

PROD. TEC. ITV DS – N0043/2022  
DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2022.43.Costa

RELATÓRIO TÉCNICO ITV DS

**ESTIMATIVA DA REGULAÇÃO DO CLIMA REGIONAL PELA  
FLORESTA DO COMPLEXO DE ÁREAS PROTEGIDAS DE  
CARAJÁS**

RELATÓRIO PARCIAL DO PROJETO CAPITAL NATURAL

Cláudia Priscila Wanzeler da Costa  
Renata Tedeschi  
Everaldo Barreiros de Souza  
Tereza Giannini

Belém / Pará  
Dezembro / 2022

<b>Título:</b> Estimativa da regulação do clima regional pela floresta do Complexo de Áreas Protegidas de Carajás	
<b>PROD. TEC. ITV DS N043/2022</b>	<b>Revisão</b>
<b>Classificação:</b> ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( x ) Pública	<b>00</b>

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

#### Citar como

COSTA, Cláudia Priscila Wanzeler da; *et al.* **Estimativa da regulação do clima regional pela floresta do Complexo de Áreas Protegidas de Carajás.** Belém: 2022. (Relatório N043/2022) DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2022.43.Costa

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C991 Costa, Cláudia Priscila Wanzeler da.  
 Estimativa da regulação do clima regional pela floresta do Complexo de Áreas Protegidas de Carajás. / Cláudia Priscila Wanzeler da Costa ... [et al.] - Belém: 2022.  
 25 p. : il.  
 Relatório Técnico (Instituto Tecnológico Vale) – 2022  
 PROD.TEC.ITV.DS – N043/2022  
 DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2022.43.Costa  
 1. Climatologia - região. 2. Mudança da terra. 3. Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas. 4. Complexo de Áreas Protegidas – Carajás (PA). I. Tedeschi, Renata. II. Souza, Everaldo Barreiros de. III. Giannini, Tereza Cristina. IV. Título

Bibliotecário responsável: Eddie Saraiva / CRB 2 – 058P

## RESUMO EXECUTIVO

O presente relatório técnico traz uma análise dos efeitos da mudança da cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHI) para a regulação do clima regional. Foram realizadas três simulações com modelagem climática de altíssima resolução, que consistiram da substituição parcial (sem a Flona de Carajás) e total da cobertura florestal na BHI por mosaico de pastagem/floresta, e um experimento denominado Controle, referente a cobertura florestal atual na região. A interpretação física foi baseada nas equações do balanço de energia e do balanço hídrico e as análises feitas para dois regimes sazonais da região. Os resultados demonstram que a conversão da cobertura florestal em pastagens causaria alterações no balanço hídrico e energético sobre a BHI, em ambos regimes sazonais (seco e chuvoso). Tais evidências indicam o papel fundamental de áreas protegidas com cobertura florestal no domínio de bacias hidrográficas, como o BHI, para a regulação do clima e também para reduzir os efeitos do aquecimento global sobre a região.

## RESUMO

A cobertura da terra está intrinsecamente relacionada ao clima regional, de tal modo que modificações nesta estrutura podem acarretar alterações nos padrões regionais de variáveis climáticas. A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHI), no sudeste do estado do Pará, está localizada dentro do chamado arco do desmatamento e tem sofrido mudanças em sua paisagem nas últimas quatro décadas. No entanto, nesta região, ainda há muitas áreas com cobertura de floresta primária e preservadas, como a Floresta Nacional de Carajás. Dado o importante papel da Floresta na regulação do clima, este trabalho teve como objetivo investigar os impactos regionais da mudança da cobertura da terra na BHI sobre o balanço energético e hídrico através de simulações com o modelo climático RegCM4, para o período de 1994 a 2018. Os experimentos consistiram basicamente em simular a substituição parcial e total da cobertura florestal nas áreas de proteção da BHI por mosaico de pastagem/floresta, bem como um experimento denominado Controle onde se mantinha a cobertura florestal atual na região de estudo. A interpretação física dos impactos dessas alterações foi baseada nas equações do balanço de energia e do balanço hídrico na região, enfatizando a precipitação e a temperatura do ar. Os resultados demonstram que a conversão da cobertura florestal em pastagens causaria alterações no balanço hídrico e energético sobre a BHI, evidenciado nos dois regimes sazonais (seco e chuvoso). Tais evidências indicam o papel fundamental na regulação climática regional, de áreas protegidas de floresta no domínio de bacias hidrográficas, como o BHI, especialmente a Floresta Nacional de Carajás, onde observou-se alterações de maior intensidade nas variáveis climáticas analisadas.

**Palavras-chave:** Mudança da cobertura da terra, Clima, Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

## ABSTRACT

Land cover is intrinsically related to the regional climate, in such a way that changes in this structure can lead to changes in regional patterns of climate variables. The Itacaiunas River Basin (BHI), in the southeast of the state of Pará, is located within the so-called arc of deforestation and has undergone changes in its landscape over the last four decades. However, in this region, there are still many areas covered by primary and preserved forest, such as the Carajas National Forest. Given the important role of the Forest in climate regulation, this work aimed to investigate the regional impacts of land cover change in BHI on the energy and water balance through simulations with the RegCM4 climate model, for the period from 1994 to 2018. The experiments basically consisted of simulating the partial and total replacement of forest cover in the BHI protection areas by a pasture/forest mosaic, as well as an experiment called Control where the current forest cover was maintained in the study region. The physical interpretation of the impacts of these alterations was based on the energy balance and water balance equations in the region, emphasizing precipitation and air temperature. The results demonstrate that the conversion of forest cover into pasture would cause changes in the water and energy balance on the BHI, evidenced in the two seasonal regimes (dry and rainy). Such evidence indicates the fundamental role in regional climate regulation of protected forest areas in the domain of watersheds, such as the BHI, especially the Carajas National Forest, where greater intensity changes were observed in the analyzed climate variables.

**Keywords:** Land cover change, Climate, Itacaiunas River Watershed

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 (a) Localização e delimitação da área de estudo, Bacia Hidrográfica do Itacaiúnas (BHI), com seus principais aspectos fisiográficos e disposição espacial das estações meteorológicas cujos dados de precipitação são utilizadas neste estudo (triângulos) e (b) Mapa do uso e cobertura da terra na BHI com os limites do mosaico de áreas protegidas..... 111
- Figura 2 (a) Ciclo anual e (b) percentual mensal da precipitação na região de estudo, considerando as séries de dados mensais de todas as 10 estações distribuídas na região de estudo, referente ao período de 1994 a 2018..... 133
- Figura 3 a) séries temporais da precipitação sazonal dos regimes chuvoso e seco considerando a média das 10 estações e o CRU recortado na BHI; b) Gráfico de dispersão entre as séries sazonais das estações e CRU. Período base: 1994 a 2018. .... 144
- Figura 4 Topografia (em metros) da grade global do ERA Interim (à esquerda) com resolução de 1,5° e domínio do modelo climático RegCM4 (à direita) com resolução de 0,09° sobre a BHI. .... 166
- Figura 5 Configuração dos experimentos de uso e cobertura da terra no modelo climático considerando: (a) condições originais (Landuse1) e substituição da floresta por mosaico de pastagem/floresta (b) somente na Floresta Nacional de Carajás (Landuse2) e (c) em todas áreas protegidas (Landuse3). Resolução da grade do modelo: 0,09° (~10 km). FNC: Floresta Nacional de Carajás e APs: Áreas de Proteção. .... 177
- Figura 6 Boxplots (painéis à esquerda) e gráficos de dispersão (painéis à direita) da precipitação observada (CRU) e simulada (RegCM4 com o Landuse1) para os regimes seco (painel superior) e chuvoso (painel inferior) sobre a BHI. Onde RegCM\_EMA refere-se ao esquema de parametrização de precipitação convectiva de Emanuel; RegCM\_TIE o esquema de Tiedtke; e RegCM\_KF, o esquema de Kain Fritsch..... 199
- Figura 7 Mudanças na temperatura do ar (T, em °C) da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas associado a mudança da cobertura florestal nos regimes sazonais seco (a) e chuvoso (b) para os experimentos com RegCM4. Em (a) e (b), os painéis superiores

referem-se ao Landuse2 (Sem a Flona de Carajás) menos Landuse1 (Controle), enquanto os Painéis inferiores, referem-se ao Landuse3 (sem floresta nas áreas de protegidas) menos Landuse1 (Controle). H representa o fluxo calor sensível e LE, o fluxo de calor latente. ....211

Figura 8 Mudanças na precipitação (P, mm) da bacia hidrografica do Rio Itacaiúnas associado a mudança da cobertura florestal nos regimes sazonais seco (a) e chuvoso (b) para os experimentos com RegCM4. Em (a) e (b), os paineis superiores referem-se ao Landuse2 (Sem a Flona de Carajás) menos Landuse1 (Controle), enquanto os Painéis inferiores, referem-se ao Landuse3 (sem floresta nas áreas de protegidas) menos Landuse1 (Controle). E representa a Evapotranspiração, e C a convergência (colorido) e fluxo (setas) de umidade. ....233

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
2.1	REGIÃO DE ESTUDO .....	10
2.2	AVALIAÇÃO DOS REGIMES SAZONAIS NA ÁREA DE ESTUDO .....	12
2.3	MODELAGEM CLIMÁTICA REGIONAL E EXPERIMENTOS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS.....	15
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>18</b>
3.1	QUAL MELHOR SETUP DO REGCM4 PARA BHI? .....	18
3.2	EFEITOS DAS MUDANÇAS DE COBERTURA DA TERRA NO CLIMA REGIONAL DA BHI ..	20
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>24</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>24</b>



## 1 INTRODUÇÃO

No contexto global de mudanças climáticas, os novos padrões nas variáveis climáticas já são observados e trazem sérios problemas para a sociedade, sendo seus impactos regionais reforçados por mudanças na cobertura da terra. Em regiões tropicais como a Amazônia, por exemplo, esses impactos atuam diretamente na temperatura do ar superficial, evapotranspiração e precipitação e, por sua vez, no ciclo hidrológico (Dias et al., 2014; Souza-Filho et al., 2016). A cobertura da terra está intrinsecamente relacionada ao clima regional. A literatura científica relata a existência de uma retroalimentação entre o clima e a cobertura vegetal através dos elementos biofísicos como o albedo, mudanças no calor sensível e no calor latente, na rugosidade da superfície entre outros (Shukla et al., 1990; Foley et al., 2003; Coe et al., 2009; Bagley et al., 2014). Essas alterações, por sua vez, podem causar mudanças na temperatura, precipitação e na radiação solar que é absorvida pela superfície terrestre. Este ciclo pode ocorrer de forma inversa também, ou seja, o aquecimento global pode afetar a cobertura vegetal por meio de mudanças na temperatura, precipitação e radiação líquida. Mudanças na cobertura vegetal e nas propriedades da superfície podem, por sua vez, afetar o clima regional, e a longo prazo, o clima global.

A importância da floresta no ciclo hidrológico vem sendo estudada em todo o mundo desde 1970, onde estudos como o de Makarieva et al. (2013) sugerem que a vegetação desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico regional. Um dos maiores problemas causados pela remoção da floresta é a liberação do carbono armazenado nesta região, que é um dos maiores reservatórios do planeta (Fearnside 2016; Nogueira et al. 2017).

Um estudo de Souza-Filho et al. (2016), buscou investigar as possíveis consequências das mudanças na cobertura do solo (floresta e cerrado) e uso do solo (pastagens, mineração e urbanização) sobre a hidroclimatologia da Bacia do Rio Itacaiúnas (BHI), localizada no sudeste da Amazônia. Os autores observaram que o atual cenário de uso e cobertura da terra na bacia, que perdura desde 2004, é composto pela presença de floresta primária nas áreas protegidas, localizadas na porção centro-oeste da bacia, e demais áreas, compostas por pastagens/agricultura/urbanização. As transformações na paisagem na BHI nos

últimos 40 anos (de 1973 a 2013) resultaram em mudanças na hidroclimatologia da bacia.

Dado o contexto de mudanças na paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHI) nas últimas quatro décadas e a importância das florestas, ainda protegidas por unidades de conservação e pela Vale, na regulação do clima regional, este trabalho faz uma abordagem observacional e de modelagem climática com a intenção de caracterizar os principais regimes sazonais sobre a BHI e investigar os impactos regionais da cobertura da terra no balanço energético e no balanço hídrico através de simulações com o modelo climático RegCM4, referente ao período de 1994 a 2018.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

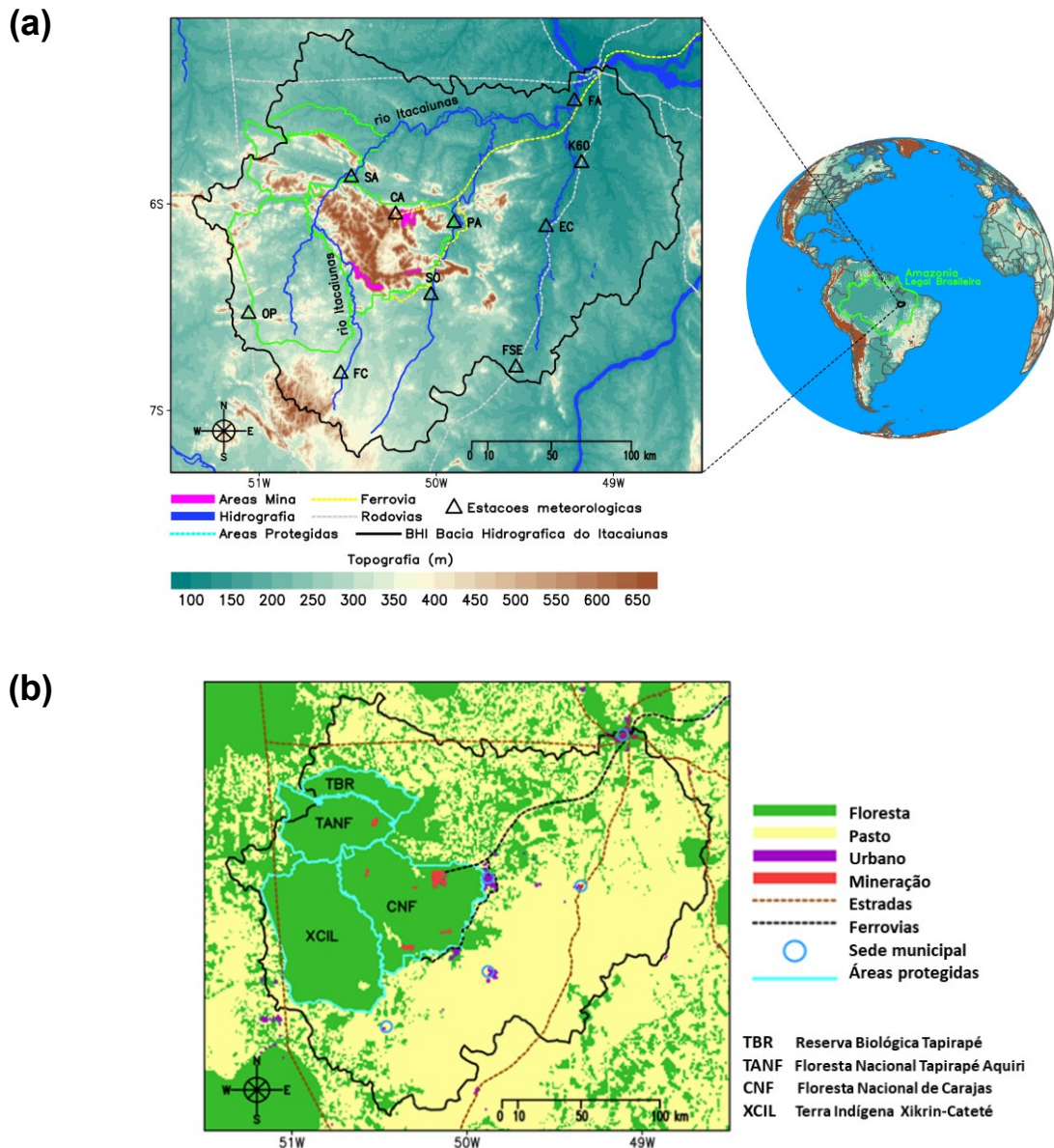
### **2.1 Região de estudo**

A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (Fig. 1a), a partir daqui denominada BHI, tem uma área de aproximadamente 41.300 km<sup>2</sup>, e está localizada no leste da Amazônia Legal Brasileira, mais precisamente no sudeste do estado do Pará, que por sua vez encontra-se dentro do conhecido Arco do Desmatamento Amazônico (Lui e Molina, 2009). O rio Itacaiúnas nasce na área de alta topografia situada no sudeste da bacia e corre para o norte cruzando a Serra dos Carajás com elevações de 400 a 700 metros na parte centro/oeste, depois flui pela planície norte/nordeste variando de 100 a 300 m (Fig. 1a).

Souza-Filho et al. (2016) conduziram um estudo multidecadal de mapeamento de mudanças de cobertura do solo na região do BHI e evidenciaram que o desmatamento induzido pelo homem durante um período de 40 anos (1973 a 2013) resultou em alterações significativas da paisagem, de modo que apenas ~48% da floresta tropical primária possui cobertura ainda conservada, enquanto as pastagens predominam em mais da metade da área da bacia. No mapa de uso e cobertura da terra (Fig. 1b) é possível identificar uma área em torno de 12.000 km<sup>2</sup> de floresta tropical remanescente dentro do mosaico de áreas protegidas na porção centro-oeste. Essas áreas protegidas são formadas por terras indígenas e unidades de conservação de uso integral ou sustentável, que têm jurisdição federal e são monitoradas pelo

Instituto Brasileiro de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO). No restante da bacia (fora das áreas protegidas) nota-se a predominância de pastagens em toda a região com a presença de alguns núcleos urbanos e vários pequenos fragmentos de vegetação, principalmente na porção nordeste (Fig. 1b). Outro aspecto importante é a atividade de mineração que ocorre nas áreas topográficas mais altas da Floresta Nacional de Carajás (FNC), cuja produção de minério de ferro é transportada pela ferrovia em direção ao nordeste da região.

Figura 1 (a) Localização e delimitação da área de estudo, Bacia Hidrográfica do Itacaiúnas (BHI), com seus principais aspectos fisiográficos e disposição espacial das estações meteorológicas cujos dados de precipitação são utilizadas neste estudo (triângulos) e (b) Mapa do uso e cobertura da terra na BHI com os limites do mosaico de áreas protegidas.



Fonte: elaborado pelos autores.

## 2.2 Avaliação dos regimes sazonais na área de estudo

O estudo observacional dos regimes sazonais sobre a região de estudo foi conduzido a partir de dados mensais de precipitação proveniente de 10 estações meteorológicas distribuídas na BHI (Fig. 1a e Tabela 1), e o período selecionado para estudo foi de 1994 a 2018 (25 anos).

Tabela 1 Estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

NOME DA ESTAÇÃO	SIGLA	LONGITUDE	LATITUDE	PERÍODO	FONTE
Carajás	CA	-50,23	-6,05	1994 a 2020	ITV
Eldorado dos Carajás	EC	-49,38	-6,11	1994 a 2020	ANA/CPRM
Fazenda Alegria	FA	-48,22	-5,50	2006 a 2020	ANA/CPRM
Fazenda Caiçara	FC	-50,54	-6,82	1994 a 2020	ANA/CPRM
Fazenda Santa Elisa	FSE	-49,55	-6,79	1994 a 2020	ANA/CPRM
Km 60	K60	-49,18	-5,80	1994 a 2020	ANA/CPRM
Onça Puma	OP	-51,06	-6,53	2013 a 2020	ITV
Parauapebas	PA	-49,90	-6,09	1994 a 2020	ANA/CPRM
Salobo	SA	-50,48	-5,87	2013 a 2020	ITV
Sossego	SO	-50,03	-6,44	2013 a 2020	ITV

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico;  
CPRM: Serviço Geológico do Brasil

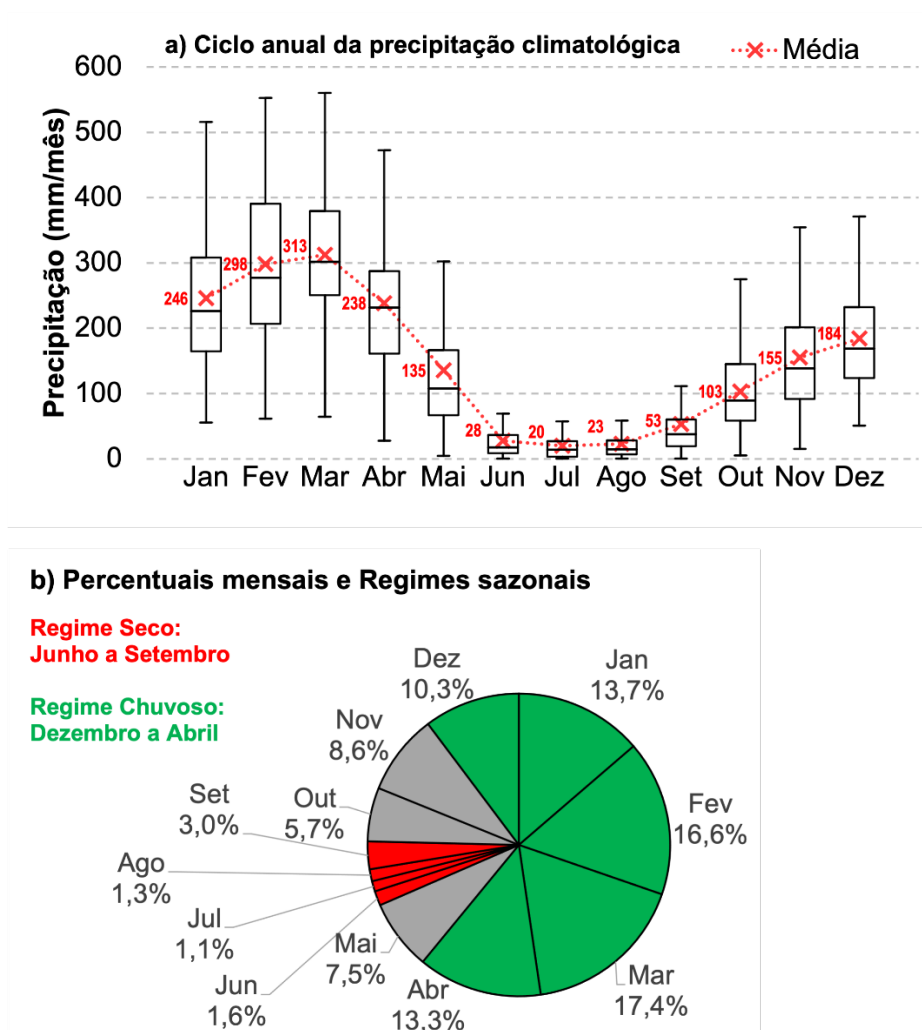
ITV: Instituto Tecnológico Vale;

Fonte: elaborado pelos autores.

A caracterização climatológica dos regimes pluviométricos no BHI foi baseada na análise das séries temporais mensais dos dados das 10 estações in situ (Tab 1). A Figura 2a, refere-se ao ciclo anual da precipitação sobre a BHI, o qual demonstra ser bastante acentuado ao longo do ano, com valores máximos atingindo uma média de 298 mm em fevereiro e 313 mm em março, enquanto os valores mínimos chegam a 20 mm em junho e 23 mm em agosto. Os regimes sazonais foram delimitados, quantitativamente, pelos percentagens mensais relativas ao total anual de precipitação climatológica e são mostrados na Figura 2b. Nela, o critério de definição do regime chuvoso é indicado pelos meses consecutivos em que os percentuais mensais foram maiores que 10%, que segundo este critério, refere-se ao período de

dezembro a abril, enquanto o regime seco, os meses consecutivos com percentuais mensais inferiores a 5%, abrangendo o período de junho a setembro.

Figura 2 (a) Ciclo anual e (b) percentual mensal da precipitação na região de estudo, considerando as séries de dados mensais de todas as 10 estações distribuídas na região de estudo, referente ao período de 1994 a 2018.



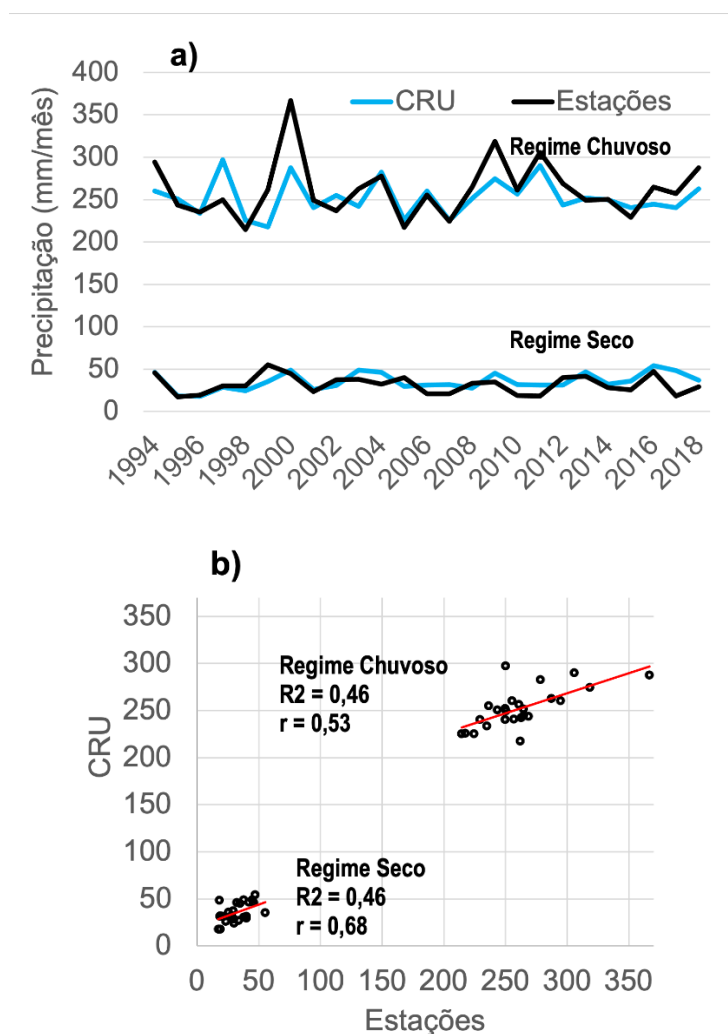
Fonte: elaborado pelos autores.

Os impactos da mudança de cobertura da terra no clima regional da BHI serão avaliados em termos de alterações nas variáveis meteorológicas de precipitação e temperatura. Para tanto, avaliou-se base de dados observacional em ponto de grade de alta resolução espacial, 0,05°, adequada para analisar a variabilidade espacial em escala regional, do Climatic Research Unit gridded Time Series (CRU-TS, Harris et al. (2020), a partir daqui denominado por CRU, no período de 1994 a 2018.

A avaliação foi feita analisando-se a média da precipitação das 10 estações meteorológicas sobre a região de estudo e comparados com a série de dados de precipitação do CRU, recortados sobre a BHI, nos regimes sazonais determinados anteriormente, mostrada na Figura 3. Nela, observa-se que o CRU representa bem a variabilidade interanual da precipitação nos regimes sazonais sobre a BHI (Fig 3a) e apresenta uma boa correlação (Fig 3b) com os dados das estações in situ, principalmente no regime seco (0,68).

A base de dados de precipitação e de temperatura do ar do CRU serão utilizados para a comparações com as simulações com o modelo climático regional.

Figura 3 a) séries temporais da precipitação sazonal dos regimes chuvoso e seco considerando a média das 10 estações e o CRU recortado na BHI; b) Gráfico de dispersão entre as séries sazonais das estações e CRU. Período base: 1994 a 2018.



Fonte: elaborado pelos autores.

### 2.3 Modelagem climática regional e experimentos de mudança de cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Itacaiúnas

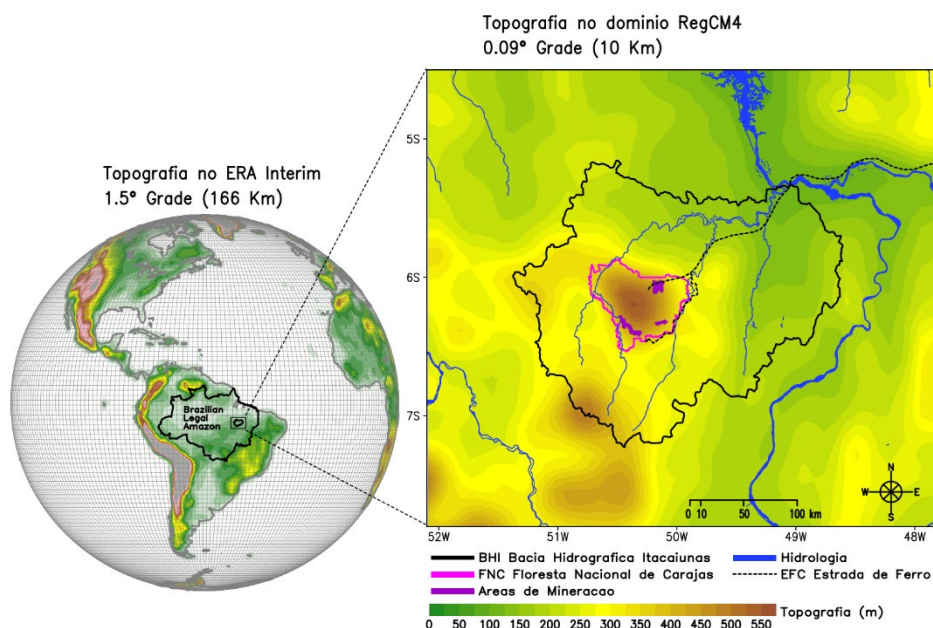
Realizou-se o *downscaling* dinâmico sobre a região de estudo utilizando-se a versão 4.7.1 do RegCM, a quarta geração do sistema de modelagem climática regional (Giorgi et al. 2012) desenvolvido pelo International Center for Theoretical Physics (ICTP). Esta última versão inclui a opção de núcleo dinâmico hidrostático ou não hidrostático baseado em coordenadas verticais sigma-p e múltiplas escolhas de diferentes modelos físicos e novos esquemas de parametrizações (Giorgi et al., 2012).

Neste trabalho, o RegCM4 foi compilado com o núcleo hidrostático usando o Esquema de Transferência de Atmosfera da Biosfera (BATS, Dickinson et al., 1993) para descrever os processos da superfície terrestre. Três experimentos RegCM4 com diferentes parametrizações de precipitação convectiva foram conduzidos: o esquema Emanuel (EMA) (Emanuel, 1999), o esquema Kain Fritsch (KFR) (Kain, 2004) e o esquema Tiedtke (TIE) (Tiedtke, 1989). Para terreno global e uso da terra, foram utilizadas as características de cobertura do solo global de resolução de 30s (GLCC) de Loveland et al. (2000) e dados de topografia GTOPO retirados do USGS.

As condições de contorno inicial e lateral (Temperatura da Superfície do Mar, umidade relativa, altura geopotencial, temperatura do ar, vento zonal e meridional) para RegCM4 foram baseadas no conjunto de dados ERA-Interim (ERA-I), de resolução espacial de 1,5°, atualizado a cada 6h. O domínio do RegCM4 foi definido sobre a região BHI, com ponto central a 52,0°W e 6,2°S, considerando um espaçamento de grade horizontal de 0,09° (~10 km), níveis verticais de 18 sigma-pressão com pressão máxima em 5 hPa. A Figura 4 mostra a topografia no domínio do ERA-I e do RegCM4, utilizados neste estudo.

Todas as simulações foram realizadas para uma integração contínua com início em 01 de janeiro de 1993 e término em 31 de dezembro de 2018. O primeiro ano é considerado um período de spin-up e não é incluído na análise, de modo que os resultados do modelo serão avaliados por um período de 25 anos (1994 a 2018).

Figura 4 Topografia (em metros) da grade global do ERA Interim (à esquerda) com resolução de 1,5° e domínio do modelo climático RegCM4 (à direita) com resolução de 0,09° sobre a BHI.



Fonte: elaborado pelos autores.

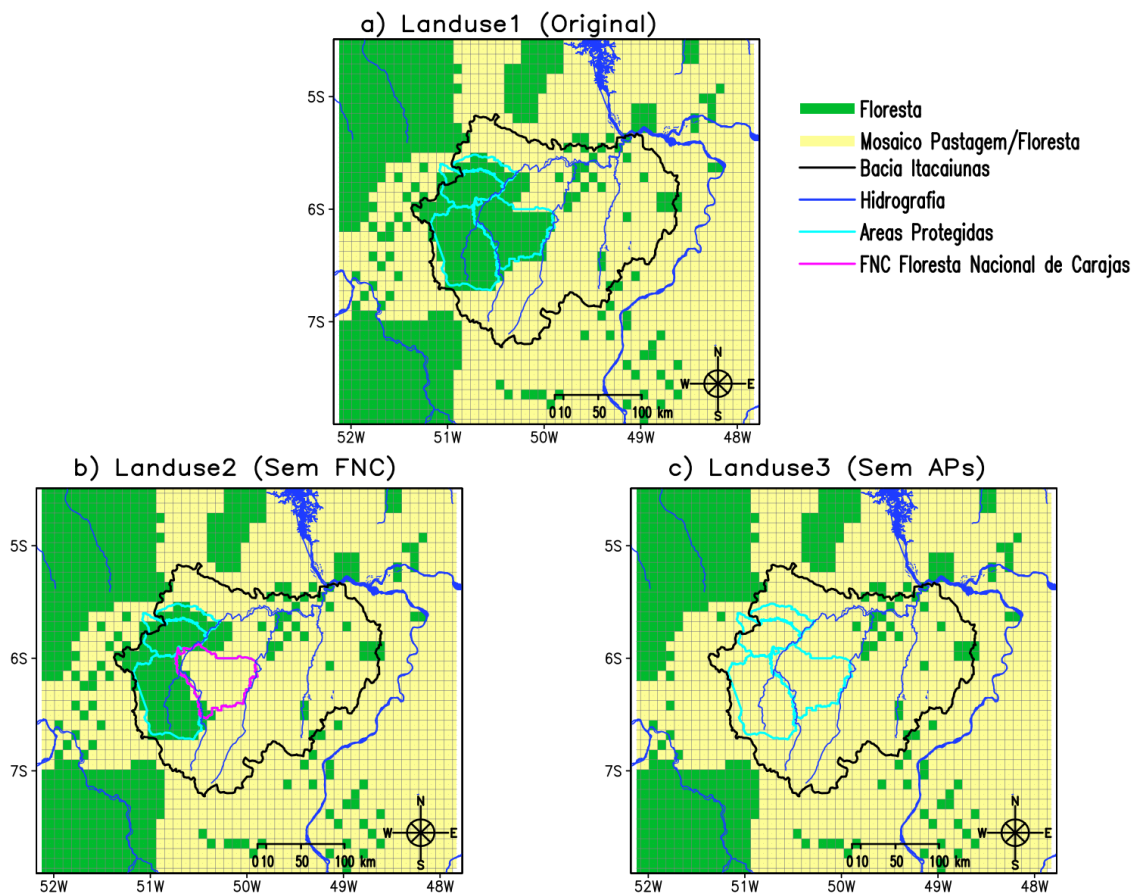
Os experimentos com o modelo climático foram conduzidos levando-se em consideração três diferentes tipos de cobertura da terra:

- Land use 1 (Fig. 5a): a cobertura da terra da BHI no RegCM4 foi atualizada para ser consistente com dados recentes do IBGE, sendo assim, considerado o experimento Controle do estudo, com área de floresta ainda intacta sobre a Flona de Carajás (FNC) e demais áreas de proteção (delimitação com linha azul clara);
- Land use 2 (Fig. 5b): a partir do Controle, a floresta de Carajás (Floresta Nacional de Carajás) foi substituída por mosaico pastagem/floresta;
- Land use 3: (Fig. 5c): a partir do Controle, toda a floresta das áreas protegidas (delimitado pela linha azul clara) foram substituídas por mosaico pastagem/floresta.

Na fig. 5, onde os quadradinhos preenchidos em verde representam cobertura florestal, enquanto os em amarelo, o mosaico de pastagem/floresta.



Figura 5 Configuração dos experimentos de uso e cobertura da terra no modelo climático considerando: (a) condições originais (Landuse1) e substituição da floresta por mosaico de pastagem/floresta (b) somente na Floresta Nacional de Carajás (Landuse2) e (c) em todas áreas protegidas (Landuse3). Resolução da grade do modelo: 0,09° (~10 km). FNC: Floresta Nacional de Carajás e APs: Áreas de Proteção.



Fonte: elaborado pelos autores.

As análises dos impactos da mudança de cobertura da terra na precipitação e na temperatura da BHI, que ajudarão a compreender a importância da cobertura florestal na regulação do clima regional, serão feitas, respectivamente, com base na interpretação física das equações do balanço de energia superficial e do balanço de água atmosférico.

No balanço de energia superficial (Hartmann, 1994), a energia disponível para os processos físicos e aquecimento do ar ( $R_n$ ) está em função da partição de energia representado na equação abaixo:

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

Onde **H** representa o calor sensível (watt.m<sup>-2</sup>), **LE** o calor latente (watt.m<sup>-2</sup>) e **G** o fluxo de calor no solo (watt.m<sup>-2</sup>).

O Calor latente e o calor sensível estão relacionados à energia liberada ou absorvida na atmosfera. Mudanças de fase de uma determinada substância tem a ver com o calor latente (ex. Líquido para vapor e vice-versa). Já o calor sensível está relacionado a mudanças na temperatura sem mudanças de fase da mesma. Em uma região de floresta, o calor latente é maior que o calor sensível. No entanto, quando é retirada a cobertura florestal, há aumento do calor sensível e diminuição do fluxo de calor latente. Este cenário, favorece o aumento da temperatura do ar localmente.

Na equação do balanço hídrico regional (eq. 2), o armazenamento de água na bacia (**dw/dt**) vai depender do aporte de precipitação (**P**) e duas saídas: a evapotranspiração (**E**) e a convergência de umidade (**C**), que provém do transporte de umidade feita pelos ventos.

$$\frac{dw}{dt} = P + E + C \quad (2)$$

O termo **dw/dt**, para médias de longo prazo, como sazonais, é desprezado (Peixoto e Oort, 1992; Satyamurty et al., 2013), ficando assim, o aporte de água pela precipitação em função da evapotranspiração e da convergência de umidade:

$$P = - E + C \quad (3)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

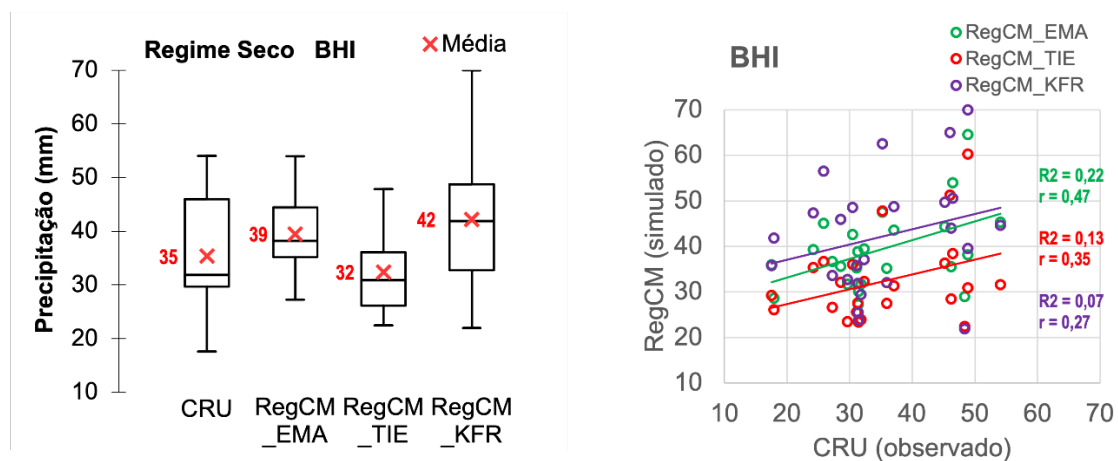
#### 3.1 Avaliando a melhor configuração convectiva do RegCM4 para a BHI

A figura 6 contém as análises estatísticas que avaliam a parametrização convectiva no RegCM4, considerando o experimento controle, mais indicada para estudar os impactos da mudança da cobertura da terra no clima regional da BHI. No *box plot*, podemos notar que para o período seco, grande parte da massa de dados da distribuição da variável precipitação sobre a BHI (CRU) está localizada mais próxima do 1º quartil e com média de 35mm/mês, e dentre as parametrizações avaliadas, a de Emanuel (ReCM\_EMA) é quem mais se aproxima da distribuição do CRU, que é reforçado, no gráfico de dispersão (à direita da Fig. 6), com melhor coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>=0,22) e correlação (r=0,47). Por outro lado, para o

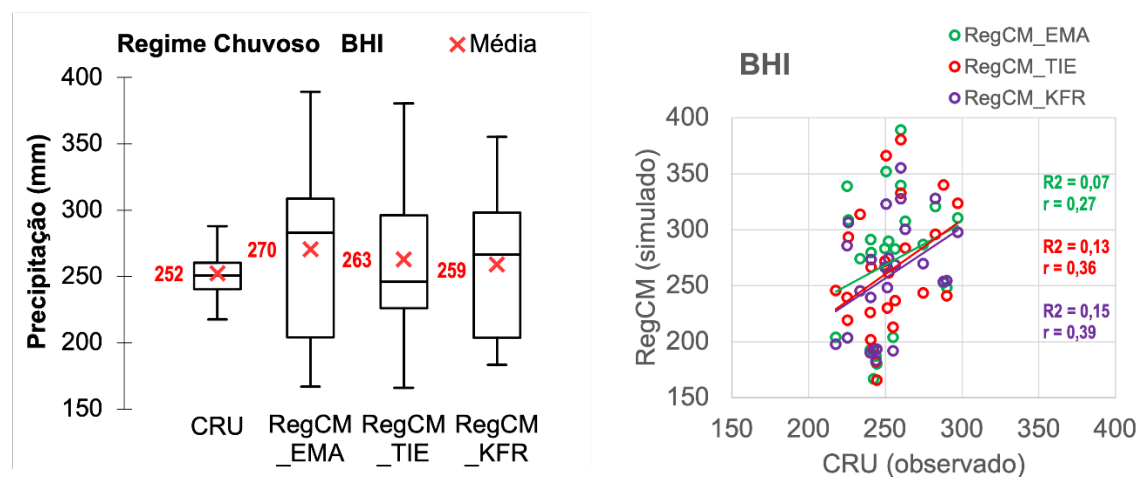
regime chuvoso, a distribuição dos dados observados (CRU) demonstra pouca amplitude, cuja a média da precipitação, 252mm, é aproximadamente a mediana da distribuição. Sobre a parametrização convectiva no RegCM4 mais indicada para o estudo no regime chuvoso, aproxima-se mais da distribuição dos dados observados, a simulação com o esquema de Kain Fritsch (*box plot* da Fig. 6, no painel inferior à esquerda), com média de 259mm, bem próximo da mediana da distribuição, e que apresenta os maiores valores quantitativos de correlação ( $r=0,39$ ) e coeficiente de determinação (0,15) no gráfico de dispersão (Fig. 6, painel inferior, à direita).

Figura 6 *Boxplots* (painéis à esquerda) e gráficos de dispersão (painéis à direita) da precipitação observada (CRU) e simulada (RegCM4 com o Landuse1) para os regimes seco (painel superior) e chuvoso (painel inferior) sobre a BHI. RegCM\_EMA refere-se ao esquema de parametrização de precipitação convectiva de Emanuel; RegCM\_TIE o esquema de Tiedtke; e RegCM\_KF, o esquema de Kain Fritsch.

### Regime Seco



### Regime Chuvoso



Fonte: elaborado pelos autores.

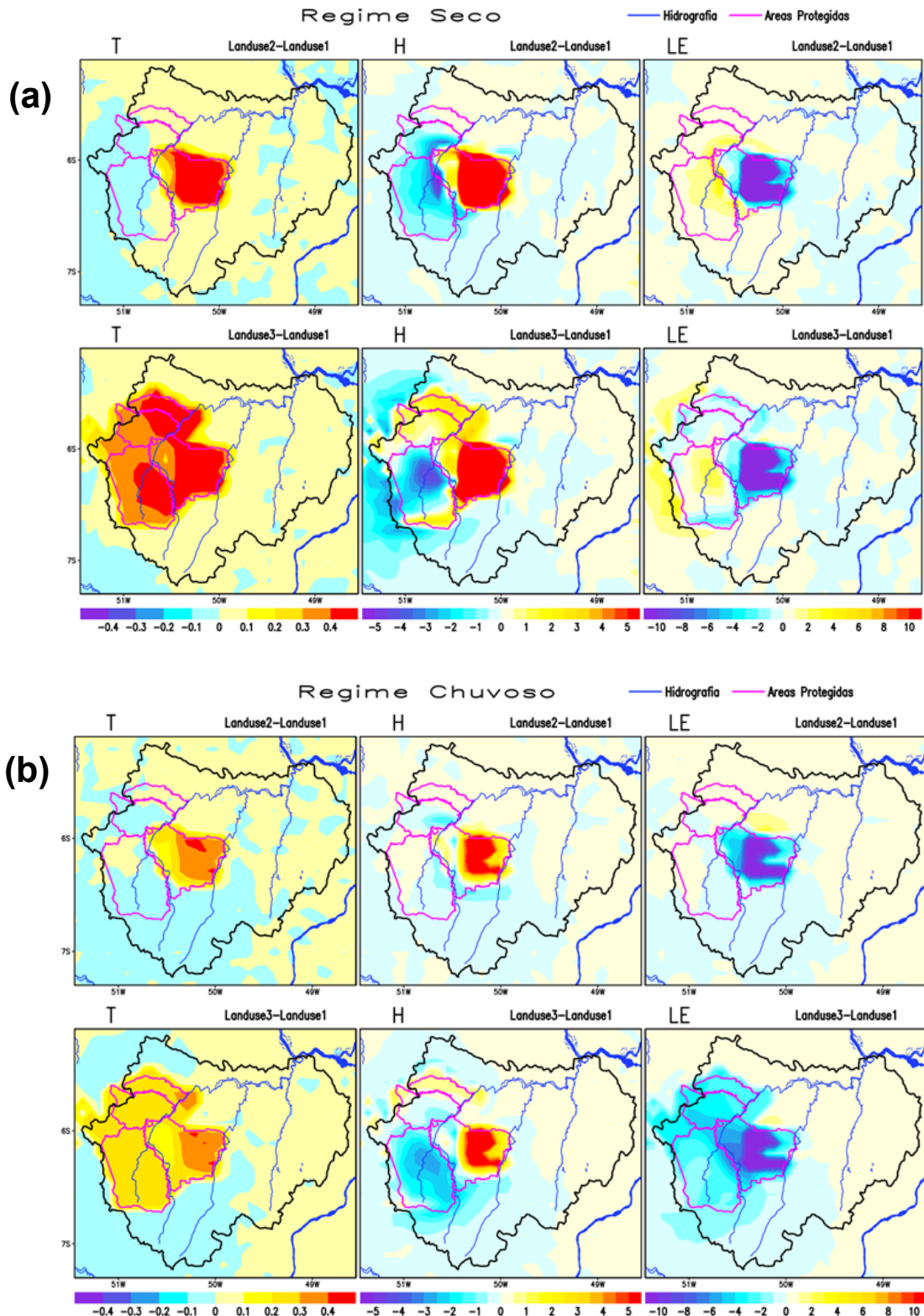
### **3.2 Efeitos das mudanças de cobertura da terra no clima regional da BHI**

A partir das figuras 7 e 8 são feitas as análises do impacto da mudança de cobertura da terra na BHI no clima regional da BHI, particularmente na temperatura do ar (°C) e na precipitação (mm), respectivamente, obtidas a partir simulação com RegCM4 configurado com esquema de Kain Fritsch para o regime seco e com o esquema de Emanuel para o regime chuvoso, configurações melhores avaliadas para cada regime sazonal na BHI no período de 25 anos (1994-2018). A mudança de cobertura da terra foi basicamente simulada pela substituição da floresta, no modelo climático, por mosaico pastagem/floresta, e a interpretação física é baseada nas equações dos balanços de energia (Eq. 1) e hídrico (Eq. 3). Na diferença entre os experimentos Landuse2 e Landuse1 são considerados os efeitos das mudanças relativas somente à Floresta Nacional de Carajás (Flona de Carajás), enquanto a diferença entre o Landuse3 e Landuse, os efeitos relativos a todas as áreas protegidas na BHI.

Quando se compara em função do regime sazonal, observa-se, em geral, que há diferenças regionais nas variáveis do balanço de energia (Fig. 7), com maior intensidade no regime seco. O aumento da temperatura (valores positivos na legenda da figura) em grande parte da BHI, principalmente sobre a Flona de Carajás (diferença acima de 0,3°C), em ambos os experimentos, se dá pela substituição da cobertura florestal por pastagem. Este aumento na temperatura do ar próximo à superfície está associado a um aumento do fluxo de calor sensível e diminuição do fluxo calor latente. Este resultado, está condizente com o encontrado por trabalhos científicos como os de Foley et al. (2003), von Randow et al. (2004), de Oliveira et al. (2018) entre outros.

De acordo com Llopart et al. (2018) mudanças na vegetação alteram a fotossíntese e impactam a transpiração. A cobertura vegetal rasteira, representada pelo mosaico pastagem nos experimentos, apresenta menor capacidade de transpiração que a floresta, onde menos energia será usada para o processo de evaporação e a energia excedente é, então, usada para aquecer a atmosfera logo acima da superfície, alterando assim, o balanço de energia localmente.

Figura 7 Mudanças na temperatura do ar (T, em °C) da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas associado a mudança da cobertura florestal nos regimes sazonais seco (a) e chuvoso (b) para os experimentos com RegCM4. Em (a) e (b), os painéis superiores referem-se ao Landuse2 (Sem a Flona de Carajás) menos Landuse1 (Controle), enquanto os painéis inferiores, referem-se ao Landuse3 (sem floresta nas áreas de protegidas) menos Landuse1 (Controle). H representa o fluxo calor sensível ( $\text{watt.m}^{-2}$ ) e LE, o fluxo de calor latente ( $\text{watt.m}^{-2}$ ).



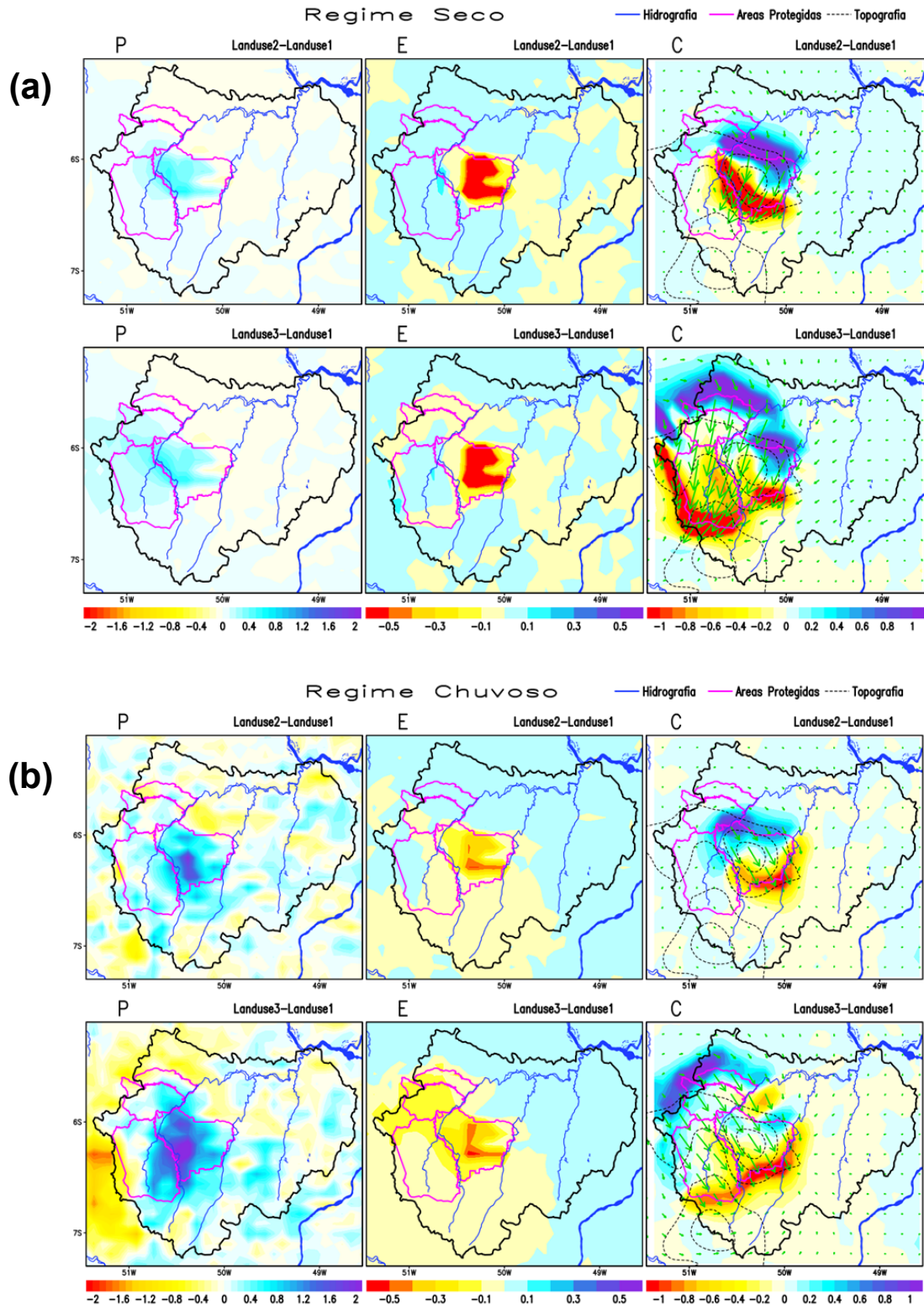
Fonte: elaborado pelos autores.

As análises das variáveis do balanço hídrico na BHI, referente aos experimentos de cobertura da terra, são mostradas na figura 8. Na legenda, com exceção para a Convergência de umidade (C), os valores negativos (cores do amarelo ao vermelho) indicam redução na variável, ao considerar a diferença entre os experimentos, enquanto os positivos (azul ao lilás), indicam aumento.

Ao se comparar os regimes sazonais, observam-se diferenças marcantes nas variáveis do balanço hídrico, principalmente na precipitação, onde o aumento é intenso no regime chuvoso (Fig. 7b). Esse aumento na precipitação tem que estar contrabalanceado na equação do balanço hídrico em termos de Evapotranspiração (diminuição) e de Convergência de umidade. Em relação a esta última variável (Fig. 8), nos experimentos realizados neste estudo, nota-se algumas particularidades e por conta disso, também foi plotado no mapa, a topografia da região (linhas pontilhadas em preto, que possuem valores de 300, 400 e 500m). Essa topografia também influencia na diferença do fluxo de umidade (setas verdes nos painéis da variável C) que é observada nos dois regimes sazonais, e que por sua vez, vai determinar a convergência da umidade sobre a área cuja cobertura foi modificada.

De uma forma climatológica, temos um padrão de divergência do vento antes da topografia mais acentuada, e de convergência da umidade sobre esta mesma topografia, o que por sua vez favorecerá a formação de nuvens e, por conseguinte, a precipitação. Nos experimentos neste estudo, ao simular a retirada da floresta localizada sobre relevo acentuado (Flona de Carajás), inicialmente, há o aumento do escoamento do vento e do fluxo de umidade por conta da perda de rugosidade da superfície, que indica mudança no padrão de divergência e convergência no relevo acentuado. Sem a presença da floresta, há diminuição da divergência antes do relevo acentuado, enquanto a convergência sobre este relevo, aumenta. Isto poderia explicar as áreas em vermelho da convergência após o relevo acentuado. No entanto, se faz necessário análises mais profundas sobre isso, uma vez que há influência da dinâmica de grande escala do fluxo de umidade e que pode influenciar no fluxo local ou regional.

Figura 8 Mudanças na precipitação (P, mm) da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas associadas à mudança da cobertura florestal nos regimes sazonais seco (a) e chuvoso (b) para os experimentos com RegCM4. Em (a) e (b), os painéis superiores referem-se ao Landuse2 (Sem a Flona de Carajás) menos Landuse1 (Controle), enquanto os Painéis inferiores, referem-se ao Landuse3 (sem floresta nas áreas de protegidas) menos Landuse1 (Controle). E representa a Evapotranspiração, e C a convergência (colorido) e fluxo (setas) de umidade.



Fonte: laborado pelos autores.

## 4 CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações de mudanças na cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas no período de 1994 a 2018, utilizando-se modelagem climática regional e seus efeitos sobre o clima regional. Os experimentos consistiram basicamente da substituição da cobertura florestal parcial e total nas áreas de proteção na BHI por mosaico de pastagem/floresta, visando identificar o papel da floresta na regulação climática regional. A interpretação física foi baseada nas equações do balanço de energia e do balanço hídrico na região. Os resultados demonstram que a conversão da cobertura florestal em pastagens causaria alterações no balanço hídrico e energético sobre a BHI, evidenciado nos dois regimes sazonais (seco e chuvoso). Tais evidências indicam o papel fundamental de áreas protegidas com cobertura florestal no domínio de bacias hidrográficas, como o BHI, dentro do arco de desmatamento da Amazônia, para a regulação climática regional.

As Florestas protegidas pelo ICMBIO e VALE na BHI, bem como as ações de recuperação de áreas degradadas, são essenciais para manter a regulação climática regional e mitigar os efeitos do aquecimento global. Além disso, garantem a biodiversidade e geram renda para as comunidades próximas ao projeto de mineração, contribuindo para uma indústria de mineração mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

Bagley, J.E.; Desai, A.R.; Harding, K.J.; Snyder, P.K.; Foley, J.A. (2014) Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *J Clim* 27:345–361

Coe, M.T.; Costa, M.G.; Soares-Filho, B.S. (2009) The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River–Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J Hydrol* 369:165–174

de Oliveira, J.V., Ferreira, D.B.d., Sahoo, P.K. et al. (2018) Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. *Environ Earth Sci* 77, 239. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7411-9>

Dias, L.C.P.; Macedo, M.N.; Costa, M.H.; Coe, M.T.; Neill, C. (2015) Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the upper Xingu river Basin, Central Brazil. *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, v. 4, p. 108-122.



Dickinson, R.E.; Henderson-Sellers, A.; Kennedy, P.J. (1993) Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research (NCAR Technical Note, NCAR/TN-387). Doi: [10.5065/D67W6959](https://doi.org/10.5065/D67W6959)

Emanuel, K.A.; Zivkovic-Rothman, M. (1999) Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, 56, 1766–1782.

Fearnside, P. (2016) Brazil's Amazonian forest carbon: the key to Southern Amazonia's significance for global climate. *Res Environ Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113016-1007-2>

Foley, J.A.; Costa, M.H.; Delire, C.; Ramankutty, N.; Snyder, P. (2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1: 38-44. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0038:GSHTEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0038:GSHTEC]2.0.CO;2)

Giorgi, F. *et al.* (2012) RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.*, v. 52, p. 7-29.

Hartmann, D.L. (1994) *Global Physical Climatology*; Academic Press: New York, NY, USA.

Harris, I. *et al.* (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 7, v. 109. Doi: [10.1038/s41597-020-0453-3](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3)

Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 1, p. 170-181.

Llopart, M., Reboita, M.S., Coppola, E., Giorgi, F., Porfírio da Rocha, R., De Souza D. O. (2018). Land use change over the amazon forest and its impact on the local climate. *Water* 10:149. doi: [10.3390/w10020149](https://doi.org/10.3390/w10020149)

Loveland, T.R. *et al.* (2000) Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, p. 1303-1330. Doi: [10.1080/014311600210191](https://doi.org/10.1080/014311600210191)

Lui, G.; Molina, S. (2009) OCUPAÇÃO HUMANA E TRANSFORMAÇÃO DAS PAISAGENS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA. *Amazônica - Revista de Antropologia*.

Makarieva, A. M.; Gorshkov, V. G.; Sheil, D.; Nobre, A. D.; Li, B. -L. (2013) Where Do Winds Come from? A New Theory on How Water Vapor Condensation Influences Atmospheric Pressure and Dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 1039-1056. doi [10.5194/acp-13-1039-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-1039-2013)

Nogueira, E.M.; Yanai, A.M; Vasconcelos, S.S.; Graça P.M.L.A.; Fearnside, P.M. (2017) Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia. *Reg Environ Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1198-1>

Peixoto, J.P., Oort, A.H. (1992) *Physics of climate*. American Institute of Physics. San Diego, CA, USA: MIT press, 520 pp.

Satyamurty, P., Costa, C.P.W., Manzi, A.O. (2013) Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 111, p. 195-209. doi:10.1007/s00704-012-0637-7

Shukla, J.; Nobre, C.; Sellers, P. (1990) Amazon deforestation and climate change. *Science* 247:1322-1325

Souza-Filho, P.W.M. et al. (2016) Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiunas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, v. 167, p. 175-184.

Tiedtke, M. (1989) A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large Scale Models. *Mon. Monthly Weather Review*, 117, 1779-1800.

von Randow, C., Manzi, A.O., Kruijt B. et al (2004) Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theor Appl Climatol* 78:4-26