa, altera o padrão da circulação regional, o transporte e convergência de umidade, e conseqüentemente, a precipitação sobre a região Amazônica e em outras regiões da América do Sul.

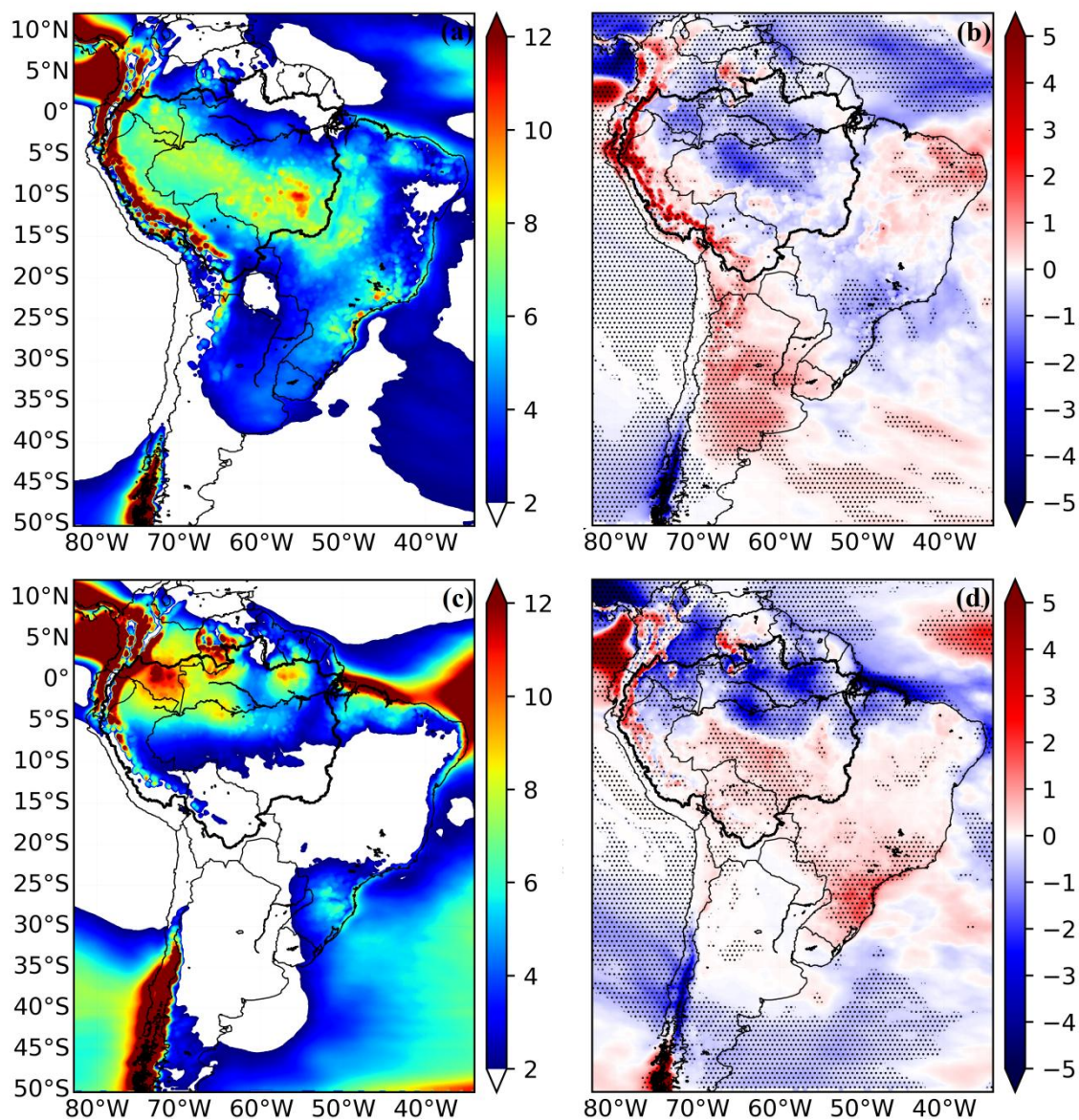


Figura 6: Clima atual (1979-2005) precipitação sazonal (mm dia^{-1}): (a) verão para DJF e (c) inverno para JJA, e mudanças na precipitação projetada (2071–2100) em relação ao período atual para Eta-BESM-OA sob o cenário RCP 8.5: verão - DJF (b) e inverno - JJA (d). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos cinzentos.

CICLO ANUAL

A Figura 7 mostra o ciclo anual dos componentes do balanço de água climatológico em toda a Amazônia, e para as bacias norte e sul com relação ao período de referência e para o futuro. O ciclo anual dos termos do balanço de água simulado para Eta-BESM-OA mostra algumas diferenças entre as seções norte e sul da bacia. Os componentes mostram um ciclo sazonal maior no sul da Amazônia em comparação com o norte da

Amazônia. Isto se deve as características do regime de monção na América do Sul e ao deslocamento sazonal da ZCIT ao longo do ano. O ciclo sazonal nos termos do balanço de água é similar aos encontrados por Marengo (2005) quando avaliadas as características e a variabilidade espaço-temporal do balanço hídrico da bacia do rio Amazonas utilizando uma combinação de observações e as reanálises globais. A redução na evapotranspiração simulada pelo Eta-BESM-OA (período de referência) durante a estação seca para o sul da bacia, mostra a deficiência do esquema de superfície em simular corretamente o ciclo anual. Medidas de fluxo de calor latente em torres micrometeorológicas durante o Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observatory Study- ABRACOS (Gash e Nobre, 1997) e no Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA (Gash *et al.*, 2004) mostra que, apesar da redução da precipitação na estação seca, a evapotranspiração apresenta pequeno aumento, sugerindo que a floresta pode transpirar potencialmente mesmo em condições de deficiência hídrica (Hodnett *et al.*, 1996; Rocha *et al.*, 2004; Randow *et al.*, 2004). Na projeção do clima futuro, a redução na precipitação foi mais pronunciada nas porções central e sul da bacia e na estação chuvosa (novembro a maio). Essa redução na precipitação é fortemente influenciada pela redução na convergência de umidade, uma vez que, menor alteração na evapotranspiração foi observada nesta estação. As simulações do Eta-BESM-OA no cenário de RCP 8.5 sugerem um prolongamento da duração da estação seca na bacia Amazônica. A redução na evapotranspiração durante a estação seca para o clima futuro mostra que, a redução na precipitação no período chuvoso pode conduzir a um estresse na umidade do solo, afetando o fluxo de calor latente, e conseqüentemente, o particionamento de energia e a temperatura a superfície (Figura 7a).

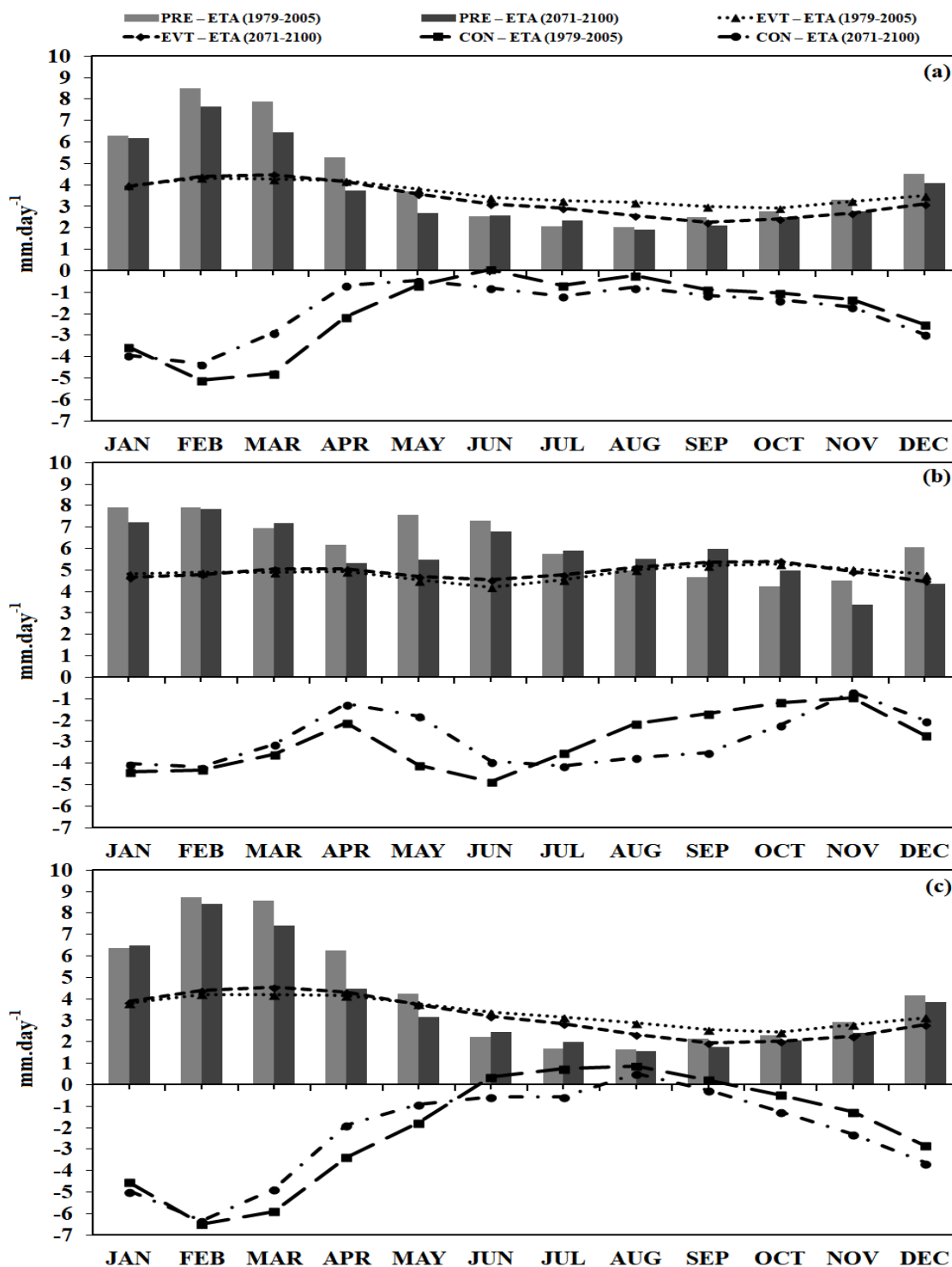


Figura 7: Média do ciclo anual dos componentes do balanço de umidade simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5. (a) Bacia Amazônica; (b) Amazônia Setentrional; (c) Amazônia Meridional: Precipitação (PRE, mm dia⁻¹); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹); Convergência de umidade (-CON convergência e +CON divergência, mm dia⁻¹).

BALANÇO DE ÁGUA NA BACIA AMAZÔNICA

As futuras mudanças projetadas dos componentes do balanço de água em relação à climatologia do período atual (1979-2005) para a bacia Amazônica, norte e sul da Amazônia, são mostradas na Tabela 1. No geral, a bacia Amazônica comportou-se com sumidouro de umidade, pois há $PRE > EVT$ nas três porções da bacia. Entretanto, na estação seca e na porção meridional a bacia comporta-se como fonte de umidade ($PRE < EVT$) e região de divergência de vapor d'água na atmosfera (convergência de umidade positiva), conforme observado na Figura 7c. Comparando o balanço combinado atmosférico-hidrológico com o período de referência, a convergência média de longo prazo $CON = 2,2 \text{ mm dia}^{-1}$ não é igualada por $RUN = 1,9 \text{ mm dia}^{-1}$, e há uma diferença de $0,3 \text{ mm dia}^{-1}$ que não é contabilizado. Esse desequilíbrio de 17% sugere um não fechamento do ciclo da água atmosférico-hidrológico na Bacia Amazônica e isso pode estar ligado a vários fatores, incluindo: (a) deficiência das parametrizações físicas dos modelos na representação da convecção (precipitação) e escoamento superficial, e (b) curto tempo de integração numérica fazendo com que o modelo não alcançasse o equilíbrio. Para as projeções futuras, o modelo simulou reduções de 11% na precipitação, 6% na evapotranspiração, 9% convergência de umidade e de 34% no runoff na média anual. Em termos relativos, a redução na convergência de umidade teve papel preponderante na redução da precipitação, mostrando mais uma vez que, o aumento dos GEE's pode modificar a estrutura termodinâmica da atmosfera, afetando o transporte e convergência de umidade, conseqüentemente, o balanço de água na Amazônia. Esses resultados sugerem a predominância do *Mecanismo de Retroalimentação Positivo (MRP)* na Amazônia conforme descrito por Pitman (2003), pois a redução da convergência de umidade e da evapotranspiração da superfície agiram

no sentido de reduzir a precipitação na bacia. Este cenário é preocupante para a região, uma vez que, o MRP para redução na precipitação pode causar instabilidade nos ecossistemas naturais da Amazônia, uma vez que, os mesmos não apresentam grande capacidade de adaptação às mudanças no clima, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo (décadas). Em termos regionais, as maiores reduções na precipitação e na convergência de umidade acontecem na porção centro-sul da bacia Amazônica, e sazonalmente, as reduções na precipitação foram mais acentuadas na estação úmida com tendência de redução para o fim do século XXI.

Tabela 1: Mudanças médias sazonais (em %) projetadas pelo modelo Eta-BESM-OA com RCP 8.5 para o clima futuro (2071-2100), em relação ao clima presente (CP, 1979-2005) para o verão austral (DJF); inverno austral (JJA) e para média anual, dos componentes do balanço de umidade – Temperatura (TP2m, °C), precipitação (PRE, mm dia⁻¹), evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹), convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) e escoamento superficial (RUN, mm dia⁻¹) na bacia Amazônica, Amazônia setentrional e Amazônia meridional.

Região	Anual			Úmido			Seco		
	CP	Mudança(%)	Tendência	CP	Mudança(%)	Tendência	CP	Mudança(%)	Tendência
Bacia									
TP2m	27.4	15.0	0.0107	28.3	14.1	0.0416	26.4	15.9	0.0404
PRE	4.6	-11.3	-0.0015	7.0	-14.1	-0.0083	2.3	-2.6	-0.0014
EVT	3.7	-6.1	-0.0008	4.2	1.4	0.0020	3.2	-15.8	-0.0041
CON	2.2	-9.5	-0.0002	3.9	-24.1	-0.0023	0.4	114.9	0.0101
RUN	1.9	-34.3	-0.0007	2.8	-29.6	-0.0062	0.9	-48.5	-0.0056
Bacia Norte									
TP2m	26.0	15.4	0.0098	27.1	15.5	0.0405	24.9	15.3	0.0367
PRE	6.5	0.2	0.0009	7.2	-4.7	-0.0080	5.7	6.5	0.0010
EVT	4.8	2.0	0.0009	4.9	-0.1	-0.0022	4.8	4.1	0.0020
CON	3.3	4.3	0.0005	3.6	-13.0	-0.0052	3.1	24.9	0.0012
RUN	1.6	-5.1	-0.0010	2.3	-14.3	-0.0057	0.9	18.6	0.0030
Bacia Sul									
TP2m	27.6	14.1	0.0102	28.4	13.4	0.0396	26.8	14.9	0.0386
PRE	4.7	-8.1	-0.0013	7.5	-10.5	-0.0058	1.9	1.1	0.0026
EVT	3.5	-3.3	-0.0006	4.1	4.1	0.0012	3.0	-14.2	-0.0033
CON	2.8	-11.4	-0.0002	5.1	-11.1	-0.0009	0.5	-14.4	-0.0106
RUN	1.2	-22.9	-0.0008	3.4	-28.8	-0.0046	-1.1	-41.5	-0.0059

CONCLUSÕES

No presente estudo, o modelo regional Eta, forçado com o modelo BESM-OA, foi utilizado para geração de simulações de mudanças climáticas com cenário de emissão RCP 8.5 do Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report - (AR5-

IPCC). O objetivo desse estudo foi avaliar os impactos do aumento das emissões dos gases do efeito estufa projetado para o fim do século XXI nos componentes do balanço de água na bacia Amazônica. No clima presente, o modelo regional conseguiu representar a variação sazonal da precipitação sobre o continente, posicionando corretamente os máximos de precipitação em ambas as estações de inverno e verão, apesar do modelo global BESM-OA ter simulado os máximos a leste de sua posição climatológica. O modelo Eta-BESM-OA apresentou sensibilidade ao cenário RCP 8.5 com aumento de temperatura em todo o continente e valores mais intensos sobre a bacia Amazônica (4-5°C). Para o clima presente, a bacia Amazônica se comportou como sumidouro de umidade, onde a precipitação foi maior que evapotranspiração em todas as porções da bacia. Para as projeções do século XXI, o modelo simulou reduções de 11% na precipitação, 6% na evapotranspiração, 9% convergência de umidade e de 34% no runoff. A redução na precipitação foi devido às reduções na convergência de umidade e na evapotranspiração. Entretanto, a redução na convergência de umidade apresentou papel preponderante, mostrando que o aumento dos GEE's pode modificar o transporte de umidade regional, e conseqüentemente, o balanço de água na Amazônia. Como a redução da convergência de umidade e da evapotranspiração agiram para reduzir a precipitação, notou-se a configuração de um *Mecanismo de Retroalimentação Positivo (MRP)*. Isso é preocupante, uma vez que, o *MRP* pode causar instabilidade nos ecossistemas Amazônicos, pois não apresentam grande capacidade de adaptação à magnitude das mudanças no clima, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo. Desta forma, o aumento de temperatura acima de 2°C e a redução nos componentes do balanço de água podem afetar a complexa interação solo-planta-atmosfera podendo trazer conseqüências irreversíveis para a floresta (e os serviços que

ela fornece), assim como afetar negativamente os setores da agricultura, indústria, navegação fluvial, geração de energia elétrica, e principalmente as populações mais vulneráveis na bacia Amazônica.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é parte da Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Os autores agradecem a Agência Nacional de Águas (ANA) e Brazilian Ministry of Science, Technology, and Innovation (MCTI) por financiamento adicional, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) por disponibilizar o Supercomputador TUPA para realização das integrações numéricas, o Laboratório de Modelagem do Sistema Climático Terrestre (LABCLIM) da UEA por disponibilizar a estrutura física computacional – Cluster Tambaqui. O primeiro autor agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo.

CAPÍTULO 2

Gomes, W.B.; Correia, F.W.S.; 2018. Avaliação do Balanço de Água na Bacia Amazônica sob o RCP 8.5 e Cenários de Desflorestamento. Manuscrito em preparação para *Acta Amazonica*.

Evaluation of Budget Water of Amazon Basin under RCP 8.5 and Deforestations Scenarios

ABSTRACT:

In this study we evaluated the impacts arising from the increase of GHG greenhouse gases (scenario RCP 8.5) and future scenarios of deforestation and their impact on the water balance in the Amazon Basin. For this, the Regional Model Eta and the Hydrological Model of Large Basins (MGB-IPH), forced with the Brazilian Model of the Earth System (Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere) version 2.5 were used. The energy and water budget changes on the surface led to a mean increase in temperature (4-5°C) over the basin. The changes in temperature and water cycle were intensified in future deforestation scenarios. In the RCP 8.5 scenario, precipitation decreased 11%, evapotranspiration decreased 6% and moisture convergence decreased 9%. In the deforestations scenarios, reductions of 13% (2050) and 19% (2100) were observed in precipitation. In this case, the Negative Feedback Mechanism (NFM) predominated, in which the relative reduction in evapotranspiration was greater than the reduction in precipitation leading to an increase in moisture convergence over the region. The water budget changes in the Amazon due to anthropogenic factors are a worrying scenario, as they can trigger significant changes in natural Amazonian ecosystems. If public conservation policies do not act to halt environmental degradation (deforestation) and reduce greenhouse gas emissions by burning fossil fuels, changes in the water cycle can have negative effects on the environment and cause losses to the hydrological resources and in the principal sectors of the economy (agriculture, industry, river navigation, power generation), directly affecting communities living along the banks of rivers, especially the vulnerable populations of the Amazon basin.

KEYWORDS: Amazon Basin, Deforestation, Water Balance, Climate Modeling.

Avaliação do Balanço de Água na Bacia Amazônica sob o RCP 8.5 e Cenários de Desflorestamento

RESUMO:

Neste estudo, avaliou-se os efeitos do aumento dos gases do efeito estufa (cenário RCP 8.5) e as mudanças na cobertura da terra nos componentes do balanço de água na bacia Amazônica. Para isso utilizou-se o modelo regional Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5), ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As mudanças nos balanços de energia e água a superfície conduziram a um aumento médio na temperatura (4-5°C) sobre a bacia. As mudanças na temperatura e no ciclo da água foram intensificadas nos cenários de desflorestamentos futuros. No cenário RCP 8.5, sem desflorestamentos futuros, a precipitação reduziu 11%, a evapotranspiração 6% e a convergência de umidade 9%. Com os desflorestamentos, observaram-se reduções de 13% (2050) e 19% (2100) na precipitação. Neste caso, predominou-e o Mecanismo de Retroalimentação Negativo (MRN), no qual, a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na convergência de umidade sobre a região. As mudanças no balanço de água na Amazônia devido aos fatores antropogênicos se caracterizam um cenário preocupante, pois podem desencadear alterações significativas nos ecossistemas naturais. Se as políticas públicas de conservação não agirem no sentido de deter o aumento da degradação ambiental na Amazônia e reduzir as emissões dos gases do efeito pela queima de combustíveis fósseis, as mudanças no balanço de água podem causar um desequilíbrio no sistema clima-bioma, no qual outro tipo de vegetação (provavelmente cerrado) se adaptaria às novas condições climáticas estabelecidas na bacia Amazônica.

Palavras-Chaves: Bacia Amazônica, Desflorestamento, Balanço de Água, Modelagem Climática.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior extensão contínua de floresta tropical úmida do planeta. Com uma área de 6 milhões de km², distribuída em oito países na América do Sul: Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana e Suriname, representa 40% das florestas tropicais da Terra (Aragão *et al.*, 2014). A precipitação abundante (2.300 mm ano⁻¹) faz da região uma importante fonte de calor e umidade para a atmosfera bem como para os oceanos por meio da intensa descarga fluvial anual (220.000 m³.s⁻¹) que representa 15% do total de água doce (Marengo, 2005; Nepstad *et al.*, 2008; Nobre *et al.*, 2009). A bacia Amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, pois apresenta taxa de precipitação maior que evapotranspiração, sendo esta proveniente tanto da floresta tropical devido a intensa reciclagem de água (Rocha *et al.*, 2015), quanto do transporte de umidade proveniente do oceano Atlântico tropical (Nepstad *et al.*, 2008; Malhi *et al.*, 2008; Satyamurty *et al.*, 2013). A Amazônia atua como fonte indispensáveis de energia por meio de sua intensa evapotranspiração e liberação de calor latente de condensação na média e alta troposfera em nuvens convectivas tropicais, contribuindo para a geração e manutenção da circulação atmosférica em escalas regional e global (Artaxo *et al.*, 2005; Fearnside, 2005; Marengo, 2006; Malhi *et al.*, 2008). No contexto regional, a floresta Amazônica tem papel fundamental na determinação do regime hidrológico tanto na própria bacia, decorrente da ciclagem de água, quanto em outras regiões do continente sul-americano por meio do transporte de umidade na região dos Jatos de Baixos Níveis – JBN (Arraut e Satyamurty 2009; Rocha *et al.*, 2015). No entanto, a bacia Amazônica se mostra vulnerável às variabilidades e mudanças no sistema climático, devido tanto às variações naturais associadas aos modos de variação dos Oceanos Pacífico e Atlântico (El Nino

Oscilação Sul – ENOS, Oscilação Decadal do Pacífico - ODP e Oscilação Multidecadal do Atlântico – OMA), quanto às antropogênicas decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa (GEE's) e as mudanças no uso e cobertura da terra (LUCC): desflorestamento, atividades agrícolas e urbanização (Marengo *et al.*, 2012; Drumond *et al.*, 2014; Chou *et al.*, 2014; Espinoza *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Marengo e Espinoza, 2016; Sorribas *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2017). Tais mudanças naturais e/ou antrópicas podem afetar os ecossistemas Amazônicos, a capacidade de absorção de carbono, alterar o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente afetar os setores primários da agricultura, navegação fluvial e geração de energia com prejuízos e danos aos povos e comunidades vulneráveis da região Amazônica (Doughty *et al.*, 2015). As projeções de mudanças no clima proveniente das simulações dos modelos climáticos globais do IPCC's Fifth Assessment Report (AR5) (CMIP5) mostram redução e aumento na precipitação em diferentes regiões da América do Sul no fim do século XXI, com alto grau de incerteza na Amazônia (IPCC AR5, 2013). Entretanto, a principal desvantagem dos modelos globais é a baixa resolução espacial que limita a representação dos processos físicos e as forçantes de mesoescala (topografias complexas, heterogeneidade da superfície e grandes lagos e rios), afetando a exatidão da variação de temperatura e precipitação em escala regional (McPherson, 2007). Outro fator preocupante para o clima são os desflorestamentos na bacia Amazônica. Considerando a série histórica, o desflorestamento total na Amazônia foi de 428.721 km², correspondendo a 16% da floresta Amazônica brasileira (INPE, 2017). Isso corresponde a uma taxa média de 14.300 km² ao ano. Nas últimas décadas os efeitos do desflorestamento no clima da bacia Amazônica utilizando modelos de circulação geral e regional tem sido avaliados (Correia *et al.*, 2007; D'Almeida *et al.*, 2007; Sampaio *et*

al., 2007; Nobre *et al.*, 2009; Alves *et al.*, 2017; Silveira *et al.*, 2017). De forma geral, esses diferentes estudos mostraram que os desflorestamentos na Amazônia podem conduzir a impactos significativos nos balanços de energia, água e carbono, produzindo aumento na temperatura da superfície e redução na precipitação em escala regional. Diante da sinergia dos impactos regionais decorrentes das alterações no uso da terra e os efeitos das mudanças climáticas globais, uma questão importante levantada na comunidade científica é: “*De que maneira o aumento dos GEE’s e as mudanças no uso da terra podem modificar o balanço de água na bacia Amazônica?*”. Visando responder esta pergunta, esse estudo tem por objetivo avaliar os impactos do aumento dos GEE’s e dos desflorestamentos no balanço de água na bacia Amazônica utilizando o modelo regional Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5), cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5 (AR5 IPCC 5th) e cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Cenários de Emissão e Mudanças no Uso da Terra

Neste estudo utilizou-se o cenário de emissão baseado no Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP 8.5) do Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report - (IPCC AR5, 2013). Os cenários de emissão (RCP’s) representam diferentes trajetórias de concentração dos gases de efeito estufa no clima futuro (Van Vuuren *et al.*, 2011a, 2011b). Nesses cenários as possíveis alterações no sistema terra-atmosfera são concebidas pelos valores das forçantes radiativas as quais compreendem valores

entre 2.6 e 8.5 W m². O RCP 8.5 (2.6) é o mais pessimista (otimista) e resulta em um aquecimento médio global de 2.6°C a 4.8°C (0.3°C a 1.7°C) ao final do século XXI. Também foram utilizados três cenários de mudanças no uso da terra para a bacia Amazônica: a) mapa atual de vegetação referente ao ano base de 2015; b) cenário projetado para 2050 e c) cenário projetado para 2100 (Figura 1). Para o mapa atual se considerou a vegetação elaborado pelo Projeto ProVeg (Sestini *et al.*, 2002) e dados do Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia - PRODES-DIGITAL (INPE, 2017) com as cenas de desflorestamento para o ano de 2015. Os cenários de desflorestamentos futuros para os anos de 2050 e 2100 foram elaborados a partir do modelo de dinâmica da paisagem (Soares-Filho *et al.*, 2004) denominado DINAMICA. O modelo DINAMICA é um modelo de simulação espacial do tipo autômato celular concebido para simular a dinâmica das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia Amazônica principalmente em áreas ocupadas por pequenas fazendas. O modelo incorpora processos de decisão baseados em práticas de uso do solo adotadas por colonos Amazônicos e é parametrizado a partir da assimilação maciça de dados obtidos de sensoriamento remoto. O bioma pastagem degradada representou o desflorestamento na bacia Amazônica. As propriedades físicas e fisiológicas da vegetação e solo para os principais biomas modelados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros biofísicos utilizados de acordo com o tipo de vegetação.

Parâmetros	Floresta	Pastagem	Cerrado
Albedo	0,13 ⁽¹⁾	0,18 ⁽¹⁾	0,18 ⁽²⁾
Emissividade	0,95	0,96	0,97
Índice de área foliar (IAF)	5,2 ⁽¹⁾	2,7 ⁽¹⁾	1,0 ⁽²⁾
Fração de cobertura vegetal (Vfrac)	0,98 ⁽³⁾	0,85 ⁽³⁾	0,50
Variação sazonal do Vfrac	0,05	0,10	0,30
Comprimento de rugosidade (m)	2,35 ⁽¹⁾	0,05 ⁽¹⁾	1,20 ⁽²⁾
Deslocamento do plano zero (m)	28,4 ⁽¹⁾	0,3 ⁽¹⁾	10,0 ⁽²⁾
Profundidade das raízes (m)	4,0 ⁽¹⁾	1,0	2,0
Condutância estomática (mm s ⁻¹)	0,0035 ⁽⁴⁾	0,0010 ⁽⁴⁾	0,0020 ⁽⁴⁾

Os índices referem-se aos seguintes estudos: (1) Wright *et al.*, (1996); (2) Miranda *et al.*, (1996); (3) Silva Dias e Regnier (1996); (4) Freitas (1999). FONTE: Extraído de Gandu *et al.* (2004).

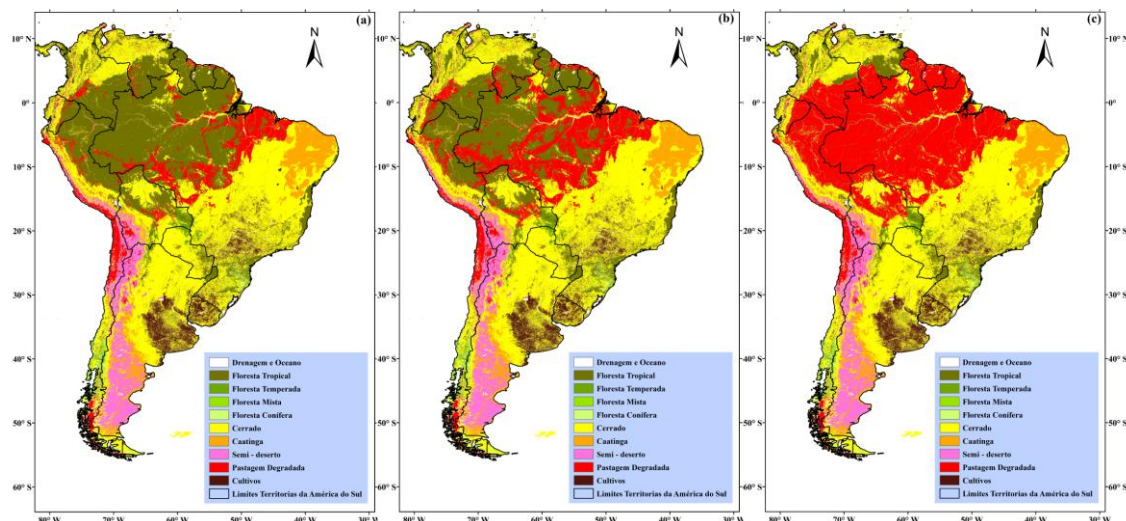


Figura 1: Cenários de cobertura vegetal a serem utilizados nas simulações com o modelo regional ETA. (a) Mapa de vegetação elaborado pelo Projeto ProVeg com áreas desflorestadas (ano base 2015); (b) Cenário projetado para o ano de 2050 e c) Cenário projetado para o ano de 2100. Ambos cenários elaborados pelo modelo DINÂMICA. Resolução: 1x1 km. Cores: Verde (floresta), Amarelo (Cerrado), Azul (Água) e Vermelho (Pastagem degradada).

Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica

O Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 – BESM-OA 2.5 é um modelo espectral Euleriano com truncamento triangular T62 e 28 níveis na vertical (Nobre *et al.*, 2013). Desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), BESM-OA 2.5 foi utilizado para forçar o modelo Eta para condições do clima presente e para o fim do século a partir do cenário de emissões RCP 8.5. A componente atmosférica é constituída pelo modelo de circulação geral da atmosfera (AGCM) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE (Figueira *et al.*, 2016) acoplado ao modelo de circulação geral oceânico (OGCM) - Modelo Oceânico Modular versão 4p1 (MOM4p1) do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate via GFDL's Flexible Modular System (Griffies, 2009). A coordenada vertical do modelo é a sigma e topografia tratada de forma espectral (Bonatti, 2006). As parametrizações físicas incluem o modelo de superfície Simplified Simple Biosphere Model – SSiB (Xue *et al.*, 1991), o esquema de turbulência na camada limite planetária

(CLP) de Mellor-Yamada 2.0 (Mellor e Yamada, 1982), o esquema de convecção profunda de Grell e Devenyi (2002) e a parametrização de convecção rasa de Tiedtke (1984) e esquema de radiação de ondas curtas e longas de Tarasova *et al.*, (2006) e Harshvardhan *et al.*, (1987), respectivamente. O modelo regional Eta foi adaptado para realizar integrações de longo período (Pesquero *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b). A dinâmica do modelo regional é desenvolvida na coordenada vertical eta (Mesinger, 1984), útil para operar em regiões de orografia íngremes, como a Cordilheira dos Andes, na América do Sul. A precipitação é calculada pelo esquema de parametrização de cumulus de Betts-Miller-Janjic (Janjic 1994) e pelo esquema de microfísica da nuvem Zhao (Zhao *et al.*, 1997). Os esquemas de radiação são do GFDL para ondas curtas Lacis e Hansen (1974) e longas Fels e Schwarzkopf (1975). Os processos de superfície são representados pelo NOAH (Ek *et al.*, 2003), que contém 4 camadas de solo para a temperatura e umidade, assim como 12 tipos de vegetação e 7 tipos de textura de solo. O mapa da vegetação revisado inclui o arco do desmatamento na Amazônia (Sestini *et al.*, 2002). Neste estudo o modelo foi configurado com resolução de 20 km na horizontal e 38 níveis na vertical. Foram realizados quatro experimentos numéricos denominados: CPD15, C85D15, C85D50 e C85D100. No experimento CPCD15 incluiu-se o mapa atual de vegetação com desflorestamento para o ano de 2015 e o clima presente proveniente do BESM-OA 2.5. Esse experimento consistiu-se de uma integração contínua de 46 anos inicializada às 00h (TMG - Tempo Médio de Greenwich) de 01 de janeiro de 1960. A concentração de dióxido de carbono (CO₂) permaneceu constante em 330 ppm durante a integração. Nos experimentos de clima futuro C85D15, C85D50 e C85D100 utilizaram-se as projeções de emissões RCP 8.5 produzidas BESM-OA 2.5 e o mapa de vegetação de 2015 e cenários de

desflorestamento para os anos 2050 e 2100, respectivamente. No clima futuro, as integrações foram realizadas de forma contínua para o período de 2071 a 2100 (31 anos), considerando um tempo de equilíbrio de um ano. Os limites laterais são atualizados com as variáveis de estado do modelo BESM-OA 2.5 a cada intervalo de 6 horas. O modelo atualiza a concentração equivalente de CO₂ a cada 3 anos. O verde da vegetação varia mensalmente, mas o mesmo tipo de vegetação é mantido durante o período de integração. A temperatura da superfície do mar (TSM), a umidade inicial do solo e a temperatura do solo são obtidas do BESM-OA 2.5 com TSM atualizado diariamente no modelo regional Eta. As simulações de downscaling são referidas como Eta-BESM-OA, em que o modelo Eta é acionado pelo BESM-OA 2.5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do modelo baseia-se em comparações entre as simulações de precipitação Eta e reanálises/observações do Era-Interim (Dee *et al.*, 2011), Merge Analysis of Precipitation - CMAP (Xie e Arkin, 1996) e Global Precipitation Climatology Project - GPCP (Xie *et al.*, 2003) para o período 1979-2005. As mudanças no clima decorrentes dos cenários de emissão RCP 8.5 e desflorestamentos futuros para 2050 e 2100 são avaliados com relação ao período de 1979-2005, considerado como clima presente. A avaliação é baseada principalmente nos componentes do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, convergência de umidade e escoamento) e de temperatura da bacia Amazônica.

AVALIAÇÃO DO MODELO

O ciclo anual de precipitação projetado pelas simulações Eta-BESM-OA e observações com relação ao período de referência (1979-2005) é mostrado na Figura 2. De forma geral, o modelo Eta-BESM-OA conseguiu representar a sazonalidade na precipitação sobre a bacia, apresentando os maiores valores em fevereiro-março e menores em agosto-setembro em acordo com as observações. Entretanto, o modelo subestima a precipitação durante todo o período principalmente nos meses do outono e primavera. O ciclo anual de precipitação simulado para Eta-BESM-OA e observações mostram algumas diferenças entre as seções norte e sul da bacia, com maior amplitude sazonal na porção sul da bacia. Esse comportamento deve-se as características do regime de monção na América do Sul e ao deslocamento sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao longo do ano. Em termos regionais, o modelo conseguiu representar melhor o ciclo anual da precipitação na porção sul da bacia, mas teve dificuldades em simular na porção norte devido principalmente à dificuldade em simular corretamente a intensidade e o posicionamento ZCIT no oceano Atlântico.

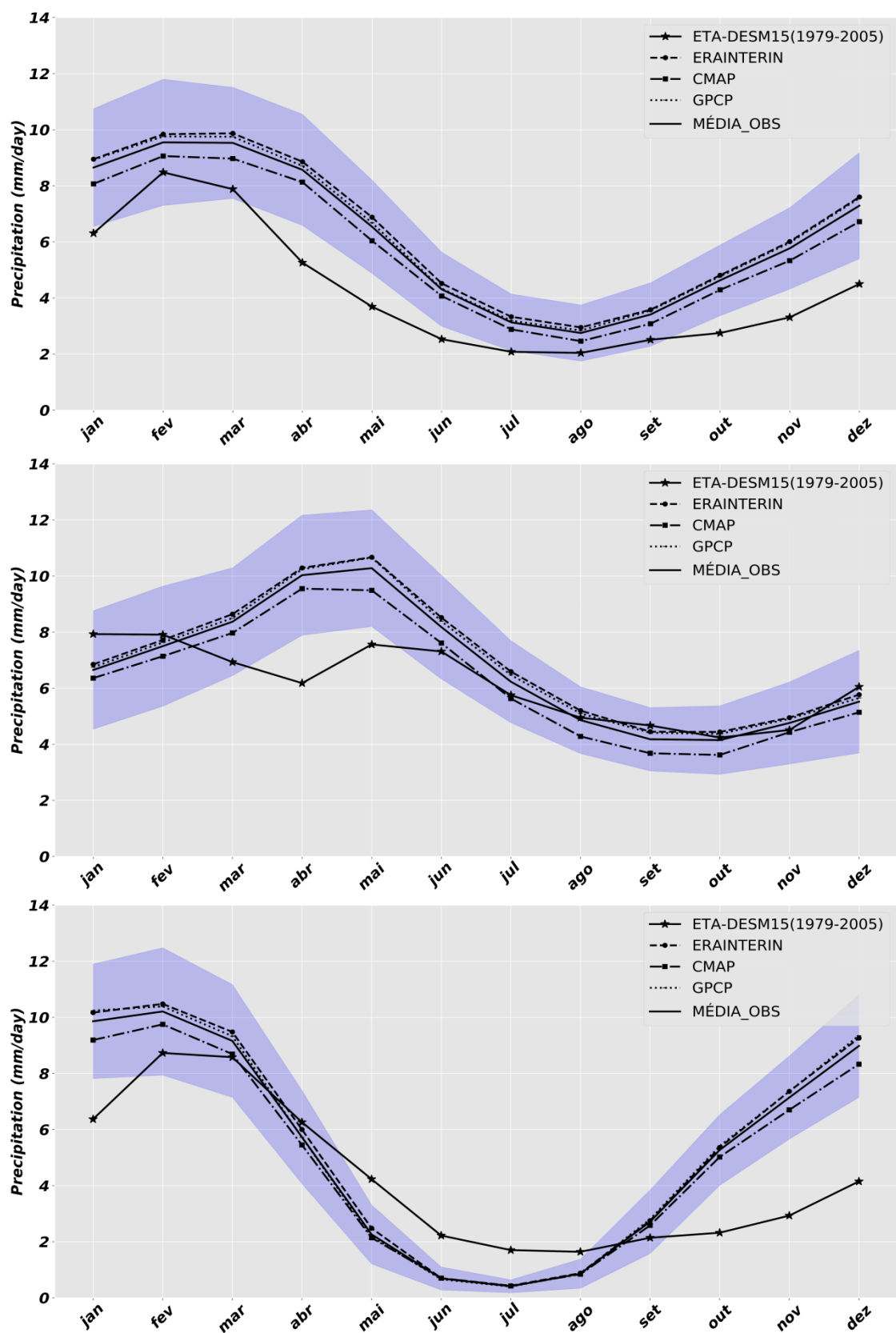


Figura 2. Média do ciclo anual da precipitação (mm dia^{-1}) simulada pelo ETA-BESM-OA e das observações/reanálise: Era-Interim; CMAP e GPCP. (a) Bacia Amazônica, (b) porção norte da Bacia Amazônica e (c) porção sul da Bacia Amazônica.

MUDANÇAS MÉDIAS SAZONAIS

a) Temperatura a 2m e Evapotranspiração

A Figura 3 apresenta a média sazonal da temperatura de 2m simulada pelo modelo Eta-BESM-OA com relação ao período de referência (1979-2005) e as mudanças projetadas (2071-2100) sob o RCP 8.5 e cenários de desmatamento (2050 e 2100). Em ambas as estações pequena variação de temperatura sobre a bacia Amazônica no período atual foi observado devido à homogênea e intensa disponibilidade de energia solar durante o ciclo anual nessa região. Para o cenário RCP 8.5 se observa mudanças significativas na temperatura 2m sobre todo o continente Sul-Americano (Figura 3b,f). As mudanças mais intensas são observadas nas porções central e norte da bacia com aumento variando entre 3°C a 5°C. As mudanças na disponibilidade de energia (net radiation) à superfície e no aumento no fluxo de calor sensível e no solo conduziram a um aumento da temperatura sobre a bacia. No entanto, as mudanças são intensificadas quando se incluem os cenários futuros de desflorestamento. No cenário de 2050 (2100) o aumento na temperatura variou de 4°C a 6°C (5°C a 7°C). O aumento na temperatura nos cenários de desflorestamento é decorrente da redução na evapotranspiração (Figura 4) e do comprimento de rugosidade (Tabela 1), uma vez que a rugosidade tem papel fundamental na modulação dos fluxos turbulentos de calor e de umidade entre a superfície e a atmosfera. A evapotranspiração apresentou reduções de 6%, 12% e 20% em todos os cenários RCP 8.5 e de desflorestamento, apresentando mudanças mais significativas na estação seca e para o cenário de 2100 (redução de 35%). A redução do comprimento de rugosidade de 2,55 m na floresta para 0,02 m na pastagem degradada enfraqueceu a transferência turbulenta de energia na superfície; assim sendo, um valor mais alto de temperatura foi necessário para remover o excesso de energia da superfície.

O menor índice de área foliar e a reduzida capacidade de armazenar umidade do solo na pastagem degradada teve efeito na redução da transpiração. Além disso, na pastagem menos precipitação é interceptada e reevaporada quando o comprimento de rugosidade é relativamente menor, afetando desta forma a evapotranspiração e a temperatura a 2m. Esses resultados mostram que o aumento dos gases do efeito estufa (GEE's) e os desflorestamentos contribuem para alterar os balanços de radiação e de energia, consequentemente o clima e que as mudanças tornaram-se mais intensas à medida que se aumentou o grau de desflorestamento na bacia Amazônica.

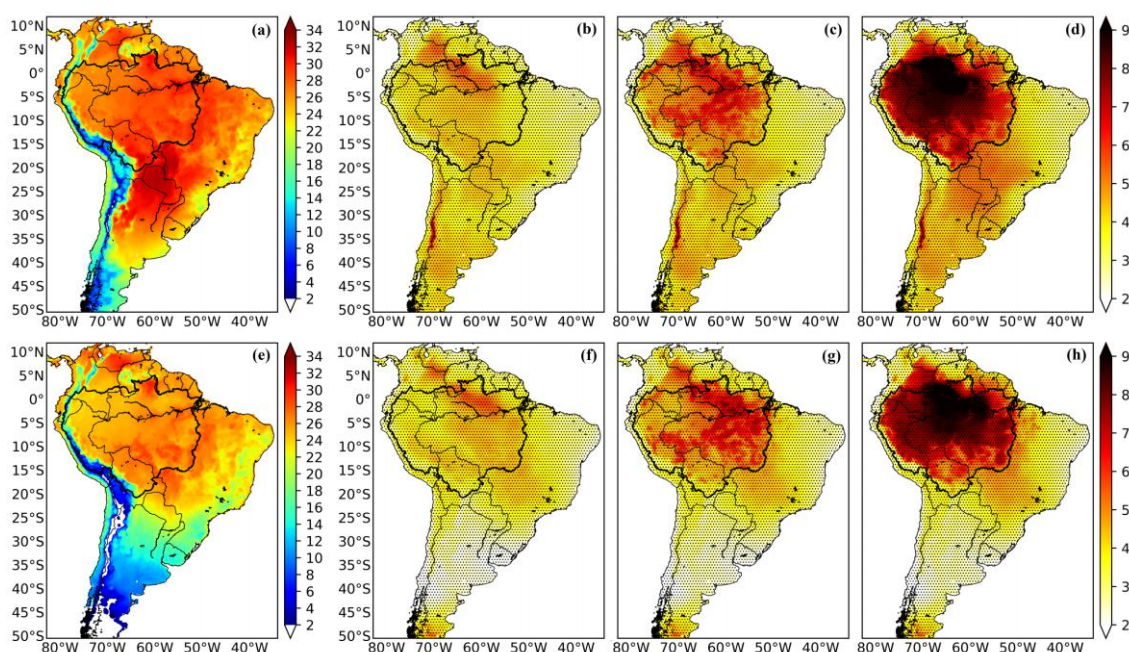


Figura 3. Impactos na temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da temperatura para o cenário CPCD15; (B) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da temperatura para o cenário CPCD15; (F) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na temperatura decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

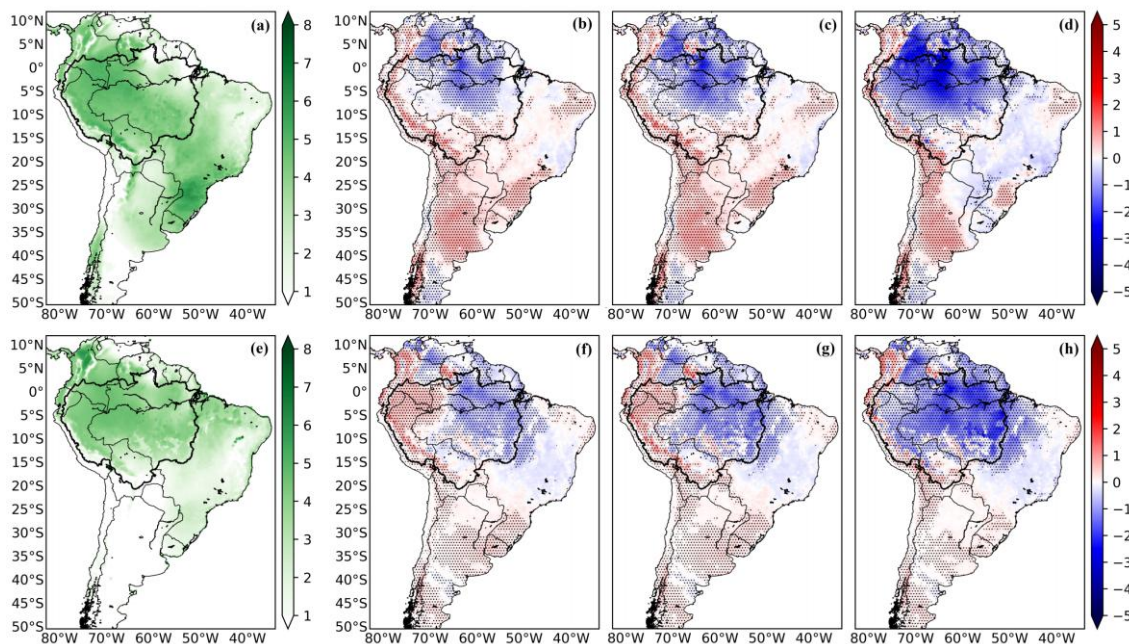


Figura 4. Impactos na evapotranspiração (mm dia^{-1}) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da evapotranspiração para o cenário CPCD15; (B) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da evapotranspiração para o cenário CPCD15; (F) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na evapotranspiração decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

b) Precipitação, Convergência e Fluxo de Umidade

A distribuição média e as mudanças na precipitação, convergência e fluxo de umidade projetadas pelas simulações Eta-BESM-OA, para ambas as estações, são mostradas nas Figura 5 e 6. No clima presente (1979-2005) o padrão da circulação atmosférica sobre o continente durante a estação chuvosa apresenta um regime de intenso fluxo e convergência de umidade na bacia Amazônica e no Brasil Central. Na estação seca, esse regime é enfraquecido, favorecendo um padrão de convergência de umidade posicionada mais ao norte da América do Sul e, desta forma, configurando um regime sazonal de Monção na América do Sul. O modelo Eta-BESM-OA conseguiu representar satisfatoriamente a variação sazonal e espacial do transporte e convergência de umidade

no período de base, apresentando valores positivos (convergência) sobre a bacia Amazônica e negativos (divergência) no Nordeste do Brasil (Figura 6a,e). Para o cenário RCP 8.5 se observam mudanças significativas na convergência de umidade sobre bacia Amazônica com redução de 25% durante a estação úmida; afetando desta forma, o transporte de umidade e a precipitação sobre a região. A redução na precipitação na estação úmida ocorre dentro de uma área que se estende da bacia Amazônica (3.5 mm dia^{-1}) passando pelas regiões central e sul do Brasil (2.5 mm dia^{-1}), regiões onde está localizada a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A precipitação na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) apresentou-se enfraquecida e deslocada ao norte de sua posição climatológica no Atlântico Tropical, o que produziu menos precipitação na bacia Amazônia. As mudanças na precipitação na estação seca apresentaram um padrão de redução no norte, mas aumento no sul da bacia, se estendendo para o centro-sul do Brasil. Ambrizzi *et al.*, (2007), avaliando as mudanças no clima decorrente dos cenários de emissão Special Report on Emission Scenarios (SRES A2) produzidas por três modelos de circulação geral do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP 3), observaram mudanças regionalizadas na precipitação sobre bacia Amazônica, com tendência para condições mais úmidas no norte e noroeste e mais secas no sudeste da bacia. Entretanto, diferente do presente estudo, Guimberteau *et al.*, (2017) observaram uma tendência de aumento médio na precipitação sobre toda a bacia no fim do século XXI. Marengo *et al.*, (2012) encontraram intensa redução na precipitação em grande parte da bacia Amazônica para o final do século XXI ao avaliarem as mudanças no clima utilizando projeções do modelo Eta forçado com o modelo global HadCM3 e cenário SRES A1B. Considerando os cenários de desflorestamentos futuros observou-se uma intensificação das mudanças

e ampliação na área dos impactos sobre o continente sul-americano, principalmente na bacia Amazônica. Esses resultados mostram que as mudanças no clima decorrentes do cenário RCP 8.5 e as mudanças no uso da terra podem afetar a estrutura termodinâmica da atmosfera e, conseqüentemente a circulação regional, produzindo impactos que se estendam além dos limites dos desflorestamentos e, desta forma, afetar regiões distantes da Amazônia (Figura 6c,d). No cenário de 2050 (2100) as reduções significativas na precipitação durante a estação úmida foram observadas sobre toda bacia com valores da ordem de 1.2 mm dia^{-1} (1.7 mm dia^{-1}). Na estação seca as mudanças apresentaram um padrão de redução na porção norte e aumento na porção sul da bacia onde a taxa do desflorestamento é mais intensa – Arco do Desflorestamento. No cenário RCP 8.5 a redução na precipitação foi determinada pela redução na evapotranspiração e convergência de umidade, sendo que a convergência de umidade apresentou papel mais importante nessa redução. Nos cenários (2050 e 2100), a redução na precipitação também foi determinada pela redução na evapotranspiração e convergência de umidade, mas neste caso a redução na evapotranspiração apresentou papel preponderante.

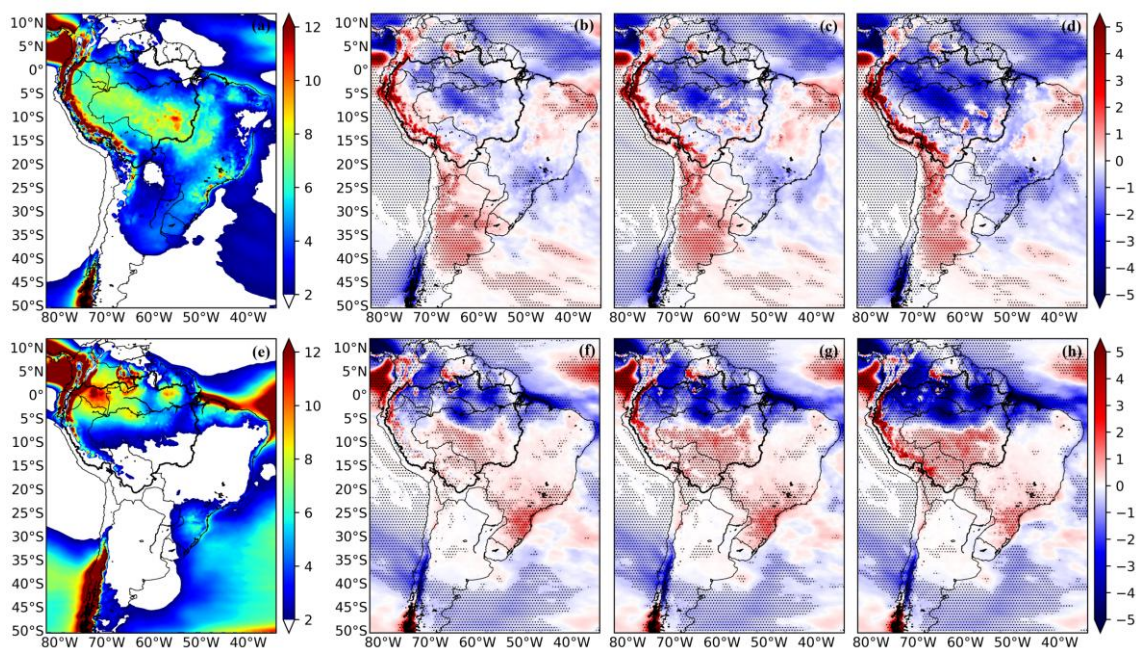


Figura 5. Impactos na precipitação (mm dia^{-1}) decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) para as estações úmida e seca. Verão: (A) Distribuição da precipitação para o cenário CPCD15; (B) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (C) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (D) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD100 em relação ao CPCD15. Inverno: (E) Distribuição da precipitação para o cenário CPCD15; (F) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15; (G) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD50 em relação ao CPCD15; (H) Impactos na precipitação decorrentes do cenário C85CD15 em relação ao CPCD15. As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

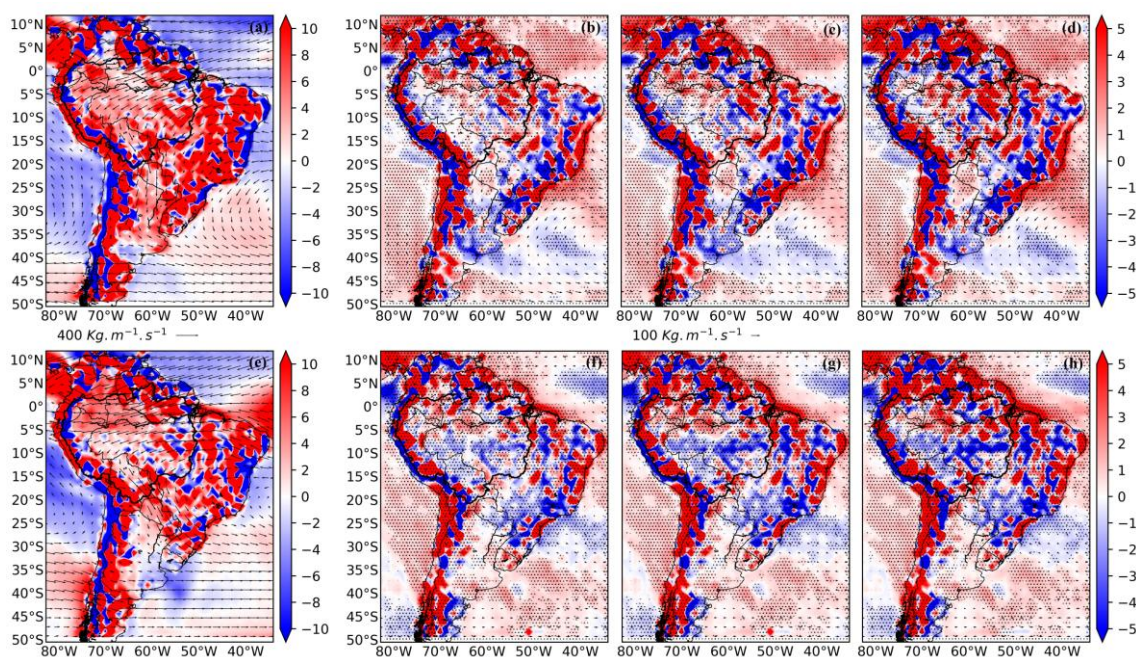


Figura 6. Distribuição média da divergência de umidade (valores positivos sombreados representam convergência, mm dia^{-1}) e Vetor fluxo de umidade (vetores, medidos em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) para o clima presente (1979-2005) e a diferença entre o clima futuro (2071-2100) e o clima presente projetada pelo modelo Eta-

BESM-OA decorrentes dos cenários de mudanças nos usos da terra e cenário de emissão (RCP 8.5) em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (CPCD15); 2 – clima futuro (C85CD15); 3 – clima futuro (C85CD50); 4 – clima futuro (C85CD100). As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

CICLO ANUAL

Quando se avalia os impactos dos cenários de aumento na concentração de GEE's e desflorestamento no clima é importante examinar as mudanças ocorridas durante o ciclo sazonal, uma vez que alterações na sazonalidade podem ter importantes efeitos nos ecossistemas da Amazônia. A Figura 7 mostra o ciclo anual dos componentes do balanço hídrico climatológico (precipitação, evapotranspiração e convergência de umidade) em toda a Amazônia, e para as bacias norte e sul com relação ao período de referência e para o futuro. As características do regime de monção na América do Sul e o deslocamento norte-sul da ZCIT ao longo do ano podem ser claramente observados por meio da intensa variação sazonal dos componentes do balanço de água na porção sul em relação à porção norte da bacia. O ciclo sazonal da precipitação simulada nesse estudo foi similar ao encontrado por Chou *et al.*, (2014) quando avaliaram o desempenho do modelo regional Eta forçado por três modelos de circulação geral da atmosfera (HadGEM2-ES, BESM e MIROC5) para o clima presente. Os autores encontram um pronunciado ciclo anual na precipitação nos dados simulado e observado. Na projeção do clima futuro (RCP 8.5), a redução na precipitação foi mais intensa na porção centro-sul da bacia e durante a estação chuvosa com redução da ordem de 10%. Essa redução na precipitação foi fortemente determinada pela redução na convergência de umidade (11%), pois a evapotranspiração apresentou pouca variação nessa estação. Com os cenários de desflorestamentos futuros observou-se uma intensificação nas reduções da precipitação durante a estação úmida no centro-sul da bacia Amazônica. No

cenário de 2050 e 2100 as reduções na precipitação durante a estação úmida foram de 13% e 23%, respectivamente. As reduções na convergência de umidade, que determinaram essas mudanças na precipitação, foram de 10% e 18% para os cenários 2050 e 2100, respectivamente. Durante a estação seca se observou comportamento diferente nos cenários de desflorestamentos futuro; no qual, mesmo com a redução significativa na evapotranspiração (24% para 2050 e 33% para 2100), a precipitação apresentou pequeno aumento decorrente da intensificação na convergência de umidade. As reduções decorrentes da evapotranspiração nos cenários de desflorestamentos e da precipitação no período chuvoso atuaram para amplificar o estresse na umidade do solo, alterando o particionamento de energia e, conseqüentemente a temperatura da superfície (Figura 3).

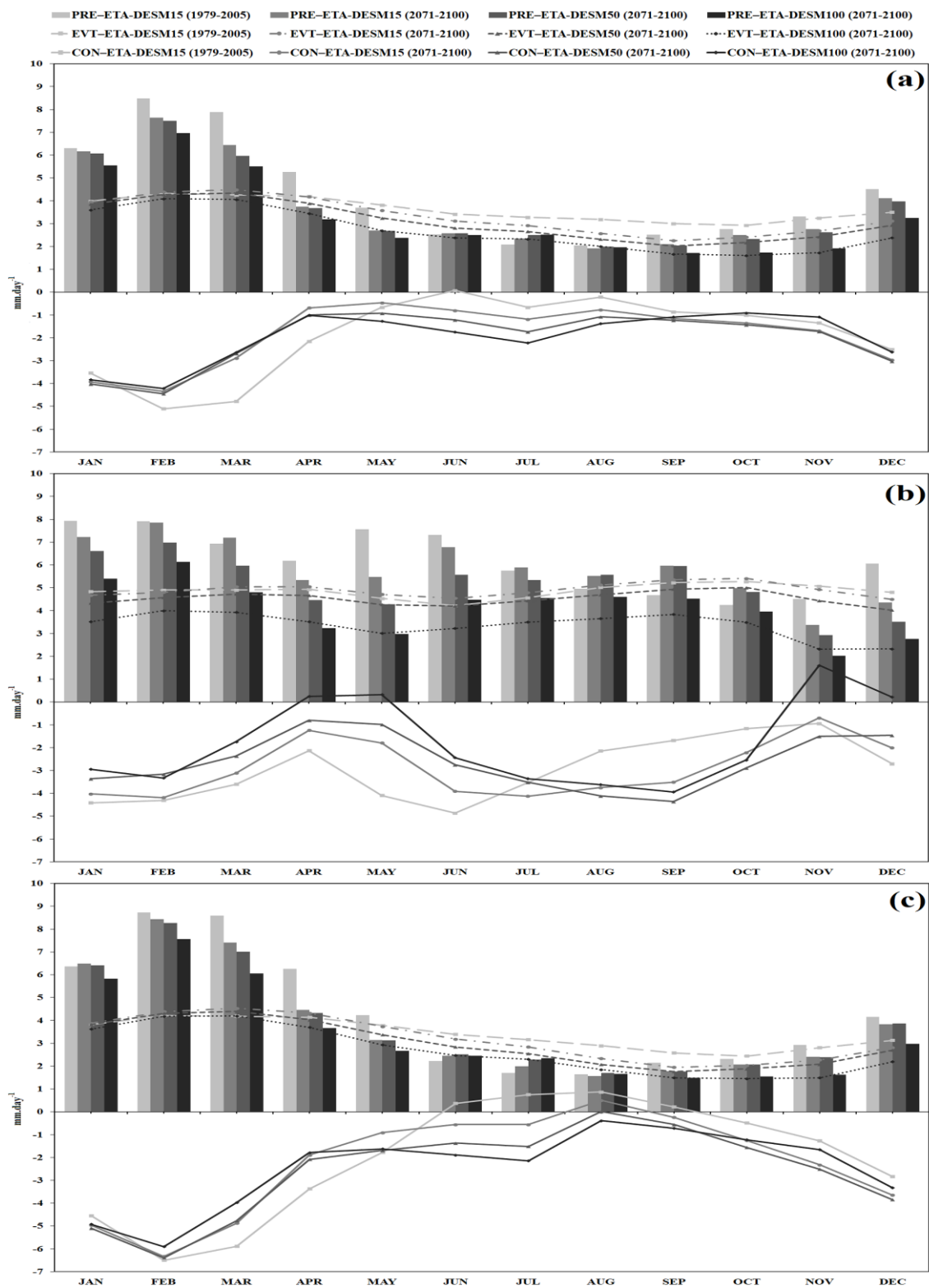


Figura 7. Média mensal do ciclo anual dos componentes do balanço de água simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5 e cenários de desflorestamento para 2015, 2050 e 2100. (a) Bacia Amazônica; (b) Amazônia Setentrional; (c) Amazônia Meridional: Precipitação (PRE, mm dia⁻¹); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹); Convergência de umidade (-CON convergência e +CON divergência, mm dia⁻¹).

BALANÇO DE ÁGUA PARA BACIA AMAZÔNICA

As futuras mudanças projetadas dos componentes do orçamento de água em relação à climatologia do período de referência (1979-2005), para a bacia Amazônica, norte e sul da Amazônia, são mostradas na Tabela 2. Na bacia a precipitação simulada pelo Eta-BESM-OA é sempre maior que a evapotranspiração caracterizando a região como sumidouro de umidade da atmosfera. Esse resultado mostra que o modelo regional conseguiu capturar a característica de sumidouro de umidade na bacia Amazônica. Esse comportamento de sumidouro corrobora com os resultados de Marengo (2005) quando avaliado o balanço hídrico da bacia do rio Amazonas em condições neutras e em extremos de variabilidades climáticas como episódios de El Niño e La Niña. Para as projeções futuras se observa que os impactos no ciclo da água sobre toda a bacia são intensificados na inclusão dos desflorestamentos na Amazônia. No cenário RCP 8.5, o modelo simulou reduções de 11% na precipitação, 6% na evapotranspiração, 9% convergência de umidade e de 34% no runoff na média anual. Esses resultados indicam que aumento do GEE's pode modificar a estrutura termodinâmica da atmosfera conduzindo a mudanças na circulação atmosférica em escala regional e, conseqüentemente, no transporte e convergência de umidade, e finalmente, alterando o regime de precipitação sobre a região. Nesse caso, observa-se que a redução na evapotranspiração e convergência de umidade agiram no mesmo sentido para redução na precipitação, com a convergência de umidade apresentando papel mais preponderante. Esses resultados sugerem a predominância do Mecanismo de Retroalimentação Positivo (MRP) na Amazônia conforme descrito por Pitman (2003). O MRP é preocupante, pois pode conduzir a uma instabilidade nos ecossistemas naturais da Amazônia, uma vez que, os mesmos não apresentam grande capacidade de

adaptação às mudanças no clima, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo (décadas). Com os cenários de desflorestamento para 2050 e 2100, se observou redução de 13% e 19% na precipitação, 12% e 20% na evapotranspiração, respectivamente. Entretanto, na média anual sobre a bacia se observa pequeno aumento na convergência de umidade nos cenários de 2050 e 2100. Diferente do cenário RCP 8.5, predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo com a inclusão dos desflorestamentos, no qual, a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na convergência de umidade sobre a região. Apesar das mudanças na circulação regional, e conseqüentemente no transporte e convergência de umidade, os efeitos da redução na evapotranspiração nos cenários de desflorestamento foram mais significativos para redução na precipitação para o fim do século XXI na bacia Amazônica.

Tabela 2: Mudanças médias anuais (em %) e tendências (mm dia⁻¹) dos componentes do balanço de água – Temperatura (TP2m, °C), precipitação (PRE, mm dia⁻¹), evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹), convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) e escoamento superficial (RUN, mm dia⁻¹) projetadas pelo modelo Eta-BESM-OA para os três experimentos de clima futuro (C85CD15, C85CD50 e C85CD100), em relação ao clima presente (CPCD15), na bacia Amazônica, Amazônia setentrional e Amazônia meridional.

Region	Annual		Annual		Annual	
	Change (%)	Trend	Change (%)	Trend	Change (%)	Trend
	C85CD15		C85CD50		C85CD100	
All Basin						
TP2m	4.1°C	0.0107	5.0°C	0.0129	6.4°C	0.0159
PRE	-11.3	-0.0015	-12.9	-0.0017	-19.4	-0.0024
EVT	-6.1	-0.0008	-11.6	-0.0013	-20.4	-0.0021
CON	-9.5	-0.0002	0.1	0.0006	4.3	0.0007
RUN	-34.3	-0.0007	-58.9	-0.0004	-57.6	-0.0003
Northern Basin						
TP2m	4.0°C	0.0098	4.8°C	0.0117	8.5°C	0.0198
PRE	0.2	-0.0009	-10.1	-0.0025	-27.0	-0.0046
EVT	2.0	0.0009	-5.3	-0.0009	-24.5	-0.0033
CON	4.3	0.0005	-8.5	-0.0015	-20.8	-0.0029
RUN	-5.1	-0.0010	-24.5	-0.0016	-34.5	-0.0012
Southern Basin						
TP2m	3.9°C	0.0102	4.8°C	0.0124	5.9°C	0.0146
PRE	-8.1	-0.0013	-9.0	-0.0014	-17.5	-0.0023
EVT	-3.3	-0.0006	-9.2	-0.001	-16.2	-0.0017
CON	-11.4	-0.0002	-3.2	-0.0009	-3.4	-0.0009
RUN	-22.9	-0.0008	-8.3	-0.0004	-21.7	-0.0006

CONCLUSÕES

No presente estudo, o modelo regional Eta, forçado com o modelo BESM-OA, foi utilizado para geração de simulações de mudanças climáticas a partir do cenário de emissão RCP 8.5 do Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report - (AR5-IPCC) e de desflorestamento futuro na Amazônia. O objetivo desse estudo foi avaliar os impactos do aumento das emissões dos gases do efeito estufa projetado para o fim do século XXI e as mudanças futuras no uso e cobertura da terra nos componentes do balanço de água na bacia Amazônica. No clima presente, o modelo regional Eta-BESM-OA conseguiu representar a característica de sumidouro de umidade apresentando taxa de precipitação maior que a evapotranspiração na bacia. No cenário RCP 8.5, modelo Eta-BESM-OA apresentou sensibilidade sobre toda a América do Sul, apresentando aumento mais significativo sobre as porções central e norte da bacia Amazônica (4-5°C). No cenário de emissão RCP 8.5 para o fim do século XXI, predominou o Mecanismo de Retroalimentação Positivo (MRP), no qual a redução na evapotranspiração e convergência de umidade agiram no mesmo sentido para redução na precipitação sobre a bacia Amazônica. As mudanças na temperatura e nos componentes do balanço de água foram intensificadas com a inclusão dos desflorestamentos futuros, mostrando que o aumento dos GEE's e as mudanças no uso da terra contribuem sinergicamente para afetar o balanço de energia e água sobre a bacia Amazônica. Com os cenários de desflorestamento, predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo (MRN), pois a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na convergência de umidade sobre a região. As mudanças no balanço de água na Amazônia devido à fatores antropogênicos se caracterizam um cenário preocupante, pois podem desencadear

alterações significativas nos ecossistemas naturais da Amazônia, já que os mesmos não apresentam grande capacidade de adaptação à magnitude das mudanças no clima, sobretudo se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que, se o desenvolvimento sustentável e as políticas de conservação não agirem no sentido de deter o aumento da degradação ambiental na Amazônia e o aumento global das emissões dos gases do efeito estufa, as mudanças no balanço de água podem conduzir o sistema clima-bioma a um novo estado de equilíbrio, no qual um tipo diferente de vegetação (provavelmente cerrado) se adaptaria às novas condições climáticas estabelecidas na bacia Amazônica.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). O primeiro autor agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo.

CAPÍTULO 3

Gomes, W.B.; Correia, F.W.S. 2018. Avaliação dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra e do cenário de emissões (RCP 8.5) no balanço de água na bacia do rio Madeira. Manuscrito em preparação para *Acta Amazonica*.

Assessments of the impacts of land use and cover change and emission scenarios (RCP 8.5) in the water budget in the Madeira River basin.

ABSTRACT:

In this work evaluated the impacts of increased GHGs (RCP 8.5 scenario) and future deforestations on the water cycle in the Madeira River basin, using the Eta Regional Model and MGB-IPH Large-scale Hydrological Model forced by Brazilian Model of the Terrestrial System (BESM-AO 2.5). In the RCP 8.5 scenario, the model presented sensitivity over the entire Madeira basin, with a temperature increase of 4.0°C. The increase was intensified with deforestation scenarios of 2050 (4.8°C) and 2100 (6.2°C). In the deforestation scenarios, the Negative Feedback Mechanism (NFM) was predominant, because although there were reductions in precipitation and evapotranspiration, the convergence of humidity presented increase in all scenarios. Regarding the hydrological processes, it was observed an increase of the discharges in most stations for all future scenarios RCP8.5 and deforestation. The increase in precipitation in the dry season explains in part the increase the discharges and flood area in the Madeira basin. The increase upstream precipitation and the changes in soil parameters associated with the changes in land use contributed to the increase of the flood area over the Madeira basin. These changes can have negative effects on the environment, on water resources and on the main sectors of the economy, affecting directly the communities living on the river banks, especially the vulnerable populations of the Madeira basin.

KEYWORDS: Madeira River, hydrological model, Flow, Flood area.

Avaliação dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra e do cenário de emissões (RCP 8.5) no balanço de água na bacia do rio Madeira.

RESUMO:

Nesse estudo avaliou-se os impactos do aumento dos GEE's (cenário RCP 8.5) e dos desflorestamentos no ciclo da água na bacia do rio Madeira, utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5). No cenário RCP 8.5, o modelo apresentou sensibilidade sobre toda a bacia do Madeira, com aumento da ordem de 4.0°C na temperatura. O aumento foi intensificado com os cenários de desflorestamentos de 2050 (4.8°C) e 2100 (6.2°C). Nos cenários de desflorestamento predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo, pois embora haja reduções na precipitação e evapotranspiração, a convergência de umidade aumentou em todos os cenários. Observou-se aumento das descargas na maioria das estações para todos os cenários futuros RCP 8.5 e desflorestamento. O aumento da precipitação na estação seca explicou em parte o aumento das vazões e na área de inundação sobre a bacia do Madeira. O aumento na precipitação à montante da bacia e a mudança nos parâmetros do solo, associada às alterações no uso da terra, contribuíram para o aumento da vazão e área de inundação sobre a bacia do Madeira. As alterações nas descargas e na área de inundação podem ter efeitos negativos, com prejuízos e danos ao meio ambiente, nos recursos hídricos, nos principais setores da economia, afetando de forma direta as comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da bacia do Madeira.

Palavras-Chaves: Rio Madeira, modelo hidrológico, Vazão, Área de inundação.

INTRODUÇÃO

A mais extensa bacia hidrográfica do planeta está localizada na região Amazônica. Com uma área de mais de 6 milhões de km², está presente em vários países da América do Sul estendendo-se desde os sopés andinos até o Oceano Atlântico (Eva e Huber, 2005; Filizola *et al.*, 2002). O rio Amazonas apresenta uma área de drenagem com cerca de um terço do continente Sul-Americano e uma vazão média de 209.000 m³ s⁻¹, contribuindo com aproximadamente 15% do volume de água doce afluente aos oceanos (Molinier *et al.*, 1996). Um dos principais afluentes da margem direita do Amazonas é o rio Madeira. Abrangendo 23% da bacia Amazônica e presente em diferentes países Sul-Americano (Bolívia, Brasil e Peru), a bacia do rio Madeira desempenha papel fundamental no desenvolvimento social e econômico da região através da navegação, irrigação de cultivos agrícolas e a geração de energia elétrica por meio das usinas de Jirau e Santo Antônio (Siqueira *et al.*, 2015). No entanto, a bacia Amazônica, e principalmente a bacia do Madeira, são sensíveis às variabilidades e mudanças no sistema climático terrestre, devido tanto às variações naturais quanto às antropogênicas decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa pela queima de combustíveis fósseis (GEE's) e os desflorestamentos (Espinoza *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Marengo e Espinoza, 2016; Sorribas *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2017). A taxa média anual do desflorestamento na Amazônia é da ordem de 14.300 km² com um total acumulado de 428.720 km² no período de 1988-2017, correspondendo a aproximadamente a 16% da floresta Amazônica brasileira (INPE, 2017). A bacia do rio Madeira tem experimentado intenso desflorestamento com a conversão de floresta em área agrícolas e ou pastagem para criação de gado (Trancoso *et al.*, 2009). Somente nos estados localizados na área hidrográfica da bacia do rio Madeira o desflorestamento acumulado foi de

aproximadamente 230.000 km², representando 53% do total de desflorestamento na Amazônia (INPE, 2017). Essas mudanças no uso e cobertura da terra tem alimentado o interesse científico sobre os potenciais impactos que essas mudanças possam gerar no ciclo hidrológico da bacia Amazônica. Diferentes estudos têm mostrado que os desflorestamentos na região tropical podem conduzir a impacto significativo do clima, com aumento de temperatura da superfície e mudanças regionalizadas no regime hidrológico (Sampaio *et al.*, 2007; Alves *et al.*, 2017; Silveira *et al.*, 2017). Além disso, nos últimos anos a variabilidade no clima tem afetado os principais rios da bacia Amazônica. O aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas e enchentes produziram prejuízos e danos no meio-ambiente, nos recursos hídricos, na economia e nas cidades e comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da Amazônia (Espinoza *et al.*, 2014; Doughty *et al.*, 2015; Marengo e Espinoza, 2016). Eventos de enchentes e precipitações extremas tem afetado a bacia do rio Madeira recentemente (verão 2013-14), trazendo transtornos e prejuízos para população, tais como: famílias desabrigadas, interdição de estradas, isolamentos de comunidades, prejuízos na agricultura e transporte (Marengo e Espinoza, 2016). Os cenários de mudanças no clima previstos pelos modelos climáticos, utilizando cenários de emissões do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), indicam reduções no regime de precipitação e aumento na frequência de eventos extremos na maior parte da Amazônia ocidental (Marengo *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2012; Chou *et al.*, 2014; Siqueira *et al.*, 2015; Sorribas *et al.*, 2016). Avaliando as projeções de mudanças no clima de cinco modelos climáticos globais do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima (AR5-IPCC), Sorribas *et al.* (2016) observaram condições mais úmidas (secas) sobre o oeste (leste) da bacia Amazônica no

fim do século XXI. Siqueira *et al.*, (2015) também avaliando as projeções do clima futuro e as mudanças na cobertura vegetal na Amazônia, observaram que os efeitos das mudanças no clima sobre o regime hidrológico foram reduzidos com a conversão da floresta para pastagem. Entretanto, ambos os trabalhos mostraram incertezas devido à variabilidade dos resultados entre os modelos globais utilizados. Diante das alterações no uso e cobertura da terra na Amazônia e os efeitos das mudanças climáticas globais, uma questão importante levantada na comunidade científica é: “*De que maneira o aumento dos GEE’s e as mudanças no uso da terra podem modificar o balanço de água na bacia do rio Madeira?*”. Visando responder esta pergunta, esse estudo tem por objetivo avaliar os impactos do aumento dos GEE’s e dos desflorestamentos no ciclo da água na bacia do rio Madeira utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), cenário de emissões do AR5-IPCC RCP 8.5 e também cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação dos efeitos antropogênicos (aumento dos GEE’s e desflorestamento) no ramo atmosférico do balanço de água na bacia do rio Madeira realizaram-se simulações numéricas para o clima presente (1960 – 2005) e projeções climáticas futuras (2071 a 2100) com diferentes cenários de desflorestamento na Amazônia. Para isso utilizou-se o Modelo Regional Eta (área limitada), forçado com as condições iniciais e de contorno provenientes do modelo de circulação geral Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5) por meio do processo de *downscaling* dinâmico. Daqui por diante a simulação de *downscaling* será referida por Eta-BESM-

OA. Para avaliação dos impactos no ramo terrestre do balanço de água (vazão e área de inundação) o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) foi forçado com as condições climáticas do Modelo Regional Eta.

Área de Estudo

A bacia do rio Madeira possui uma área de drenagem de aproximadamente 1.4 milhão de Km², da qual 51% pertencem à Bolívia, 42% ao Brasil e 7% ao Peru (Ribeiro Neto, 2006) (Figura 1). Apresenta uma vazão média de aproximadamente de 31.704 m³ s⁻¹, que corresponde a 15% da descarga média do Rio Amazonas na sua foz (Siqueira *et al.*, 2015). A precipitação média na bacia é da ordem de 1834 mm ano⁻¹ (Molinier *et al.*, 1996), com uma forte variabilidade espacial variando de 255 mm ano⁻¹ na estação de Caracato (2650 m) nos Andes boliviano a mais de 3000 mm ano⁻¹ em estações localizadas a menos que 1500 m de altitude (Espinoza Villar, 2009).

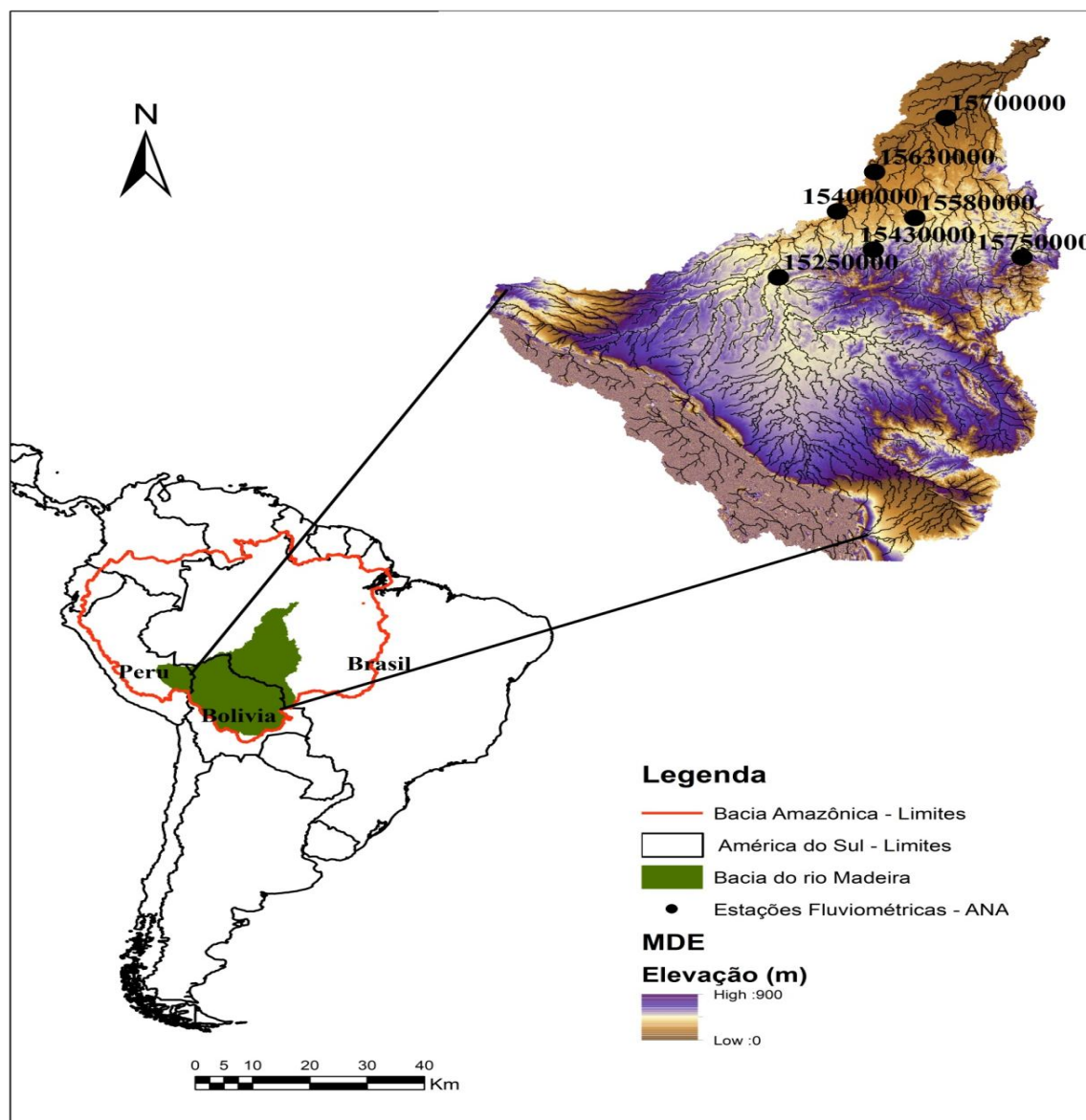


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Madeira. Destacam-se também o modelo digital de elevação (MDE) e as estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) selecionadas para avaliação do modelo MGB-IPH: Guajará-Mirim (15250000), Porto Velho (15400000), Ariquemes (15430000), Tabajara (15580000), Humaitá (15630000) e Manicoré (15700000).

Dados

Para avaliação do desempenho do modelo regional Eta-BESM-OA na representação da precipitação do clima presente na bacia do rio Madeira foi utilizado as reanálises do Era-Interim (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF), com resolução espacial de $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (Dee *et al.*, 2011). A avaliação foi realizada para o período de 1979 a 2005. Para a avaliação do desempenho do modelo MGB-IPH

utilizaram-se as medições de vazão das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA), disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb – <http://hidroweb.ana.gov.br>) para o período de 1995 e 2005. As estações utilizadas nesse estudo são apresentadas na Figura 1 e Tabela 1.

Tabela 1 – Estações fluviométricas da Agência Nacional de Aguas (ANA) e áreas de drenagem correspondente.

Nº	Código	Nome	A (Km ²)	Lat	Lon
1	15250000	Guajará-Mirim	589497	-10.79342	-65.34815
2	15400000	Porto Velho	954285	-8.74824	-63.91860
3	15430000	Ariquemes	7795	-9.92719	-63.06009
4	15580000	Tabajara	60212	-8.93161	-62.05573
5	15630000	Humaitá	1066240	-7.50205	-63.01475
6	15700000	Manicoré	1157516	-5.81473	-61.30596

Cenários de Emissão e Desflorestamento

Neste estudo foram utilizados três cenários de desflorestamento para a bacia do rio Madeira: a) mapa atual de vegetação referente ao ano base de 2015; b) cenário projetado para 2050 e c) cenário projetado para 2100 (Figura 2). O mapa de uso e cobertura da terra elaborado pelo Projeto ProVeg (Sestini *et al.*, 2002) e dados do Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia - PRODES-DIGITAL (INPE, 2017) com as cenas de desflorestamento para o ano de 2015 foram utilizados no mapa atual de vegetação. Os cenários de desflorestamentos futuros para os anos de 2050 e 2100 foram elaborados a partir do modelo de dinâmica denominado DINAMICA da paisagem (Soares-Filho *et al.*, 2004). O bioma pastagem degradada representou o desflorestamento na bacia Amazônica. Também neste estudo considerou-se o cenário de emissão baseado no Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP 8.5) do IPCC AR5(2013).

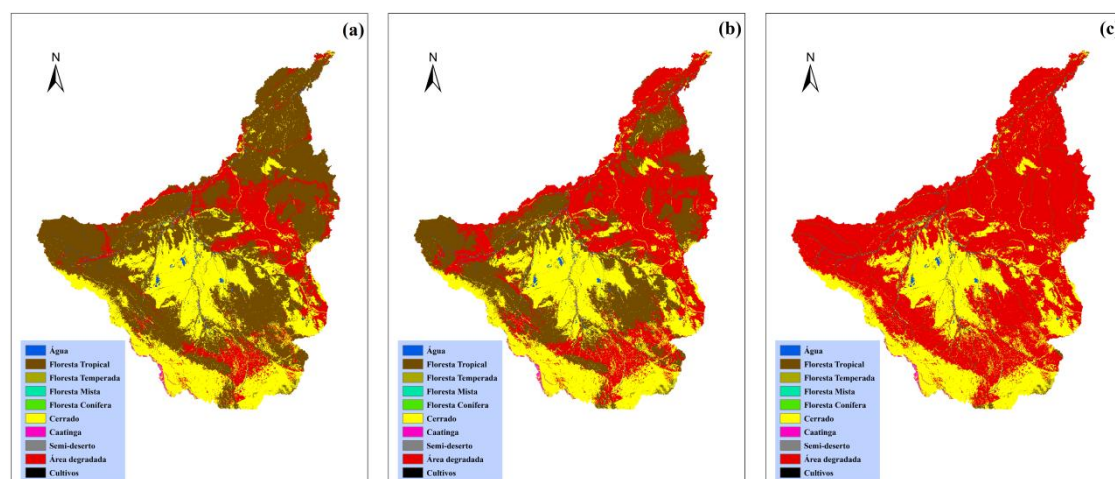


Figura 2 – Cenários de cobertura vegetal para bacia do rio Madeira utilizados nas simulações do modelo regional Eta-BESM_OA e no modelo hidrológico MGB-IPH. (a) Mapa de vegetação elaborado pelo Projeto ProVeg com áreas desflorestadas para o ano base 2015; (b) Cenário projetado para o ano de 2050 e c) Cenário projetado para o ano de 2100 a partir do modelo de vegetação DINAMICA

Descrição dos Modelos e Estratégia de Integração Numérica

O modelo regional Eta do Centro de Previsão do Tempo e Estudo Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) foi utilizado na geração do clima presente e projeções futuras (Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b). A dinâmica do modelo regional é desenvolvida na coordenada vertical eta (Mesinger, 1984), útil para operar em regiões de orografia íngremes, como a Cordilheira dos Andes, na América do Sul. A precipitação é calculada pelo esquema de parametrização de cumulus de Betts-Miller-Janjic (Janjic 1994) e pelo esquema de microfísica da nuvem Zhao (Zhao *et al.*, 1997). Os esquemas de radiação são do GFDL para ondas curtas Lacis e Hansen (1974) e longas Fels e Schwarzkopf (1975). Os processos de superfície são representados pelo NOAH (Ek *et al.*, 2003), que contém 4 camadas de solo para a temperatura e umidade, assim como 12 tipos de vegetação e 7 tipos de textura de solo. O mapa da vegetação revisado inclui o arco do desmatamento na Amazônia (Sestini *et al.* 2002). Neste estudo o modelo foi configurado com resolução de 20 km na horizontal e 38 níveis na vertical.

O Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 - BESM-OA 2.5 (Nobre *et al.*, 2013) é um modelo espectral Euleriano com truncamento T62 e 28 níveis na atmosfera. Este modelo é constituído pelo modelo de circulação geral da atmosfera (AGCM) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE (Figuerola *et al.*, 2016) acoplado ao modelo de circulação geral oceânico (OGCM) - Modelo Oceânico Modular versão 4p1 (MOM4p1) do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate via GFDL's Flexible Modular System (Griffies, 2009). As parametrizações físicas incluem o modelo de superfície Simplified Simple Biosphere Model – SSiB (Xue *et al.*, 1991), o esquema de turbulência na camada limite planetária de Mellor-Yamada 2.0 (Mellor e Yamada, 1982), o esquema de convecção profunda de Grell e Devenyi (2002) e a parametrização de convecção rasa de Tiedtke (1984).

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB-IPH (Collischon, 2001; Collischon *et al.*, 2007) é um modelo distribuído desenvolvido para aplicações em grandes bacias hidrográficas com limitação de dados (10.000 km^2). O MGB-IPH é um modelo baseado em processos que simula o ciclo hidrológico através de relações físicas e conceituais. São simuladas todas as etapas do ciclo hidrológico terrestre, incluindo balanço de água no solo, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo e escoamento na rede de drenagem. A versão do MGB-IPH aplicado neste estudo utiliza o modelo de propagação inercial ou hidrodinâmico descrito por Tucci (2005). O modelo inercial é fundamentado nas equações da continuidade e dinâmica de Saint Venant no qual permite simular rede de canais com confluências e difluências, vazão, nível d'água (cota) e extensão das áreas inundadas ao longo da bacia (Paiva *et al.*, 2011 e 2013). A maioria dos parâmetros do modelo hidrológico é relacionada às características físicas da bacia, como topografia, cobertura vegetal e solo (Figura 2), que

são obtidas via imagens de satélites, mapas digitalizados e modelo digital de elevação MDE (Getirana *et al.*, 2010; Pereira, 2010). Os demais parâmetros são calibrados com algoritmo de otimização global multi-objetivo MOCOM-UA (Yapo *et al.*, 1998).

Neste estudo foram realizados quatro experimentos numéricos. No primeiro experimento incluiu-se o mapa atual de vegetação com desflorestamento para o ano de 2015 e o clima presente proveniente do Eta-BESM-OA. Esse experimento consistiu-se de uma integração contínua de 46 anos inicializada às 00h (TMG - Tempo Médio de Greenwich) de 01 de Janeiro de 1960. A concentração de dióxido de carbono (CO₂) permaneceu constante em 330 *ppm* durante a integração. Nos experimentos de clima futuro utilizaram-se as projeções de emissões RCP 8.5 produzidas Eta-BESM-OA 2.5 e o mapa de vegetação de 2015 e cenários de desflorestamento para os anos 2050 e 2100. No clima futuro, as integrações foram realizadas de forma contínua para o período de 2071 a 2100 (31 anos), considerando um tempo de equilíbrio de um ano. Os limites laterais são atualizados com as variáveis de estado do modelo BESM-OA 2.5 a cada intervalo de 6 horas. O modelo atualiza a concentração equivalente de CO₂ a cada 3 anos. O verde da vegetação varia mensalmente, mas o mesmo tipo de vegetação é mantido durante o período de integração. A temperatura da superfície do mar (TSM), a umidade inicial do solo e a temperatura do solo são obtidas do BESM-OA 2.5 com TSM atualizado diariamente no modelo regional Eta.

Remoção do Viés

As simulações de precipitação provenientes do modelo Eta-BESM-OA foram utilizadas para forçar o modelo MGB-IPH no clima presente e nas projeções futuras. Entretanto, devido ao erro sistemático presente nos modelos climáticos realizou-se o processo de

correção do viés conforme recomendado na literatura (Silva e Collischonn, 2006). Os métodos de correção dos erros sistemáticos mais empregados são baseados numa transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação (Hay *et al.* (2002) e Wood *et al.* (2002). No presente estudo, para correção dos erros sistemáticos do modelo regional Eta-BESM-OA se utilizou a função de distribuição de probabilidade normal tipo *t* de Student (Spiegel, 1972), aplicada aos valores médios diários de precipitação observada (Era-Interim) e modelada (Eta-BESM-OA). Para avaliação do desempenho das descargas (vazões) simuladas com a precipitação corrigida do modelo Eta-BESM-OA utilizou-se as métricas estatísticas: coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), o coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores logarítmicos das vazões (ENSLog) e o erro do volume relativo (ΔV em %).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RAMO ATMOSFÉRICO DO BALANÇO DE ÁGUA

As médias para o clima presente e as mudanças na temperatura a 2-m (T), precipitação (P), evapotranspiração (E) e convergência de umidade (C), projetadas para o final do século XXI, nas estações chuvosa (DJF) e seca (JJA), são mostradas nas figuras 3 e 4, respectivamente. No clima presente, observa-se pequena variação de temperatura sobre a bacia do Madeira. Isso se deve a intensa disponibilidade de energia solar durante o ciclo anual nessa região. Entretanto, na estação seca (JJA) se observou valor mais baixo de temperatura principalmente na porção sul da bacia. Em ambas as estações observa-se mudanças na temperatura 2-m no cenário RCP 8.5 com aumento médio de 4.0°C sobre a bacia do Madeira. Esse aumento de temperatura é devido às mudanças na

disponibilidade de energia à superfície, aumento no fluxo de calor sensível e a redução na umidade solo (não mostrado). As mudanças na temperatura de 2-m tornam-se mais intensas nos cenários de desflorestamentos na bacia. No cenário de 2050 (2100) o aumento médio na estação úmida foi de 5°C (6.5°C). Na estação seca o aumento foi 4.7°C (5.9°C) no cenário 2050 (2100). Em termos regional, esses aumentos foram mais intensos nas porções central e norte da bacia onde as taxas de desflorestamento são maiores em ambos cenários. Nessas regiões, o aumento na temperatura foi decorrente do aumento do fluxo de calor sensível, da redução na evapotranspiração (Figura 3k,l e Figura 4k,l) e do comprimento de rugosidade. As reduções na evapotranspiração foram da ordem de 3%, 7% e 14% em todos os cenários RCP 8.5 e de desflorestamento, apresentando mudanças mais significativas na estação seca e no cenário de 2100 (redução de 22%). O aumento dos gases do efeito estufa (GEE) e os desflorestamentos contribuíram para alterar o clima na bacia do Madeira, e as mudanças no clima tornaram-se mais intensas à medida que se expandiu o desflorestamento na bacia do Madeira.

Para o cenário RCP 8.5, as mudanças na precipitação apresentaram padrão diferenciado entre as estações seca e úmida. Com exceção dos Andes, na estação úmida observa-se redução na precipitação sobre toda a bacia, principalmente a jusante onde as mudanças são mais intensas (Figura 3f). Na estação seca, predominou-se o aumento da precipitação na maior parte da bacia, mas no norte a precipitação foi reduzida. Na média da bacia, a precipitação reduziu 6.8% na estação úmida, mas aumentou 5.3% na seca.

Nos cenários de desflorestamentos futuros se observou uma intensificação nos padrões de redução e aumento na precipitação sobre a bacia do Madeira. Em ambas as estações predominou a redução na precipitação na foz do rio Madeira, nas demais porções da

bacia, redução e aumento nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Na média, a precipitação reduziu 7.3% (11%) no cenário 2050 (2100) na estação úmida, conforme mostrado na figura 5. A redução na precipitação nestes cenários foi fortemente influenciada pela redução na evapotranspiração, pois a convergência de umidade aumentou nesse período. De forma contrária, na estação seca a precipitação aumentou em 10% (19%) no cenário 2050 (2100). Neste caso, o aumento na precipitação deve-se ao aumento na convergência de umidade, uma vez que, a evapotranspiração apresentou reduções de 12% e 22% nos cenários 2050 e 2100, respectivamente (Figura 5). Na avaliação do balanço anual de água sobre a bacia do rio Madeira, observa-se que a precipitação simulada pelo modelo regional Eta-BESM-OA é sempre maior que a evapotranspiração caracterizando a bacia com região de sumidouro de umidade da atmosfera. Para as projeções do cenário de emissão RCP 8.5 e desflorestamento futuros se observa que os impactos no ciclo da água sobre a bacia são intensificados na inclusão dos desflorestamentos na Amazônia. No cenário RCP 8.5, o modelo simulou reduções de 4.3% na precipitação, 2% na evapotranspiração e aumento de 24% na convergência de umidade na média anual. Nesse caso, observa-se que a evapotranspiração e convergência de umidade agiram em sentidos contrários na redução na precipitação, com a evapotranspiração apresentando papel mais preponderante. Com os cenários de desflorestamento para 2050 e 2100, se observou redução de 4.6% e 5.9% na precipitação, 5% e 16% na evapotranspiração, respectivamente. Entretanto, na média anual sobre a bacia se observou aumento na convergência de umidade em ambos cenários. Neste caso, predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo (MRN) com a inclusão dos desflorestamentos, no qual, a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na

convergência de umidade sobre a bacia. Apesar das mudanças no transporte e convergência de umidade, os efeitos da redução na evapotranspiração nos cenários de desflorestamento foram mais significativos para redução na precipitação no o fim do século XXI sobre a bacia do rio Madeira.

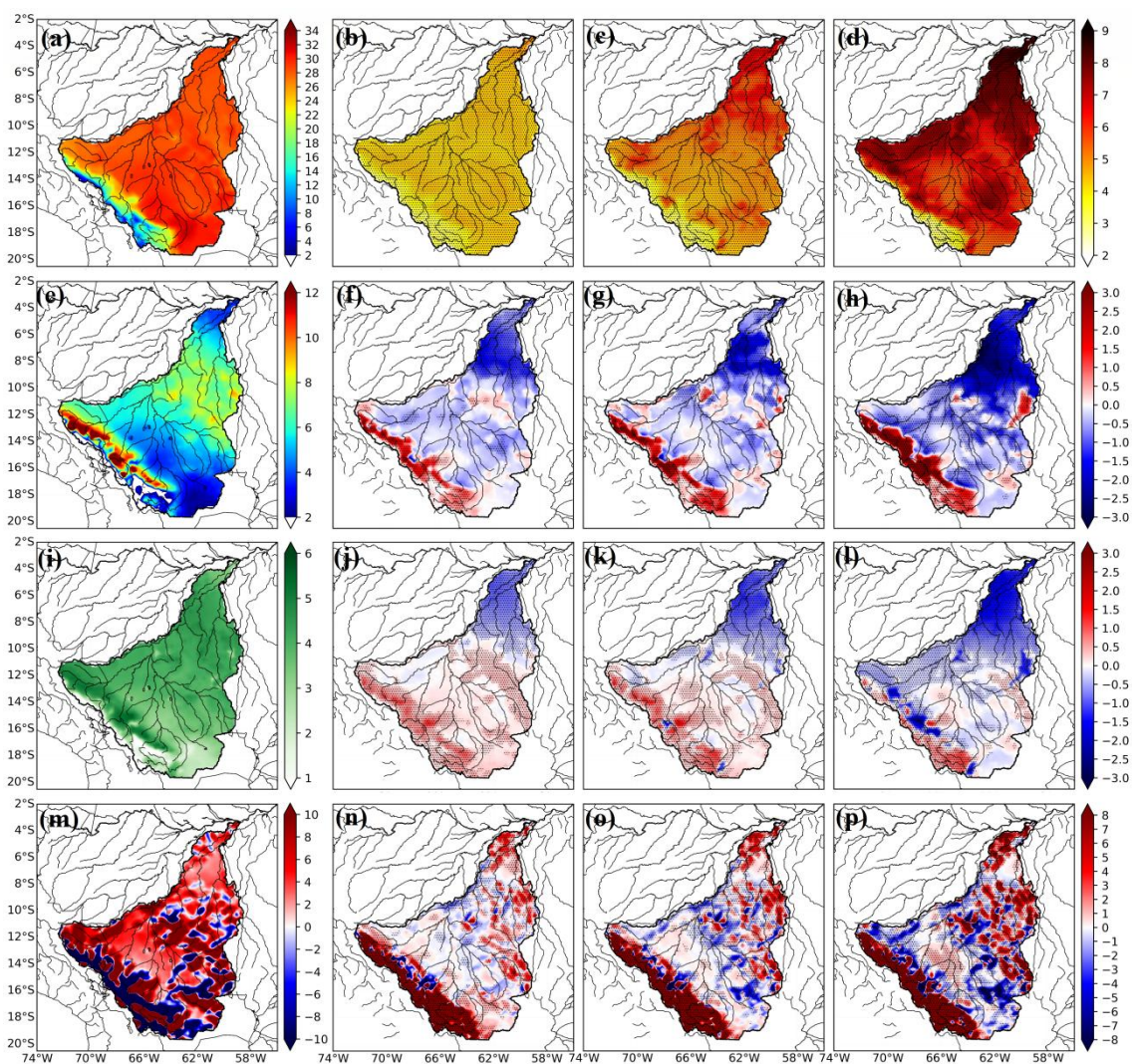


Figura 3 – Impactos decorrentes dos cenários de emissão (RCP 8.5) e desflorestamento para a bacia do rio Madeira - período úmido (DJF): Linhas de cima para baixo mostram: 1 - Temperatura a 2m ($^{\circ}\text{C}$); 2 - Precipitação (mm dia^{-1}); 3 - Evapotranspiração (mm dia^{-1}); 4 - Convergência de umidade (mm dia^{-1}); Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 (b, f, j, n) e Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 com desflorestamentos 2050 (c, g, k, o) e 2100 (d, h, l, p) As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

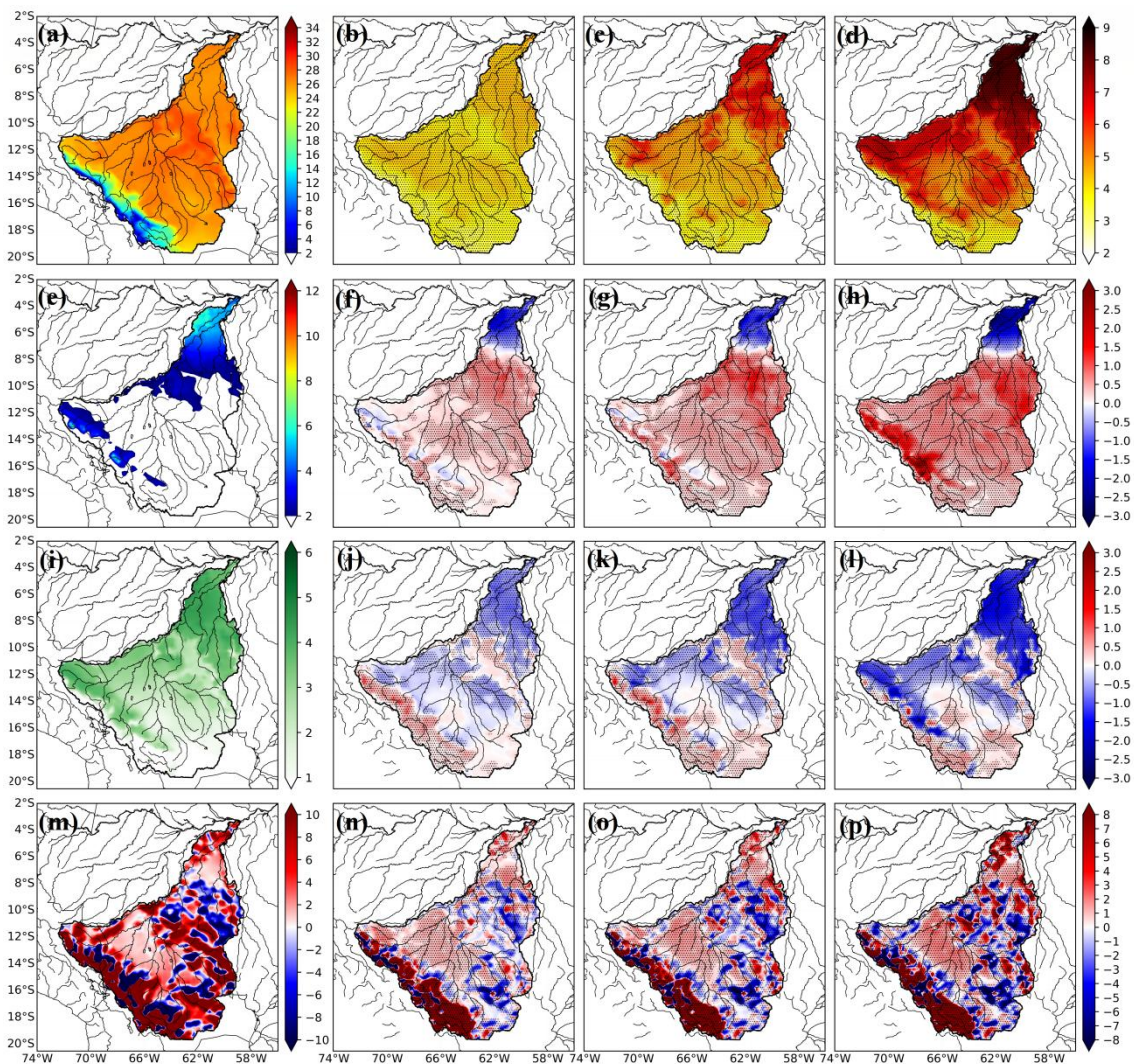


Figura 4 – Impactos decorrentes dos cenários de emissão (RCP 8.5) e desflorestamento para a bacia do rio Madeira - período seco (JJA): Linhas de cima para baixo mostram: 1 - Temperatura a 2m ($^{\circ}\text{C}$); 2 - Precipitação (mm dia^{-1}); 3 - Evapotranspiração (mm dia^{-1}); 4 - Convergência de umidade (mm dia^{-1}): Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 (b, f, j, n) e Impactos decorrentes do cenário RCP 8.5 com desflorestamentos 2050 (c, g, k, o) e 2100 (d, h, l, p) As áreas onde as diferenças são significativas ao nível de confiança de 95% são marcadas por pontos pretos.

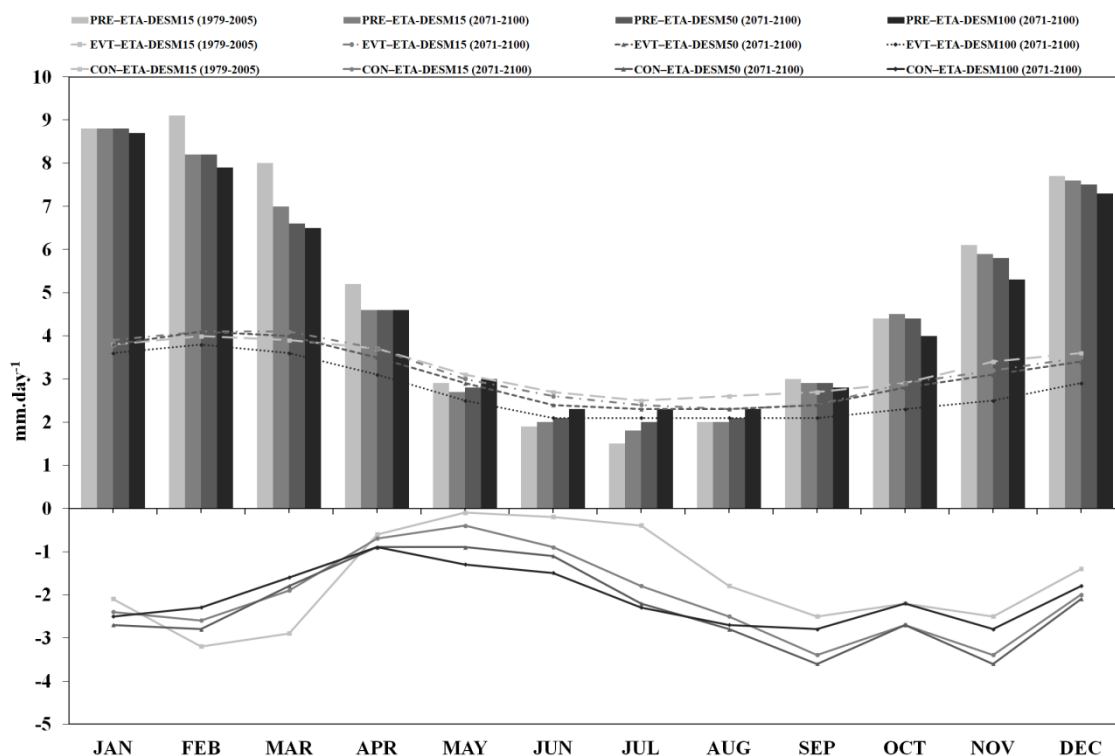


Figura 5 – Média mensal do ciclo anual dos componentes do balanço de umidade (Precipitação (PRE, mm dia⁻¹); Evapotranspiração da superfície (EVT, mm dia⁻¹); Convergência de umidade (CON, mm dia⁻¹) simulado pelo modelo Eta-BESM-OA para o clima presente (1979-2005) e período futuro (2071-2100) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5 e cenários de desflorestamento para 2015, 2050 e 2100 para bacia do rio Madeira.

RAMO TERRESTRE DO BALANÇO DE ÁGUA

Desempenho da remoção do viés e calibração

A figura 6 apresenta o ciclo anual médio da precipitação simulada pelo modelo Eta-BESM-OA (com e sem correção de viés) e as reanálises do Era-Interim (1979 a 2005) na bacia do rio Madeira. De forma geral, observa-se um melhor desempenho na representação da variação sazonal da precipitação com o modelo regional corrigido, principalmente na estação chuvosa onde os erros foram maiores. A precipitação média anual no modelo Eta-BESM-OA corrigido (não corrigido) foi da ordem de 1.835 mm ano⁻¹ (1.368 mm ano⁻¹), estando mais próximos daqueles observados nas reanálises Era-Interim (1862 mm ano⁻¹) e por Molinier *et al.* (1996) (1.834 mm dia⁻¹). Entretanto,

mesmo com a correção do viés o modelo regional subestimou a precipitação no período de dezembro a fevereiro (DJF) e superestimou na estação seca - junho a agosto – JJA. Para avaliar estatisticamente o desempenho do método de correção de viés utilizou-se o digrama de Taylor (Figura 7). O desempenho é avaliado para os trimestres DJF, MAM, JJA e SON. Em todos os períodos, observou-se o ganho no desempenho da aplicação do método de correção do viés. A correlação ficou acima de 0.9 e o desvio padrão próximo dos valores observados (0.75 e 1.0) em todas as estações, indicando um satisfatório ajuste na precipitação sobre a bacia do rio Madeira. Na simulação com precipitação não corrigida a correlação variou de 0.6 a 0.8 com desvio padrão ficou em torno de 0.6. Na avaliação das descargas, as estações com melhor coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS) na correção do viés foram Guajará-Mirim (0.88), Porto Velho (0.90) e Manicoré (0.86), conforme mostrado na Tabela 2.

Para a realização das simulações dos processos hidrológicos no clima presente e cenários futuros se fez necessário também a calibração do modelo MGB-IPH em todas as estações fluviométricas mostradas na Tabela 1. Utilizou-se para isso os dados de reanálises do ERA-Interim (ECMWF) para o período 1990 a 1994. A tabela 2 apresenta o desempenho do processo de calibração e da remoção do viés (erros sistemático do modelo regional) na simulação da vazão pelo modelo hidrológico MGB-IPH. As estações de Guajará-Mirim, Porto Velho, Ariquemes, Manicoré e Humboldt apresentaram bom desempenho no processo de calibração, pois o ENS esteve acima de 0.8. Os menores erros no volume total (ΔV) foram nas estações de Guajará-Mirim, Manicoré e Humboldt. Com a correção do viés e a calibração do modelo MGB-IPH, as simulações de precipitação do modelo Eta-BESM-OA foram utilizadas para forçar o modelo MGB-IPH no clima presente e nas projeções futuras. Os dados de precipitação

simulada pelo modelo regional para as projeções futuras (2071-2099) foram corrigidas supondo que o mesmo erro sistemático esteja no clima futuro. Desta forma, para o clima futuro aplicou-se a mesma correção de bias do clima presente por meio da função de distribuição de probabilidade normal tipo *t* de *Student*.

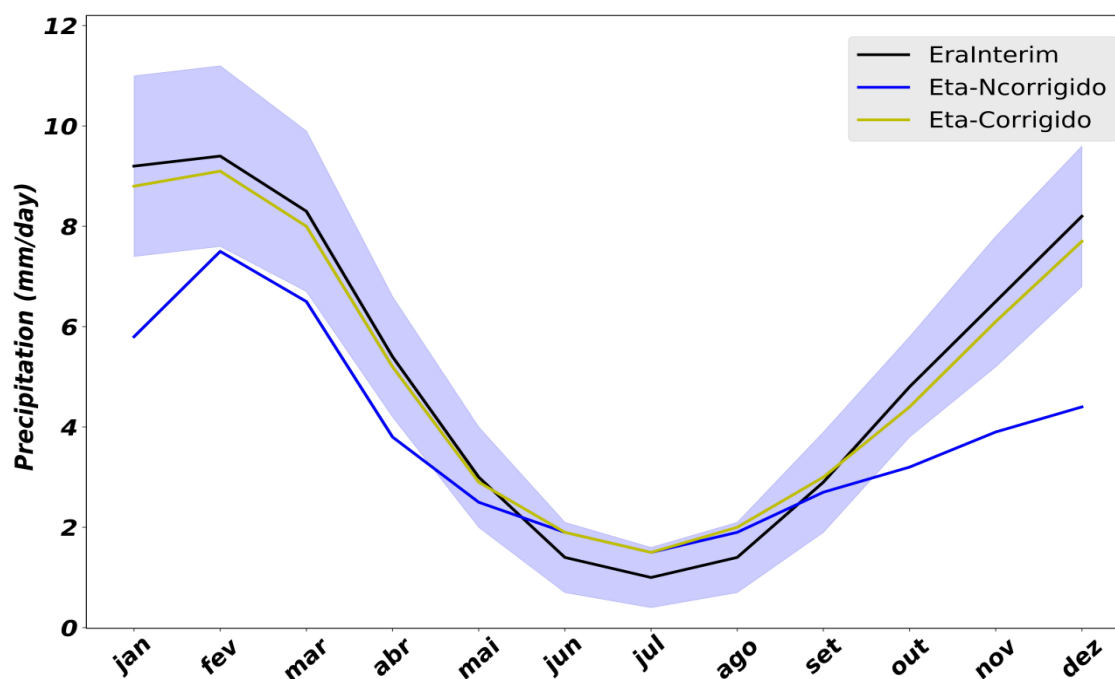


Figura 6 – Ciclo anual da precipitação simulada pelo modelo Eta não corrigido (Eta-Ncorrigido), Eta com correção de viés (Eta-Corrigido) e as reanálises do Era-Interim com desvio padrão para a bacia do rio Madeira correspondente ao clima atual (1979-2005). Unidades: mm dia⁻¹.

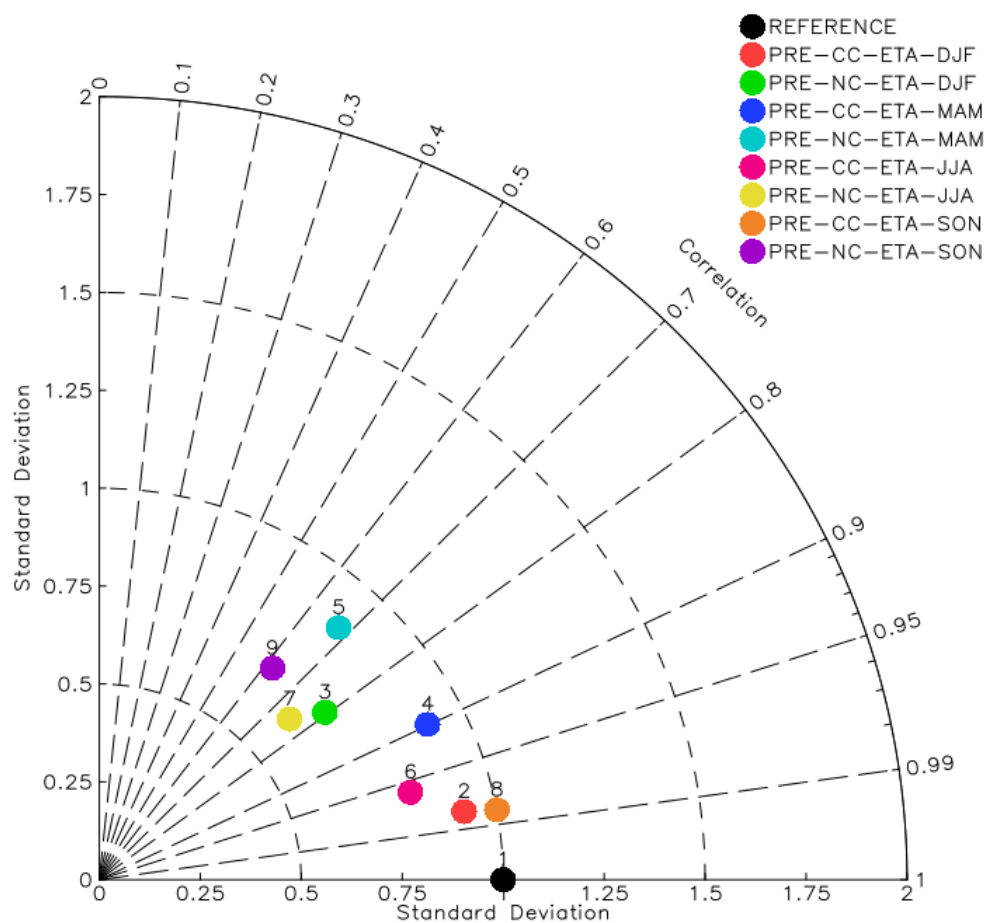


Figura 7 – Diagrama de Taylor para a precipitação média sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) simulada pelo modelo Eta sem correção (PRE-NC-ETA) e Eta com correção de bias (PRE-CC-ETA) durante o período 1979-2005. As reanálises do Era-Interim são consideradas como ponto de referência.

Tabela 2 – Desempenho do modelo MGB-IPH obtido para calibração (1990-1994) e validação (1995-2005): índice de eficiência de Nash-Sutcliffe entre vazões observadas e simuladas (ENS), índice de eficiência de Nash-Sutcliffe entre logaritmo das vazões observadas e simuladas (ENSlog) e o erro no volume total (ΔV).

Nº	Código	Nome	Calibração			Validação		
			ENS	ENSlog	ΔV	ENS	ENSlog	ΔV
1	15250000	Guajará-Mirim	0.89	0.81	-7.27	0.88	0.76	6.01
2	15400000	Porto Velho	0.88	0.87	-11.06	0.90	0.83	3.19
3	15430000	Ariquemes	0.82	0.65	11.28	0.72	0.49	27.41
4	15580000	Tabajara	0.41	0.48	11.33	0.68	0.60	20.81
5	15630000	Humaitá	0.70	0.60	20.70	0.60	0.83	11.86
6	15700000	Manicoré	0.88	0.91	-8.30	0.86	0.75	6.00

Descargas

A figura 8 apresenta a variação sazonal da vazão e precipitação para o clima presente e cenários futuros de emissão de GEE's (RCP 8.5) com desflorestamento de 2015 e com projeções de desflorestamento para 2050 e 2100. Nas estações de Guajará-Mirim, Porto Velho, Humaitá e Manicoré se observou aumento intenso das vazões durante todo o ano para todos os cenários futuros. Entretanto, as mudanças na vazão foram maiores durante o período de estiagem (Figura 8a,b,e,f). Os aumentos médios na descarga foram de 145%, 72%, 59%, 49% nas estações de Guajará-Mirim, Porto Velho, Humaitá e Manicoré, respectivamente. Nestas estações o efeito das mudanças no clima devido à emissão do GEE's foi mais importante do que aquele decorrente dos cenários de desflorestamento (2050 e 2100). Na estação seca o aumento observado nas descargas deve-se ao aumento na precipitação na maior parte da bacia do Madeira, principalmente nas regiões à montante (Figura 3 e 4). Entretanto, na estação chuvosa o aumento na vazão deve-se provavelmente a maior redução da evapotranspiração em relação à precipitação sobre parte da bacia, fazendo com que o escoamento (descarga) aumentasse nesses postos fluviométricos. De forma contrária, nas estações de Ariquemes e Tabajara as vazões foram reduzidas em todos os cenários, principalmente no período de enchente, onde as mudanças foram mais intensas. Na estação de Tabajara, além da redução nas descargas se observou uma antecipação de aproximadamente 2 meses no instante das vazões máximas. As estações de Tabajara e Ariquemes estão localizadas em afluentes do rio principal, enquanto as demais estão posicionadas no próprio rio Madeira. Desta forma, o rio principal controla o escoamento em seus afluentes. Assim, quando os níveis d'água nos grandes rios se elevam parte do volume d'água escoava para as respectivas planícies de inundação. Ao mesmo tempo, os pequenos afluentes são represados,

diminuindo e muitas vezes invertendo o sentido do fluxo de vazões. Nestas estações se observou diferentes mudanças para cada cenário futuro de emissão e desflorestamento. Na estação de Ariquemes, as descargas foram reduzidas na estação úmida no cenário RCP 8.5 (8%), e essa redução foi intensificada com os cenários de desflorestamento de 2050 (20%) e 2100 (32%). Comportamento semelhante foi observado na estação de Tabajara, onde as descargas foram reduzidas de 17% no cenário RCP 8.5 e de 29% e 40% nos cenários de desflorestamento de 2050 e 2100, respectivamente.

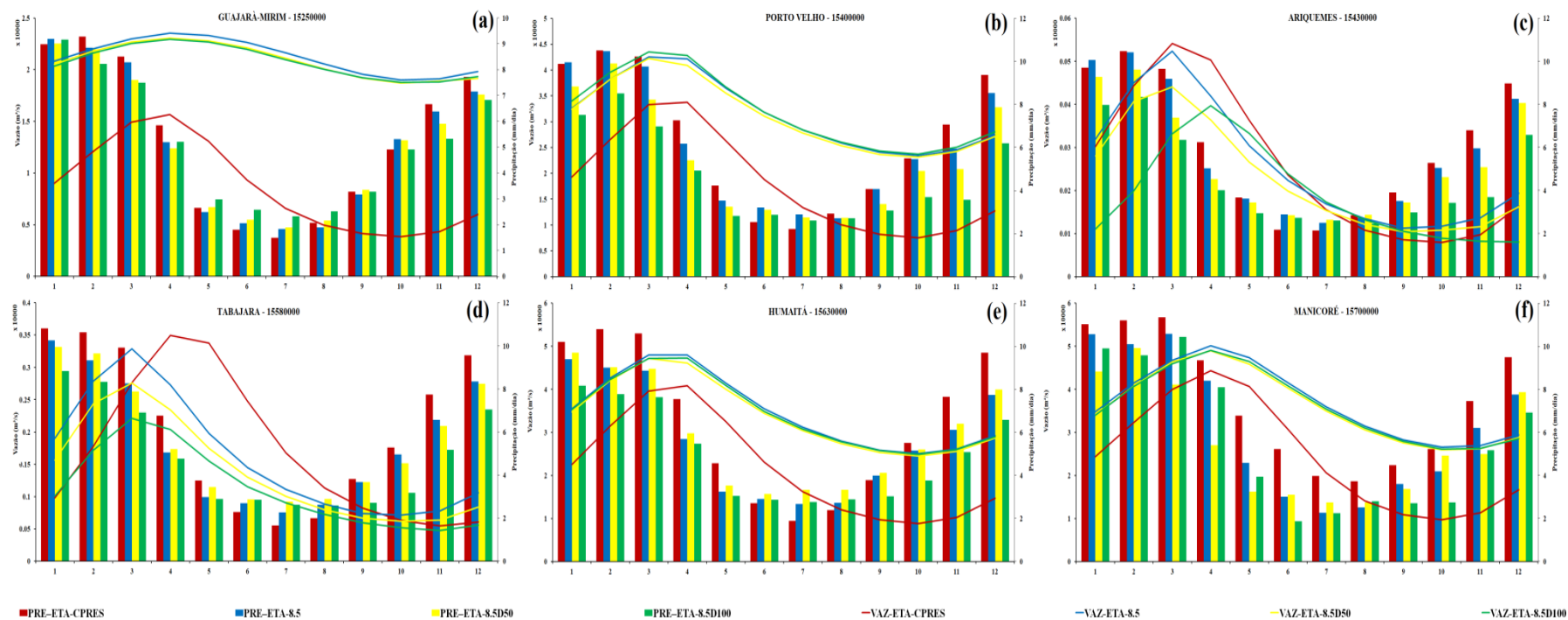


Figura 8 – Variação sazonal da vazão e precipitação para o clima presente (vermelho) e cenários futuros de emissão de GEE's (RCP 8.5) com desflorestamento de 2015 (azul) e com projeções de desflorestamento para 2050 (amarelo) e 2100 (verde). As estações fluviométricas na bacia rio Madeira avaliadas neste estudo são: a) Guajará-Mirim (15250000), b) Porto Velho (15400000), c) Ariquemes (15430000), d) Tabajara (15580000), e) Humaitá (15630000) e f) Manicoré (15700000). Unidade: vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e precipitação (mm dia^{-1}).

Áreas de inundação

Além das vazões em rios de grandes bacias, o modelo hidrodinâmico no MGB-IPH simula a extensão da área de inundação ao longo da bacia hidrográfica. A figura 9 apresenta a variação sazonal da área inundação para o clima presente e cenários futuros de emissão de GEE's e de desflorestamentos sobre a bacia do rio Madeira. Durante todo o período observa-se aumento na área de inundação para todos os cenários futuros, e esse aumento foi maior durante a estação úmida. No cenário RCP 8.5 o aumento na área de inundação foi de 72%, e com os cenários de desflorestamento os valores foram menos intensos variando de 65% para o cenário de 2050 e 68% no cenário de 2100. O aumento da área inundada pode estar associado ao aumento na precipitação à montante da bacia do rio Madeira, próximo a Cordilheira dos Andes, e a mudança nos parâmetros do solo associada às alterações no uso da terra, pois o desflorestamento pode reduzir a evapotranspiração, modificar a descarga, e consequentemente aumentar as áreas inundadas sobre a bacia do rio Madeira.

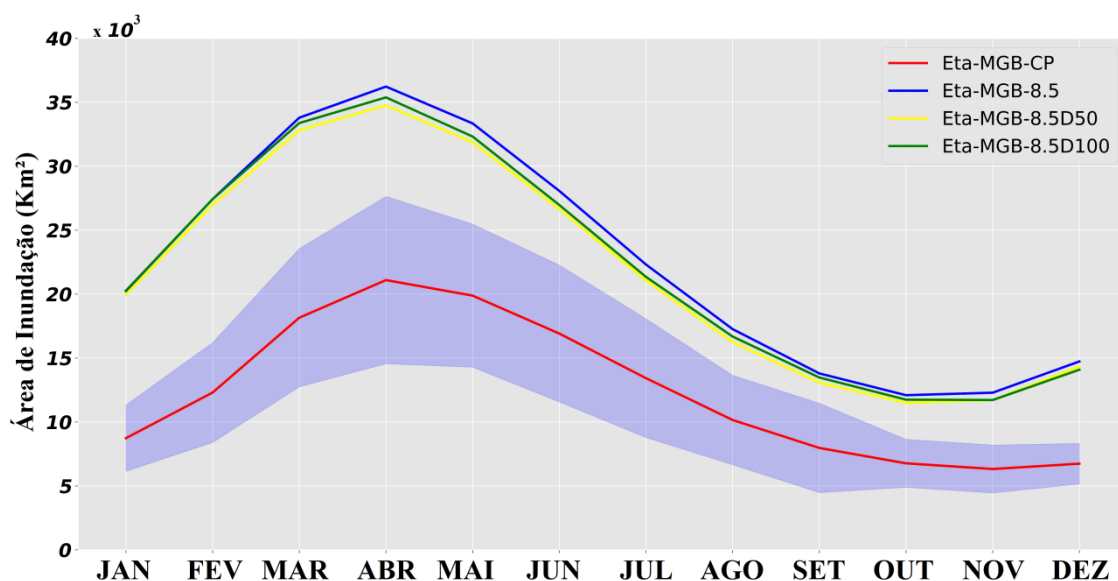


Figura 9 – Variação sazonal da área inundação para o clima presente (vermelho) com desvio padrão e cenários futuros de emissão dos GEE's (RCP 8.5) com desflorestamento de 2015 (azul) e com projeções de desflorestamento para 2050 (amarelo) e 2100 (verde).

CONCLUSÕES

No presente estudo, o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB) foram utilizados para geração de simulações de mudanças climáticas a partir do cenário de emissão RCP 8.5 do Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report - (AR5-IPCC) e de desflorestamento futuro na bacia do Madeira. O objetivo desse estudo foi avaliar os efeitos do aumento dos GEE's projetados para o fim do século XXI e dos desflorestamentos futuros no ciclo da água na bacia do rio Madeira. No cenário RCP 8.5, modelo Eta-BESM-OA apresentou sensibilidade sobre toda a bacia do Madeira, com aumento da ordem de 4.0°C na temperatura. O aumento foi intensificado com os cenários de desflorestamentos de 2050 (4.8°C) e 2100 (6.2°C). Em todos os cenários futuros predominou a redução na precipitação na foz do rio Madeira, nas demais regiões da bacia observou-se redução e aumento nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Nos cenários de desflorestamento predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo, pois embora havendo reduções na precipitação e evapotranspiração, a convergência de umidade apresentou aumento em todos os cenários. Apesar do aumento na convergência de umidade, a redução na evapotranspiração nos cenários de desflorestamento teve papel preponderante na redução na precipitação sobre a bacia do rio Madeira. Com relação aos processos hidrológicos, observou-se aumento das descargas na maioria das estações para todos os cenários futuros RCP 8.5 e desflorestamento. O efeito das mudanças no clima devido à emissão do GEE's foi mais importante do que aquele decorrente dos cenários de desflorestamento. O aumento da precipitação na estação seca explica em parte o aumento das vazões sobre a bacia do Madeira. Os cenários futuros de emissão e de desflorestamento conduziram a um aumento na área de inundação. O aumento na

precipitação à montante da bacia e a mudança nos parâmetros do solo, associada às alterações no uso da terra, contribuíram para o aumento da área de inundação sobre a bacia do Madeira. As mudanças observadas na precipitação, evapotranspiração, descargas e inundações devido às fatores antropogênicos caracterizam-se um cenário preocupante, pois podem desencadear alterações significativas no ciclo da água na bacia do rio Madeira. Essas alterações podem ter efeitos negativos com prejuízos e danos no meio ambiente, nos recursos hídricos, nos principais setores da economia (agricultura, indústria, mineração, navegação fluvial e da geração de energia), afetando de forma direta as comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da bacia do Madeira.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é parte da Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Os autores agradecem a Agência Nacional de Águas (ANA) e Brazilian Ministry of Science, Technology, and Innovation (MCTI) por financiamento adicional, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) por disponibilizar o Supercomputador TUPA para realização das integrações numéricas, o Laboratório de Modelagem do Sistema Climático Terrestre (LABCLIM) da UEA por disponibilizar a estrutura física computacional – Cluster Tambaqui. O primeiro autor agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo.

SÍNTESE

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar os impactos espaço-temporal nos componentes do balanço de água na bacia amazônica com ênfase na bacia do rio Madeira para o clima futuro em comparação com o clima presente, utilizando o Modelo Climático Regional Eta, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), forçado com o cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5 e desflorestamento na Amazônia proveniente do Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5).

O Capítulo 1 apresentou a avaliação dos efeitos da mudança do clima para o final do século XXI sobre os componentes do balanço d'água na Amazônia, abordando os mecanismos físicos envolvidos nesse processo, utilizando o modelo regional Eta forçado com o cenário de emissões RCP 8.5 proveniente do modelo do sistema terrestre BESM-OA2.5. Na média, o modelo regional conseguiu representar a variação sazonal da precipitação sobre o continente para o clima presente, posicionando corretamente os máximos de precipitação em ambas as estações de inverno e verão, apesar do modelo global BESM-OA ter simulado os máximos a leste de sua posição climatológica. O modelo Eta-BESM-OA apresentou sensibilidade ao cenário RCP 8.5 apresentando aumento de temperatura em todo o continente com valores mais intensos sobre a bacia Amazônica (4-5°C). O efeito do cenário RCP 8.5 contribuiu para reduções de 11% na precipitação, 6% na evapotranspiração, 9% convergência de umidade e de 34% no runoff. A redução na precipitação foi devido às reduções na convergência de umidade e na evapotranspiração. Como a redução da convergência de umidade e da evapotranspiração agiram para reduzir a precipitação, notou-se a configuração de um Mecanismo de Retroalimentação Positivo, o que é preocupante, podendo causar instabilidade nos ecossistemas Amazônicos, pois não apresentam grande capacidade de adaptação à magnitude das mudanças no clima, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo. Desta forma, o aumento de temperatura acima de 2°C e a redução nos componentes do balanço de água podem afetar a complexa interação solo-planta-atmosfera trazendo consequências irreversíveis para a floresta, assim como afetar negativamente os setores econômicos da região Amazônica.

O Capítulo 2 corresponde à etapa mais pessimista para bacia Amazônica desta dissertação, onde se avaliou os impactos do aumento dos GEE's e dos desflorestamentos no balanço de

água na bacia Amazônica utilizando o modelo regional Eta forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-OA 2.5) com cenário de emissões do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas RCP 8.5 (AR5 IPCC 5th) e cenários de desflorestamentos na Amazônia referentes ao estado atual e projeções para situações futuras. No clima presente, o modelo regional Eta-BESM-OA conseguiu representar a característica de sumidouro de umidade apresentando taxa de precipitação maior que a evapotranspiração na bacia. No cenário de emissão RCP 8.5 para o fim do século XXI, predominou o Mecanismo de Retroalimentação Positivo (MRP), no qual a redução na evapotranspiração e convergência de umidade agiram no mesmo sentido para redução na precipitação sobre a bacia Amazônica. As mudanças na temperatura e nos componentes do balanço de água foram intensificadas com a inclusão dos desflorestamentos futuros, mostrando que o aumento dos GEE's e as mudanças no uso da terra contribuem sinergicamente para afetar o balanço de energia e água sobre a bacia Amazônica. Com os cenários de desflorestamento, predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo (MRN), pois a redução relativa na evapotranspiração foi maior que a redução na precipitação conduzindo a um aumento na convergência de umidade sobre a região. As mudanças no balanço de água na Amazônia devido à fatores antropogênicos se caracterizam um cenário preocupante, pois podem desencadear alterações significativas nos ecossistemas naturais da Amazônia, já que os mesmos não apresentam grande capacidade de adaptação à magnitude das mudanças no clima, sobretudo se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que, se o desenvolvimento sustentável e as políticas de conservação não agirem no sentido de deter o aumento da degradação ambiental na Amazônia e o aumento global das emissões dos gases do efeito estufa, as mudanças no balanço de água podem conduzir o sistema clima-bioma a um novo estado de equilíbrio, no qual um tipo diferente de vegetação (provavelmente cerrado) se adaptaria às novas condições climáticas estabelecidas na bacia Amazônica.

O Capítulo 3 corresponde à etapa de modelagem hidrológica para bacia do rio Madeira, onde se avaliou os efeitos antropogênicos (aumento dos GEE's e dos desflorestamentos) no ciclo da água sobre a bacia do rio Madeira utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB). No cenário RCP 8.5, o modelo Eta-BESM-OA apresentou aumento da temperatura, intensificado-se com os cenários de desflorestamentos de 2050 e 2100. Em todos os cenários futuros predominou a redução na precipitação na foz do rio

Madeira, nas demais regiões ocorreram redução e aumento nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Nos cenários de desflorestamento predominou-se o Mecanismo de Retroalimentação Negativo, pois embora havendo reduções na precipitação e evapotranspiração, a convergência de umidade apresentou aumento em todos os cenários. Apesar o aumento na convergência de umidade, a redução na evapotranspiração nos cenários de desflorestamento teve papel preponderante para reduzir a precipitação sobre a bacia do rio Madeira. Com relação aos processos hidrológicos, houve aumento das vazões na maioria das estações e para todos os cenários futuros. O efeito das mudanças no clima devido à emissão do GEE's foi mais importante do que aquele decorrente dos cenários de desflorestamento. Os cenários futuros de emissão e de desflorestamento conduziram a um aumento na área de inundação. O aumento na precipitação à montante da bacia e a mudança nos parâmetros do solo, associada às alterações no uso da terra, contribuíram para o aumento da área de inundação sobre a bacia do Madeira. As mudanças observadas na precipitação, evapotranspiração, descargas e inundações devido às fatores antropogênicos se caracterizam um cenário preocupante, pois podem desencadear alterações significativas no ciclo da água na bacia do rio Madeira. Essas alterações podem ter efeitos negativos com prejuízos e danos no meio ambiente, nos recursos hídricos, nos principais setores da economia (agricultura, indústria, mineração, navegação fluvial e da geração de energia), afetando de forma direta as comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis da bacia do Madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, L.M.; Marengo, J.A.; Fu, R.; and Bombardi, R.J. 2017. Sensitivity of Amazon Regional Climate to Deforestation. *American Journal of Climate Change*, 6, 75-98.

Ambrizzi, T.; Rocha, R.P.; Marengo, J.A.; Pisnitchenko, I.; Alves, L. M.; Fernandez, J.P.R. 2007. *Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais: relatório 3*. Brasília: MMA.

Ambrizzi, T. and Ferraz, S.E.T. 2015. An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone. *Frontiers in Environmental Science*, v. 3, article 23.

Aragão, L.E.O.C.; Poulter, B.; Barlow, J.B; Anderson, L.O; Malhi, Y; Saatchi, S., Phillips, O.L.; Gloor, E. 2014. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. *Biological Reviews*, v. 89, p. 913-931.

Arraut, J.R.; Satyamurty, P. 2009. Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with emphasis on the South American region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(9): 1902-1912.

Artaxo, P.; Gatti, L.V.; Leal, A.M.C.; Longo, K.M.; Freitas, S.R.; Lara, L.L.; Pauliquevis, T.M.; Procpóprio, A.S.; Rizzo, L.V. 2005. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica*, 35(2): 185-196.

Bonatti, J.P. 2006. *Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. online, n. Especial 10 anos.

Chou, S.C.; Lyra, A.A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; *et al.* 2014a. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3: 438-454.

Chou, S.C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; Bustamante, J.; Tavares, P.; Silva, A.; Rodrigues, D.; Campos, D.; Chagas, D.; Sueiro, G.; Siqueira, G.; Marengo, J. 2014b. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-525.

Collischonn, W. 2001. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 270 pp.

Collischonn, W.; Allasia D.G.; Silva B.C.; and Tucci C.E.M. 2007, The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling, *Hydrol. Sci. J.*, 52, 878–895.

Correia, F.W.S.; Manzi, A.O.; Cândido, L.A.; dos Santos, R.M.N.; Pauliquevis, T. 2007. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura*, 59(3): 39-43.

Cox, P.M.; Betts, R. A.; Collins, M.; Harris, P.P.; Huntingford, C. and Jones, C. D. 2004. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical And Applied Climatology*, 78 (1-3). pp. 137-156.

D’Almeida, C.;Vorosmarty, C.J.; Hurtt, G.C.; Marengo, J.A.; Dingman, S.L.; Keim, B.D. 2007.The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, 27(5):633-647.

Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A. *et al.*, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553-597.

Doughty, C.E.; Metcalfe, D.B.; Girardin, C.A.J.; Amézquita, F.F.; Cabrera, D.G.; Huasco, W.H.; ... & Feldpausch, T.R. 2015. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 519(7541), 78.

Drumond, A.; Marengo, J.; Ambrizzi, T.; Nieto, R.; Moreira, L.; Gimeno, L. 2014. The role of amazon basin moisture on the atmospheric branch of the hydrological cycle: a lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 11, n. 1, p. 1023–1046.

Ek, M.B.; Mitchell, K.E.; Lin, Y.; Rogers, E.; Grummen, P.; Koren, V.; Gayno, G.; Tarpley, J.D. 2003. Implementation of NOAA land surface advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).

Espinoza, J.C., Marengo, J.A; Ronchail, J.; Molina, J.; Noriega, L. and Guyot, J.L. 2014: The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropicalsubtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.*, 9, 124007.

Espinoza Villar, J.C.; Ronchail, J.; Guyot, J.L.; Cochonneau, G.; Filizola, N.; Lavado, W.; De Oliveira, E.; Pombosa, R.; Vauchel, P. 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*.

Eva, H.D. and O. Huber (eds) 2005. A Proposal for defining the geographical boundaries of Amazonia (European Commission - Luxembourg: *Office for Official Publications of the European Communities* ISBN 92-79-00012-8).

Fearnside, P.M. 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. *Conservation Biology*, 19(3): 680-688.

Fels, S.B.; Schwarzkopf, M.D. 1975. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(7): 1475-1488.

Figueroa, S.N.; Bonatti, J.P.; Kubota, P.Y.; Grell, G.A.; Morrison, H.; Barros, S.R.M.; ... Panetta, J. 2016. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. *Weather and Forecasting*, 31(5), 1547-1572.

Filizola, N.; Guyot, J.L.; Molinier, M.; Guimarães, V.; Oliveira, E.; Freitas, M.A. 2002. Caracterização hidrológica da bacia Amazônica. In: Rivas, A. & Freitas, C.E. *Amazônia uma perspectiva interdisciplinar*, Manaus, Brasil: EDUA, p.33-53.

Freitas S.R. 1999. *Numerical Modeling of the transport and emissions from biomass burning on South America tropical forest and savanna*. Ph.D. Thesis – Institute of Physics, University of Sao Paulo, 204 pp (In Portuguese)

Gandu A.W.; Cohen J.C.P; Souza J.R.S.; 2004: Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. *Theoretical And Applied Climatology*, 78, 123-135.

Gash, J.H.C.; Nobre, C.A. 1997. Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from ABRACOS. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 823–830.

Gash, J.H.C.; Huntingford, C.; Marengo, J.A.; Betts, R.A.; Cox, P.M.; Fisch, G.; Fu, R.; Gandu, A.W.; Harris, P.P.; Machado, L.A.T.; Von Randow, C.; Silva Dias, M.A.F. 2004. Amazonian climate: results and future research. *Theoretical and Applied Climatology*, 78 (1-3): 187-193.

Getirana, A.C.V.; Bonnet, M.P.; Rotunno Filho, O.C.; Collischonn, W.; Guyot, J.L.; Seyler, F.; Mansur, W.J. 2010. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrological Processes* 24 (22), pp. 3219-3236.

Giorgi, F. 2006. Regional climate modeling: Status and perspectives, *J. Phys.* IV, 139, 101–118.

Grell G.A.; Devenyi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29.

Griffies S.M. 2009. Elements of MOM4p1. GFDL Ocean Group Technical Report N^o.6, NOAA / *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, Dec 2009, 444 pp.

Goddard, L.; Mason, S.; Zebiak, S.; Ropelewski, C.; Basher, R. and Cane, M. 2001. Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. *Int. J. Climatol.*, 21, 1111–1152.

Guimberteau, M.; Ronchail, J.; Espinoza, J.C.; Lengaigne, M.; Sultan, B.; Polcher, J.; Drapeau, G.; Guyot, J.L.; Ducharne, A.; Ciais, P. 2013. Future changes in precipitation and impacts on extreme stream_flow over Amazonian sub-basins. *Environ. Res.* 8, 014035.

Guimberteau, M.; Ciais, P.; Ducharne, A.; Boisier, J.P.; Dutra Aguiar, A.P.; Biemans, H.; De Deurwaerder, H.; Galbraith, D.; Kruijt, B.; Langerwisch, F.; Poveda, G.; Rammig, A.; Rodriguez, D.A.; Tejada, G.; Thonicke, K.; Von Randow, C.; Von Randow, R.C.S.; Zhang, K. and Verbeeck, H. 2017. 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.*, 21, 1455-1475.

Harshvardhan, R.D.; Randall D.A.; Corsetti T.G. 1987. A fast radiation parameterization for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 92:1009-1016.

Hay, L. E.; Clark, M.P.; Wilby, R.L.; Gutowski, W.J.; Leavesley, G.H.; Pan, Z.; Arritt, R.W.; Takle, E.S. 2002. Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrometeorology*. 3: 571–590.

Hodnett, M.G.; Oyama, M.D.; Tomasella, J.; Marques Filho, A.O. 1996. Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: Gash, J. H. C., Nobre, C. A., Roberts, J. M., Victoria, R. L. (Org.). *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester: John Wiley, 57-77.

INPE, 2017. Projeto PRODES: Monitoring the Brazilian Amazon forest by satellite: 2017. São José dos Campos, Brazil. Disponível em (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>) . Acesso em: jan 2018.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Summary for Policymakers. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller,

H.L. (Eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, USA. 18pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Summary for Policymakers. In: Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. (Eds). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, USA. 27pp.

Janjic, Z.I. 1994. The step-mountain Eta Coordinate Model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5): 927-945.

Lacis, A.A.; Hansen, J.E. 1974. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1): 118-133.

Malhi, Y.; Roberts, J.T.; Betts, R.A.; Killeen, T.J.; Li, W.; Nobre, C.A. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, 319(5860): 169-172.

Marengo, J.A. 2005. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Climate Dynamics*, 24(1): 11-22.

Marengo, J.A. 2006. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(3a): 1-19.

Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Chou, S.C.; Tomasella, J.; Sampaio, G.; Alves L.M.; Obregón, G.O.; Soares, W.R.; Betts, R.; Kay, G. 2011. *Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia*. Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Brasil e o

Met Office Hadley Centre (MOHC), do Reino Unido. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, BRA e Met Office Hadley Centre, U.K. 55pp.

Marengo, J.A.; Chou, S.C.; Kay, G.; Alves, L.M.; Pesquero, J.F.; Soares, W.R.; Santos, D.C.; Lyra, A.A.; Sueiro, G.; Betts, R.; Chagas, D.J.; Gomes, J.L.; Bustamante, J.F.; Tavares, P. 2012. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38: 1829-1848.

Marengo, J.A., & Espinoza, J.C. 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050.

McPherson, R.A. 2007. A review of vegetation–atmosphere interactions and their influences on mesoscale phenomena. *Progress in Physical Geography*, 31(3): 261-285.

Mellor, George L.; Yamada, Tetsuji. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, v. 20, n. 4, p. 851-875. ISSN 1944-9208.

Mesinger, F. 1984. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 44(1-4): 195-202.

Miranda, A.C.; Miranda, H.S.; Lloyd, J. 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, vol. 20, no. 3, pp. 315–328.

Molinier, M.; Guyot, J.L.; Oliveira, E. and Guimaraes, V. 1996. Les regimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. In: Chevallier P. and Pouyaud B. (Eds.), *L'hydrologie tropicale: geoscience et outil pour le developpement*. AIHS, Paris, pp. 209-222.

Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290.

Nepstad DC.; Stickler C.; Soares Filho B.S.; Merry F. 2008. Interactions among Amazon land use, forests, and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B 363(1498):1737–1746.

Nobre, C.A.; Marengo, J.A; Artaxo, P. 2009a. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. *In*: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias, P. (Eds). *Amazonia and Global Change*. Geophysical Monograph Ser, vol. 186. American Geophysical Union Books, Washington, D.C. p. 145-147.

Nobre, C.A.; Obregón, G.O.; Marengo, J.A; Fu, R.; Poveda, G. 2009b. Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. *In*: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias, P. (Eds). *Amazonia and Global Change*. Geophysical Monograph Ser, vol. 186. American Geophysical Union Books, Washington, D.C. p. 149-162.

Nobre, C. A.; Sampaio, G.; Borma, L.S.; Castilla-Rubio, J.C.; Silva, J.S. & Cardoso, M. 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10759-10768.

Nobre, P.; Siqueira, L.S.P.; de Almeida, R.A.F.; Malagutti, M.; Giarolla, E.; Castelaio, G.P. Bottino, M.J.; Kubota, P.; Figueroa, S.N.; Costa, M.C.; Baptista Jr.M.; Irber Jr.L.; Marcondes, G.G. 2013. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *Journal of Climate*, 26: 6716-6732.

Paiva, R.C.D.; Collischonn, W. and Tucci, C.E.M. 2011, Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach, *J. Hydrol.*, 406,170-181.

Paiva, R.C.D.; Collischonn, W.; Buarque, D.C. 2013. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrological Processes*, 27, p. 333–346.

Pereira, M.M.E. 2010. *Integração de Modelos Hidrológicos e SIG na análise de processos de*

Outorga Quantitativa de uso da água: Aplicação na Bacia do Rio dos Sinos - RS. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil, 89pp.

Pesquero, J.F.; Chou, S.C.; Nobre, C.A. and Marengo, J.A. 2010. Climate Downscaling over South America for 1961-1970 Using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 75-93.

Pitman, A.J. 2003. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *Int. J. Climatol.*, v. 23, p. 479-510.

Queiroz, M.M.A.; Horbe, A.M.C.; Moura, C.A.V. 2011. Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários -Amazonas – Brasil. *Acta Amazonica*. vol. 41(4): 453 – 464.

Ribeiro Neto, A. 2006. *Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira.* (COPPE/UFRJ, D. Sc., Engenharia Civil, 2006) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. XVII pp. 178.

Rocha, H.R.; Goulden, M.L.; Miller, S.D.; Menton, M.C.; Pinto, L.D.; & de Freitas, H. C. 2004. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological applications*, 14(sp4), 22-32.

Rocha V.M.; Correia F.W.S.; Satyamurty P.; de Freitas S.R.; Moreira D.S.; da Silva P.R.T.; Fialho E.S. 2015. Impacts of land cover and greenhouse gas (GHG) concentration changes on the hydrological cycle in amazon basin: a regional climate model study. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15, 7-27.

Rummukainen, M. 2010. State-of-the-Art with Regional Climate Models. *Climate Change*, 1, 96-82.

Sampaio, G.; Nobre, C.; Costa, M. H.; Satyamurty, P.; Soares-Filho, B. S., & Cardoso, M. 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17).

Satyamurty, P.; da Costa, C.P.W.; Manzi, A.O. 2013. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1-2): 195-209.

Sestini, M.F.; Alvalá, R.C.S.; Mello, E.M.K.; Valeriano, D.M.; Chou, S.C.; Nobre, C.A.; Paiva, J.A.C.; Reimer, E.S. 2002. *Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil, 74pp.

Silva, B.C.; Tucci, C.E.M.; Collischonn, W. 2006. Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 3, p. 15-29.

Silva Dias M.A.F. and Regnier P. 1996. Simulation of mesoscale circulations in deforested area of Rondônia in the dry season. In Amazon deforestation and climate. (eds Gash JH, Nobre CA, Roberts JM, and Victoria RL). *John Wiley & Sons Ltd.*, England, pp.531-547.

Silveira, L.G.T.D.; Correia, F.W.S.; Chou, S.C.; Lyra, A.; Gomes, W. B.; Vergasta, L., & Silva, P.R.T. 2017. Precipitation Recycling and Deforestation in the Amazon: A Numerical Modeling Study. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 417-432.

Siqueira Júnior, L, Tomasella, J., & Rodriguez, D. A. 2015. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Climatic change*, 129(1-2), 117-129.

Soares-Filho, B. S.; Alencar, A.; Nepstad, D.; Cerqueira, G.; Diaz, M.; Rivero, S.; Solórzanos, L.; Voll, E. 2004. Simulating the response of land-cover change to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. In: *Global Change Biology*, v. 10, p.745-764.

Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.C.; Curran, L.M.; Cerqueira, G.C.; Garcia, R.A.; Ramos, C.A.; Voll, E.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440: 520-523.

Sorribas, M.V.; Paiva, R.C.D.; Melack, J.M.; Bravo, J.M.; Jones, C.; Carvalho, L. 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136(3-4), 555-570.

Spiegel, M.R. 1972. *Estatística*. São Paulo: McGraw-Hill. 580 pp.

Tarasova T.A.; Barbosa H.M.J; Figueroa S.N. 2006. *Incorporation of new solar radiation scheme into CPTEC GCM*. Tech. Rep. INPE-14052-NTE/371, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 53 pp.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A. 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of American Meteorology Society*, 93, 485-498.

Tiedtke E.M. 1984. The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. *ECMWF Workshop on Convection in Large-Scale Models*. Reading, England: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, pp. 297-316.

Trancoso, R.; Carneiro Filho, A.; Tomasella, J.; Schiatti, J.; Forsberg, B.R.; Miller, R.P. 2009. Deforestation and conservation in major watersheds of the Brazilian Amazon. *Environmental Conservation*, v. 36, n. 4, p. 277-288.

Tucci, C.E.M.; Marengo, J.A.; Silva Dias, P.L.; Collischonn, W.; Silva, B.C.; Clarke, R.T.; Cardoso, A.O.; Juarez, R.N.; Sampaio, G.; Chan, C.S; Tomasella, J. 2005. *Previsão de vazões na bacia do Rio São Francisco com base na previsão climática*. Relatório Técnico Final, Projeto OMM/98/00, ANEEL, Porto Alegre (RS), 368 p.

Van Vuuren D.P.; Edmonds J.; Kainuma M.L.T.; Riahi K.; Thomson A.; Matsui T.; Hurtt G.; Lamarque J.F.; Meinshausen M.; Smith S.; Grainer C.; Rose S.; Hibbard K.A.; Nakicenovic

N.; Krey V., Kram T. 2011a. Representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* (This Issue).

Van Vuuren D.P.; Stehfest E.; Den Elzen M.G.J.; Deetman S.; Hof A.; Isaac M.; Klein Goldewijk K.; Kram T.; Mendoza Beltran A.; Osternrijk R.; Van Vliet J.; Van Ruijven B. 2011b. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature change below 2 degree C. *Climatic Change* (This Issue).

Vera, C.; Baez, J.; Douglas, M.; Emanuel, C.B.; Orsini, J.A.M.; Meitin, J.; Nicolini, M.; Nogues-Paegles, J.; Paegle, J.; Penalba, O.; Salio, P.; Saulo, C.; Silva Dias, M.A.F.; Silva Dias, P.; Zipser, E. 2006. The South American Low Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1): 63-77.

Von Randow, C.; Manzi, A.O.; Kruijt, B.; de Oliveira, P.J.; Zanchi, F.B.; Silva, R. L.; ... Kabat, P. 2004. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), 5-26.

Wood, A.; Maurer, E.P.; Kumar, A. and Lettenmaier, D.P. 2002. Long range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*. 107 (D20): 4429.

Wright, I. R.; Gash, J. H. C.; Rocha, H. R E Roberts, J. M. Modeling surface conductance for Amazonian pasture and forest. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. Amazonian Deforestation and Climate. *John Wiley and Sons*, 1st ed. p.437-458, 1996.

Xie, P., & Arkin, P. A. 1996. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *Journal of climate*, 9(4), 840-858.

Xie, P.; Janowiak, J. E.; Arkin, P. A.; Adler, R.; Gruber, A.; Ferraro, R.; Huffman, G. J.; Curtis, S. 2003. GPCP pentad precipitation analyses: an experimental data set based on gauge observations and satellite estimates. *J. Climate*. 16, 2197-2214.

Xue Y.; Zeng F.J.; Mitchell K.E.; Janjic Z.; Rogers E. 1991. The Impact of Land Surface Processes on Simulations of the U.S. Hydrological Cycle: A Case Study of the 1993 Flood Using the SsiB Land Surface Model in the NCEP Eta Regional Model. *Monthly Weather Review*, 129:2833-2860.

Yapo, P.O.; Gupta, H.V.; Sorooshian, S. 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204, 83-97 pp.

Zhang, K.; Almeida Castanho, A.D.; Galbraith, D.R.; Moghim, S.; Levine, N.M.; Bras, R.L.; Coe, M.T.; Costa, M.H.; Malhi, Y.; Longo, M.; Knox, R.G.; Mcknight, S.; Wang, J.; Moorcroft, P.R. 2015. The fate of Amazonian ecosystems over the coming century arising from changes in climate, atmospheric CO₂, and land use. *Global Change Biology*, v. 21, p. 2569–2587.

Zhao, Q.; Black, T.L.; Baldwin, M.E. 1997. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta Model at NCEP. *Weather and Forecasting*, 12(3): 697-712.