



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**CONSEQUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA  
MÉDIA GLOBAL EM 1,5°C E 2°C NO BALANÇO HÍDRICO  
PARA O EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL**

---

**Rafael Bitencourt Benassi**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2020**

# **CONSEQUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM 1,5°C E 2°C NO BALANÇO HÍDRICO PARA O EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL**

---

**por**

**Rafael Bitencourt Benassi**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Área de concentração/Linha de pesquisa:**

Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Clima e Sustentabilidade

**Orientadora:**

Prof<sup>a</sup>. Dra. Fabrina Bolzan Martins

**Coorientador:**

Prof<sup>a</sup>. Dr. Roger Rodrigues Torres

**Itajubá, MG, Brasil  
2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**RAFAEL BITENCOURT BENASSI**

**CONSEQUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA  
GLOBAL EM 1,5°C E 2°C NO BALANÇO HÍDRICO PARA O  
EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL**

Dissertação \_\_\_\_\_ por banca examinadora em 17  
de dezembro de 2020 conferindo a autora o título de **Mestre  
em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

**Banca examinadora:**

---

Profª Dra. Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)  
Universidade Federal de Itajubá

---

Profº Dr. Roger Rodrigues Torres (Coorientador)  
Universidade Federal de Itajubá

---

Profº Dr. Bergson Guedes Bezerra  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Profº Dr. Marcelo de Paula Corrêa  
Universidade Federal de Itajubá

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL  
2020**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosilene e André, por sempre me apoiarem e incentivarem a continuar estudando, acreditando sempre no meu potencial e nunca me deixando desistir. E a minha namorada, Isabella, que sempre esteve do meu lado e me apoiando em todos os momentos, sendo fundamental para chegar aonde cheguei.

À minha orientadora Dra. Fabrina Bolzan Martins e ao meu coorientador Dr. Roger Rodrigues Torres, por todo apoio e paciência nestes dois anos, tornando possível a realização deste trabalho.

À Unifei e ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (MEMARH), pela infraestrutura e oportunidade de aprendizado, desenvolvimento pessoal e profissional. E a todos os professores do Programa de Pós-graduação que participaram da minha formação ao longo deste período.

Aos professores Dr. Bergson Guedes Bezerra e Dr. Marcelo de Paula Corrêa, por aceitarem o convite em participar da banca de avaliação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de estudo, possibilitando a execução deste trabalho.

De forma geral, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Especialmente ao meu amigo Francisco Agostinho Brito Neto, por toda ajuda com a programação e sempre me ajudando a encontrar a melhor solução possível, sendo carinhosamente apelidado como meu consultor de Python.

“O coração é o músculo mais forte - Braum.”

## RESUMO

BENASSI, Rafael Bitencourt. **Consequência do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2°C no balanço hídrico para o eucalipto na América do Sul.** 2020. 72 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

A 21ª Conferência das Partes, realizada na cidade de Paris em 2015, estabeleceu um novo acordo internacional, conhecido como Acordo de Paris, com o objetivo principal de manter o aquecimento global abaixo de 2°C e evitar esforços para limitar esse aumento a 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais. No entanto, mesmo que os limites previstos no Acordo de Paris sejam atingidos, vários impactos no sistema climático ainda são inevitáveis, principalmente em escala local, podendo gerar novas vulnerabilidades e ampliar aquelas já existentes. Nesse sentido, os objetivos desta dissertação de mestrado foram: a) analisar os padrões climáticos regionais da temperatura do ar próximo à superfície e da precipitação sobre a América do Sul (AS), decorrentes do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C quando comparado com o período pré-industrial; e, b) analisar os impactos nos extratos do balanço hídrico climatológico (Evapotranspiração Real, Deficiência Hídrica e Excedente Hídrico), e as consequências na aptidão ao cultivo de eucalipto na AS. Como resultados principais, destaca-se que o limiar de aquecimento regional de 1,5°C e 2°C será atingido primeiramente, na área central do continente sul-americano. Sobre os padrões de precipitação, destaca-se que a região Sul do Brasil, litoral norte da região Nordeste brasileira, norte da Argentina, Uruguai e partes do Peru, do Equador, da Colômbia e da Venezuela serão afetadas com aumento da precipitação média anual, em até 100 mm ano<sup>-1</sup>, no período em que se projeta os limites de aquecimento médio global em 1,5°C e 2°C. Tal resultado irá desfavorecer o cultivo de eucalipto em 49,2% e 56,8% do continente da América do Sul, no período de aquecimento de 1,5°C e 2°C, respectivamente. No Brasil, apenas a região Sul e parte do Sudeste serão adequadas ao cultivo de eucalipto, considerando a disponibilidade de água. Para as demais regiões, principalmente no Centro-Oeste e Norte do Brasil e o centro-norte da Argentina, o cultivo do eucalipto será afetado negativamente, de modo que medidas de mitigação e estratégias de adaptação serão necessárias, como a utilização de espécies (híbridas e alteradas geneticamente) e o uso de irrigação, os quais representariam um grande adicional aos custos de operação e de manejo florestal.

**Palavras-chave:** Acordo de Paris; Aquecimento Global; Modelos do Sistema Terrestre; Disponibilidade Hídrica.

## ABSTRACT

BENASSI, Rafael Bitencourt. **Consequence of the increase in the global average temperature by 1.5°C and 2°C in the water balance for eucalyptus in South America.** 2020. 72 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

The 21st Conference of the Parties, held in the city of Paris in 2015, established a new international agreement, known as the Paris Agreement, with the main objective of keeping global warming below 2°C and making efforts to limit this increase to 1.5°C, in relation to pre-industrial levels. However, even if the thresholds foreseen in the Paris Agreement are reached, several impacts on the climate system are still inevitable, mainly on a local scale, which may generate new vulnerabilities and expand those that already exist. In this sense, the objectives of this master's dissertation were: to analyze the regional climatological patterns of the near surface air temperature and precipitation over South America (SA) due to the increase in the global average temperature by 1.5°C and 2°C when compared to the pre-industrial period; to analyze the impacts on the extracts of the climatological water balance (Real Evapotranspiration, Water Deficiency and Water Surplus), and the consequences on the aptitude for eucalyptus cultivation in SA. As key results, it is noteworthy that the regional warming threshold of 1.5°C and 2°C will be reached primarily at the South American continent central area. Regarding the patterns of precipitation, it should be noted that the Brazil's Southern region, the northern coast of the Brazilian Northeastern region, northern Argentina, Uruguay and parts of Peru, Ecuador, Colombia and Venezuela will be affected with an increase in average annual precipitation, up to 100 mm year<sup>-1</sup>, in the period when the global average warming thresholds are projected at 1.5°C and 2°C. This result will disfavor the cultivation of eucalyptus in 49.2% and 56.8% of the South American continent, during the heating period of 1.5°C and 2°C, respectively. In Brazil, only the Southern and part of the Southeastern regions will be suitable for growing eucalyptus considering the water availability. For the other regions, mainly in the Midwest and North of Brazil and the central north of Argentina, the cultivation of eucalyptus will be negatively affected, requiring mitigation measures and adaptation strategies, such as the use of species (hybrids and genetically altered) and the use of irrigation, which would represent a great addition to the costs of operation and of forest management.

**Keywords:** Paris Agreement; Global Warming; Earth System Models; Water Availability.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

**Figura 1.1** – Área de estudo e subdivisões.

**Figura 1.2** – Esquema da metodologia para a determinação do ano em que se projeta o aquecimento médio global de 1,5°C e 2,0°C.....23

**Figura 1.3** - Demonstração do ano em que ocorre o aquecimento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C para os quatro cenários de forçante radiativa (RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) e para a média de todos os RCPs, denominado *ALL RCPs*.....26

**Figura 1.4** – Ano médio em que os limiares de 1,5° (a) e 2,0°C (b) serão atingidos localmente, em relação ao período pré-industrial (1861-1890), baseado na média do conjunto de todos os cenários de RCPs.....27

**Figura 1.5** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de temperatura do ar próximo à superfície (°C) na América do Sul, projetado por 26 Modelos do Sistema Terrestre do CMIP5 nos quatro cenários RCPs para um aquecimento global de 1,5 ° C (a) e 2,0 ° C (b), em relação ao período pré-industrial (1861 - 1890).....28

**Figura 1.6** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de temperatura do ar próximo a superfície (°C) na América do Sul, para o aquecimento global de 1,5°C (a,b,c,d) e 2,0°C (e,f,g,h) em relação ao período pré-industrial (1861-1890), nos cenários RCP2.6 (a, e), RCP4.5 (b, f), RCP6.0 (c, g) e RCP8.5 (d, h). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto superior direito de cada imagem.....29

**Figura 1.7** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de precipitação (mm ano<sup>-1</sup>) na América do Sul, projetado por 26 Modelos do Sistema Terrestre do CMIP5 nos quatro cenários RCPs para um aquecimento global de 1,5°C (a) e 2,0°C (b), relativo ao período pré-industrial (1861 - 1890).....30

**Figura 1.8** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de precipitação (mm ano<sup>-1</sup>) na América do Sul, para o aquecimento global de 1,5°C (a,b,c,d) e 2,0°C (e,f,g,h) em relação ao período pré-industrial (1861-1890), nos cenários RCP2.6 (a, e), RCP4.5 (b, f), RCP6.0 (c, g) e RCP8.5 (d, h). O número de projeções usado para calcular a média é indicado no canto superior direito de cada imagem.....31

### CAPÍTULO II

**Figura 2.1** – Modelo esquemático do cálculo da Evapotranspiração Potencial.....45

**Figura 2.2** – Extratos do Balanço Hídrico do eucalipto: Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F) referente ao período pré-industrial (1861-1890) (A,B,C) e ao período presente (1975-2005) (D,E,F). Áreas hachuradas na DEF indicam regiões desfavoráveis para o cultivo de eucalipto (DEF < 350).....49

**Figura 2.3** – Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C (A,B,C) e 2°C (D,E,F) e os extratos referente ao período pré-industrial. Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E)

e Excedente Hídrico (C,F). O número de projeções utilizados para calcular a média do conjunto de 1,5°C (A,B,C) e de 2°C (D,E,F) foi de 66 e 56 projeções, respectivamente.....51

**Figura 2.4** – Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C (A,B,C) e 2°C (D,E,F) e os extratos referente ao período presente. Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F). O número de projeções utilizados para calcular a média do conjunto de 1,5°C (A,B,C) e de 2°C (D,E,F) foi de 66 e 56 projeções, respectivamente.....52

**Figura 2.5** – Extratos do Balanço Hídrico do eucalipto: Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F) referente ao período de aumento da temperatura média global em 1,5°C (A,B,C) e 2,0°C (D,E,F). Os valores representam a média entre todos modelos climáticos e RCPs. Áreas hachuradas na DEF indicam regiões desfavoráveis para o cultivo de eucalipto ( $DEF < 350$ ).....53

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

**Tabela 1.1** – Lista de modelos, resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude/longitude), simulações (histórico) e respectivas projeções disponíveis (RCP) do conjunto de dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). O asterisco (traço) indica que o modelo possui (não possui) a respectiva projeção.....21

**Tabela 1.2.** Ano em que os limiares de 1,5°C e 2°C serão atingidos. Traço (-) representa que o modelo não possui projeção para o respectivo RCP e o asterisco (\*) representa que a projeção do modelo não atingiu o limiar de 1,5°C ou 2,0°C até 2100.....24

### CAPÍTULO II

**Tabela 2.1** – Proporções de áreas favoráveis ou desfavoráveis ao cultivo de eucalipto, referente aos períodos pré-industrial, presente e aquecimento médio global em 1,5°C e 2°C.....54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMZ – Amazonas

ARM – Armazenamento

AR5 - *Fifth Assessment Report*

AS – América do Sul

BHC – Balanço Hídrico Climatológico

CAD – Capacidade de Água Disponível

CAM – América Central e México

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

COP21 – 21ª Conferência das Partes

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

DEF – Deficiência Hídrica

ETc – Evapotranspiração de Cultura

ETo – Evapotranspiração de Referência

ETP – Evapotranspiração Potência

ETR – Evapotranspiração Real

EXC – Excedente Hídrico

KC – Coeficiente de Cultura

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

NEB – Nordeste brasileiro

NEGACUM – Negativo Acumulado

P – Precipitação

Ppm – Partes por milhão

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

RCP – *Representative Concentration Pathways*

SSA – Sudeste da América do Sul

Tmed – Temperatura do ar próximo a superfície

WMO – *World Meteorological Organization*

WSA – Costa Leste da América do Sul

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>20</b>
<b>IMPACTOS DAS PROJEÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL EM 1,5°C E 2,0°C PARA OS PADRÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
1.2.1. ÁREA DE ESTUDO .....	21
1.2.2. DADOS .....	22
1.2.2. DETERMINAÇÃO DOS LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL E ANÁLISE ESPACIAL .....	24
<b>1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
1.3.1. PERÍODO DE AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM 1,5°C E 2,0°C .....	25
1.3.2. ALTERAÇÕES NOS PADRÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL .....	29
1.3.3. POSSÍVEIS IMPACTOS NAS PRINCIPAIS CULTURAS NA AMÉRICA DO SUL .....	33
<b>1.4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>43</b>
<b>IMPACTO DO AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM 1,5°C E 2°C NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA O EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL.....</b>	<b>43</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>2.2. METODOLOGIA.....</b>	<b>45</b>
2.2.1. DADOS .....	45
2.2.2. OBTENÇÃO DA CLIMATOLOGIA, DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O EUCALIPTO.....	46
2.2.3. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E EXTRATOS .....	48
2.2.4. CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO (CAD) .....	49
2.2.5. CONSEQUÊNCIAS NA APTIDÃO AO CULTIVO DO EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL .....	50
<b>2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
2.3.1. BALANÇO HÍDRICO PARA OS PERÍODOS PRÉ-INDUSTRIAL E PRESENTE.....	50
2.3.2. BALANÇO HÍDRICO PARA O PERÍODO DE AQUECIMENTO MÉDIO GLOBAL EM 1,5°C E 2°C E IMPACTOS PARA O CULTIVO DO EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL.....	51
<b>2.4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

## INTRODUÇÃO

O setor florestal, principalmente de florestas plantadas, possui importância social e econômica para os países da América do Sul (MOREIRA; OLIVEIRA, 2017), principalmente para o Brasil, Uruguai e Argentina (ELLI et al., 2020a,b; RESQUIM et al., 2020). Dentre as principais espécies cultivadas, destaca-se as do gênero *Eucalyptus* sp. Neste setor, o Brasil merece destaque, pois é o maior produtor mundial de eucalipto, com área de plantio equivalente a 7,5 milhões de hectares (IBÁ, 2019; ELLI et al., 2020a,b) e uma produtividade média de  $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IBÁ, 2019; ELLI et al., 2020b), acima de países como China ( $29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), Moçambique ( $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), Estados Unidos ( $11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e outros países da América do Sul, que juntos, possuem produtividade média de  $27 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IBÁ, 2019). Os principais destinos dos produtos provenientes do setor florestal brasileiro são: China (26%), Europa (25%) e Estados Unidos (18%) (IBÁ, 2019). A escolha por espécies do gênero *Eucalyptus* sp. é devido ao seu rápido crescimento e rotação (entre 5 e 10 anos), grande diversidade de uso da sua matéria prima (papel e celulose, carvão vegetal, construção civil e indústria madeireira) e adaptabilidade em diferentes condições edafoclimáticas (HIGA et al., 2000; OTTO et al., 2013; SANTAROSA et al., 2014).

Apesar dos inúmeros avanços decorrentes de adaptação de clones, melhorias das práticas de manejo e preparação do solo, fertilização, controle de pragas e doenças (GONÇALVES et al., 2017; SCOLFORO et al., 2019; ELLI et al., 2020a), o desenvolvimento e a produtividade do eucalipto são fortemente afetados, e até mesmo inviabilizados, pelas condições climáticas (SCOLFORO et al. 2019; ELLI et al., 2020a,b; HUBBARD et al., 2020). Como exemplo, as temperaturas extremas e disponibilidade hídrica são as principais causas de redução de produtividade do eucalipto (DE SOUZA et al., 2006, MARTINS et al., 2008; VOSE et al., 2016; QUEIROZ et al., 2017; GONÇALVES et al., 2017; CÂMARA et al., 2020; ELLI et al 2020a,b). Tais condições são responsáveis por promover uma série de alterações fisiológicas (de curto a longo prazo), morfológicas e anatômicas, que causam modificação na estrutura celular e anatômica das plantas, podendo levar a mortalidade das árvores e a redução na produtividade final (ALLEN et al., 2010; MARTINS et al., 2011; BAHUGUNA; JAGADISH, 2015; GONZALEZ-OROZCO et al., 2016). Resumidamente, isso ocorre pela redução das reações do processo de fotossíntese, pelo aumento da fotorrespiração e pelo desequilíbrio entre a transpiração e a absorção de  $\text{CO}_2$  (ABREU et al., 2015; GAVRICHKOVA et al., 2019). Alguns bioindicadores dessas alterações são: redução

da área foliar, aprofundamento do sistema radicular e redução do crescimento aéreo (SANDS; LANDSBERG, 2002; RAWAL et al., 2015). Além disso, cenários de mudanças climáticas projetam aumento na temperatura do ar e padrões irregulares na precipitação para toda a América do Sul (MARENGO, 2001; MARENGO, 2010; BLÁZQUEZ; NUÑES, 2013; TORRES; MARENGO, 2013; MARENGO et al., 2014; GULIZIA; CAMILLONI, 2015; SANTOS et al., 2017; TAVARES et al., 2018; MARTINS et al., 2019; RESENDE et al., 2019; LOOPART et al., 2020), o que pode impactar ainda mais a produtividade do eucalipto, devido as alterações na evapotranspiração potencial e na deficiência hídrica do solo (PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020b; RESQUIM et al., 2020).

Com base nos inúmeros estudos que apontam sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas em diversos setores, incluindo o setor florestal, a 21ª Conferência das Partes (COP21) da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), propôs a criação de um novo acordo internacional com o objetivo de estabilizar o aquecimento médio global em até 2,0°C, preferencialmente abaixo de 1,5°C, quando comparado com o período pré-industrial (RHODES, 2016). Estes limiares foram determinados pela comunidade científica para evitar que os impactos no sistema climático sejam ainda mais danosos, reconhecendo que isso poderia minimizar os riscos eminentes ocasionados pelas mudanças climáticas. (ANDERSON 2015; IPCC, 2018; WARREN et al., 2018).

Os esforços para estabilizar a temperatura média global, preferencialmente abaixo de 1,5°C, se devem a menor necessidade de adaptação e mitigação comparado ao cenário de aquecimento global de 2°C. Nessa situação pode haver uma ruptura permanente dos sistemas naturais e conseqüentemente impactos diretos e indiretos nos processos físicos e termodinâmicos dos sistemas meteorológicos e climáticos (IPCC, 2018). Porém, caso o aquecimento se mantenha nos níveis atuais, assim como as taxas de emissões dos gases do efeito estufa, espera-se que o aquecimento médio global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, ultrapassando-o após esse período (IPCC, 2018). Mas, vale ressaltar que não é possível definir um limiar exato relacionado com a ruptura das condições climáticas, e por isso, a existência de um intervalo de 0,5°C (HALLEGATTE et al., 2016; KNUTTI et al., 2016; IPCC, 2018).

Mesmo não sendo completamente suficientes para evitar os impactos no sistema climático, tais limites de aquecimento são relativos a uma temperatura média global. Sendo assim, quando analisados em escala regional ou local, os impactos das mudanças ocorrem de forma heterogênea ao redor do globo (KING et al., 2017; KARMALKAR; BRADLEY, 2017; FU et al., 2018; SUI et al., 2018; CHEN et al., 2020). Nesse sentido e devido à escassez

desses estudos na América do Sul (AS), três questões práticas surgem: i) Quais seriam as alterações nos padrões climáticos de temperatura e precipitação na AS resultantes do aumento de 1,5°C e 2°C na temperatura média global? ii) quando esses padrões serão atingidos? iii) caso sejam atingidos, qual será o impacto resultante nos extratos do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e no cultivo do eucalipto na AS?

Para responder essas questões, essa dissertação foi dividida em dois capítulos: O Capítulo I teve como objetivo analisar os padrões climáticos regionais da temperatura do ar próximo à superfície e da precipitação sobre a América do Sul decorrentes do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C quando comparado com o período pré-industrial; e O Capítulo II objetivou analisar os impactos nos extratos do BHC (Evapotranspiração Real, Deficiência Hídrica e Excedente Hídrico) e as consequências na aptidão ao cultivo de eucalipto na AS decorrentes do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C quando comparado com o período pré-industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H. de; PEREIRA, R. A. A. Thresholds for transpiration, development and growth of *Corymbia citriodora* (hook.) kd hill & las johnson in response to soil water stress. **Revista Árvore**, v. 39, p. 841-852, 2015.

ALLEN, M.R.; DUBE O.P.; SOLECKI W.; ARAGÓN-DURAND F.; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J.; MAHOWALD, N.; MULUGETTA, Y.; PEREZ R.; WAIRIU, M.; ZICKFELD K. Framing and Context. In: **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. 2018 [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, J. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD T. (eds.)]. In Press.

ANDERSON, Kevin. Duality in climate science. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 898, 2015.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. SV. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 83-90, 2015.

BLÁZQUEZ, J.; NUÑEZ, M.N. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. **Climate dynamics**, v. 41, p. 1039-1056, 2013

CÂMARA, A.P., VIDAURRE, G.B., OLIVEIRA, J.C.L., DE TOLEDO PICOLI, E.A., ALMEIDA, M.N.F., ROQUE, R.M., TOMAZELLO FILHO, M., SOUZA, H.J.P.,

OLIVEIRA, T.R. AND CAMPOE, O.C. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

CHEN, J.; CHAO, G.; XIAOFAN, Z.; MING, X.; YANJUN, W.; CHENG, J.; KRYSANOVA, V.; HUANG, J.; ZHAO, N.; SU, B. Assessing changes of river discharge under global warming of 1.5 C and 2 C in the upper reaches of the Yangtze River Basin: Approach by using multiple-GCMs and hydrological models. **Quaternary International**, v. 453, p. 63-73, 2017.

CHEN, S.; WU, R.; CHEN, W. Projected changes in midhigh latitude Eurasian climate during boreal spring in a 1.5°C and 2°C warmer world. **International Journal of Climatology**, v. 40, p. 1851-1863, 2020.

DE SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; NEIL H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v.114, p.106325, 2020a.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020b.

FU, Y. H.; LU, R. Y.; GUO, D. Changes in surface air temperature over China under the 1.5 and 2.0 C global warming targets. **Advances in Climate Change Research**, v. 9, p. 112-119, 2018.

GAVRICHKOVA, O.; SCARTAZZA, A.; GUIDOLOTTI, G.; KUZYKOV, Y.; LEONARDI, L.; MATTIONI, M.; NAWROCKA, J.; PALLOZZI, E.; SKWAREK, M.; TOMCZYNSKA, M.; CALFAPIETRA, C. When the Mediterranean becomes harsh: Heat pulses strongly affect C allocation in plant-soil-atmosphere continuum in Eucalyptus camaldulensis. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 181-191, 2019.

GONÇALVES, J. L. M.; CLAYTON A. A.; JOSÉ H. T R.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: Journal of Forest Science** v. 79, p. 169-183, 2017.

GONZALEZ-OROZCO, C.E.; POLLOCK, L.J.; THORNHILL, A.H.; MISHLER, B.D.; KNERR, N.; LAFFAN, S.W.; MILLER, J.T.; ROSAUER, D.F.; FAITH, D.P.; NIPPERESS, D.A.; KUJALA, H. Phylogenetic approaches reveal biodiversity threats under climate change. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 1110-1114, 2016.

GULIZIA, C.; CAMILLONI, I. Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. **International Journal of Climatology**, v. 35, v. p 583-595, 2015.

HALLEGATTE, S.; ROGELJ, J.; ALLEN, M.; CLARKE, L.; EDENHOFER, O.; FIELD, C. B.; STOCKER T. F.; VAN VUUREN, D. P. Mapping the climate change challenge. **Nature Climate Change**, v. 67, p. 663–668, 2016.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. Embrapa, 2000.

HUBBARD, R. M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118407, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2019.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

KARMALKAR, A. V.; BRADLEY, R. S. Consequences of global warming of 1.5 C and 2 C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLoS One**, v. 12, n. 1, p. e0168697, 2017.

KING, A. D.; KAROLY, D. J.; HENLEY, B. J. Australian climate extremes at 1.5C and 2C of global warming. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 412-416, 2017.

KNUTTI, R.; ROGELJ, J.; SEDLÁČEK, J.; FISCHER, E. M. A scientific critique of the two-degree climate change target. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 13–18, 2016.

LLOPART, M.; REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 99-116, 2020.

MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.E.; FILIZOLA, N.P.; AND WAINER, I.C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J.A.; CHOU, S., TORRES, R.R.; GIAROLLA, A.; ALVES, L.M.; LYRA, A. Climate change in central and South America: recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture, **CGIAR**, v. 73, p. 1-93, 2014.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; SILDA, J. C. da.; MORAIS, W. W.; SUSIN, F.; NAVROSKI, M. C.; VIVIAN, M. A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1297-1306, 2008.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 9, p. 1089-1098, 2011.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, v.216, p.339-350, 2019.

MOREIRA, J.; de OLIVEIRA, E.B. Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. Embrapa Florestas-Capítulo em livro científico (**ALICE**), 2017.

OTTO, M. S. G.; VERGANI, A. R.; GONÇALVES, A. N.; VRECHI, A.; SILVA, S. R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de Eucalyptus sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, v. 37, p, 431-439, 2013.

PIROVANI, D.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; JÚNIOR, W.C.J.; MACHUCA, M.A.H.; SANTOS, G.M.A.D.A.; SILVA, S.F.; ALMEIDA, S.L.H.; PELUZIO, T.O.; EUGENIO, F.C.; MOREIRA, T.R.; ALEXANDRE, R.S.; SANTOS, A.R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 405-416, 2018.

QUEIROZ, T. B.; ROCHA, S. M. G.; FONSECA, F. S. A. da.; ALVARENGA, I. C. A.; MARTINS, E. R. Efeitos do déficit hídrico no cultivo de mudas de Eucalipto. **Irriga**, v. 22, p. 659-674, 2017.

RAWAL, D.S.; KASEL, S.; KEATLER, M. R.; NITSCHKE, C. R. Climatic and photoperiodic effects on flowering phenology of select eucalyptus from south-eastern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 231-242, 2015.

RESENDE, N. C.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R.; CHU, M. L.; CHOU, S. C. Impacts of regional climate change on the runoff and root water uptake in corn crops in Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 556-565, 2019.

RESQUIN, F.; DUQUE-LAZO, J.; ACOSTA-MUÑOZ, C.; RACHID-CASNATI, C.; CARRASCO-LETELIER, L.; NAVARRO-CERRILLO, R.M. Modelling Current and Future Potential Habitats for Plantations of Eucalyptus grandis Hill ex Maiden and E. dunnii Maiden in Uruguay. **Forests**, v. 11, p. 948, 2020.

RHODES, C. J. The 2015 Paris climate change conference: COP21. **Science progress**, New York, v. 99, p. 97-104, 2016.

SANDS. P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterization of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, v. 163, p. 273-292, 2002.

SANTAROSA, E.; PENTEADO-JUNIOR, J. F.; GOULART, ICG dos R. Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. **Embrapa Florestas-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, D. F. dos; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 77-82, 2017.

SCOLFORO, H F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J. P.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Modeling whole-stand survival in clonal eucalypt stands in Brazil as a function of water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 1002–1012, 2019.

SUI, Y.; LANG, X.; JIANG, D. Projected signals in climate extremes over China associated with a 2 C global warming under two RCP scenarios. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 678-697, 2018.

TAVARES, P. da S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S. C.; SILVA, A. J. de P.; LYRA, A. de A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 1, p. 1-11, 2017.

TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and applied climatology**, v. 112, p. 253-272, 2013.

VOSE, J. M.; MINIAT, C. F.; LUCE, C. H.; ASBJORNSEN, H.; CALDWELL, P. V.; CAMPBELL, J. L.; GRANT, G. E.; ISAAK D. J.; LOHEIDE II, S. P.; Sun, G. Ecohydrological implications of drought for forests in the United States. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 335–345, 2016.

WARREN, R.; PRICE, J.; GRAHAM, E.; FORSTENHAEUSLER, N.; VANDERWAL, J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5C rather than 2C. **Science**, v. 360, p. 791-795, 2018.

# CAPÍTULO I

## IMPACTOS DAS PROJEÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL EM 1,5°C E 2,0°C PARA OS PADRÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL

### 1.1. INTRODUÇÃO

Alterações nos padrões climáticos impactam direta e indiretamente os setores ambientais, econômicos e sociais (MENDELSON, 2008; MIDEKSA et al., 2010; HOEGH et al., 2018; SHI et al., 2018). Tais impactos são intensificados pelo aquecimento global, no qual estudos apontam alterações na disponibilidade hídrica (GOSLING; ARNELL, 2016; CHEN et al., 2017; UL HASSON et al., 2019), nos setores agrícolas e florestais (SANTOS et al., 2017; PIROVANI et al., 2018; TAVARES et al., 2018; ELLI et al., 2020b), na pecuária (BOONE et al., 2018), na segurança alimentar (ALFIERI et al., 2017, ALLEN et al., 2018; IPCC, 2018; HOEGH et al., 2018; ROGELJ et al., 2018), na distribuição de espécies em escala regional e global (PECL et al., 2017), na geração e transmissão de energia (JIANG et al., 2018; GAMBHIR et al., 2019), na intensidade e frequência de eventos extremos (ALFIERI et al., 2017; LEWIS et al., 2019; LI et al., 2019; SILVA et al., 2019) e na saúde humana (SHI et al., 2018).

Esses limiares foram determinados pela comunidade científica para prevenir que os impactos das mudanças climáticas sejam ainda mais danosos, reconhecendo que o esforço poderia reduzir significativamente os riscos e impactos ao sistema climático global. Porém, vale a pena ressaltar que não existe um limiar exato em relação à ruptura das condições climáticas, justamente por isso, a existência de um intervalo de 0,5°C entre os dois limiares (HALLEGATTE et al., 2016; KNUTTI et al., 2016; IPCC, 2018). Além disso, diversos autores destacam a dificuldade em estabilizar o aquecimento abaixo destes limiares (VAN VLIET et al., 2012; ANDERSON, 2015; KARMALKAR; BRANDLEY, 2017), principalmente com base nos índices de emissões dos gases do efeito estufa, que continuam aumentando mesmo após a COP21 e devido à falta de medidas públicas e ações em prol da conscientização ambiental e incentivo às tecnologias limpas (BARCELLOS; HACOM, 2016).

Adicionalmente às dificuldades inerentes ao estabelecimento desses limiares, mesmo que as metas estabelecidas no Acordo de Paris sejam alcançadas, diversos impactos no sistema climático ainda são inevitáveis, principalmente em escala local, gerando novas vulnerabilidades e ampliando aquelas já existentes. Por exemplo, no relatório especial do

*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* sobre os impactos do aquecimento global (IPCC, 2018), os danos econômicos globais ocasionados pelas mudanças climáticas são projetados para serem menores sob o aquecimento de 1,5°C comparado a 2,0°C em 2100 (WARREN et al., 2018). No entanto, o valor presente líquido médio dos custos dos danos do aquecimento em 2100 para 1,5°C é de US\$54 trilhões, e para 2,0°C é de US\$69 trilhões (IPCC 2018).

Além de não ser suficiente para evitar completamente os impactos no sistema climático, esses limites de aquecimento são relativos a uma temperatura média global. Quando analisados em escala local ou regional, os impactos das mudanças climáticas ocorrem de forma desigual ao redor do globo, conforme têm sido relatados em estudos e em diversos relatórios produzidos pelo IPCC. Nesse sentido, salienta-se a importância de avaliar o impacto regional dos limiares de aquecimento global estabelecido no Acordo de Paris, gerando conhecimentos que possam subsidiar soluções de adaptação e mitigação, bem como identificar possíveis vulnerabilidades a serem enfrentadas.

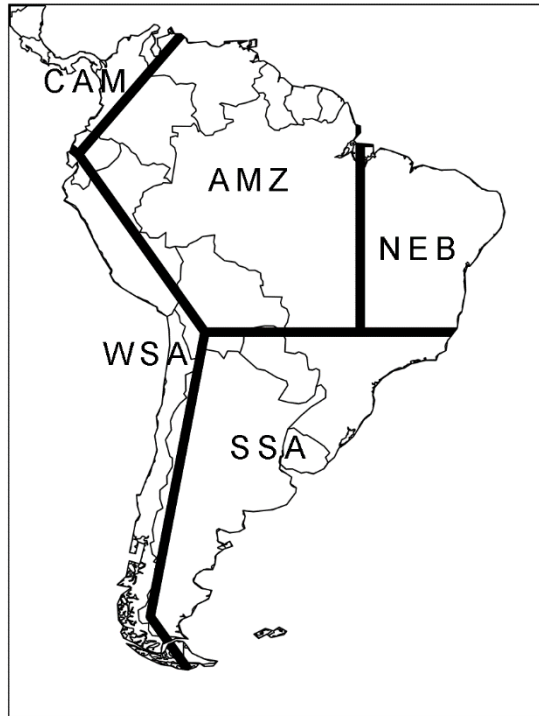
Para tanto, alguns estudos buscaram analisar os impactos regionais do aquecimento global de 1,5°C e 2,0°C. Por exemplo, Karmalkar e Bradley (2017) que analisaram quando ocorrerá o aquecimento de 1,5°C e 2°C regionalmente nos EUA e qual será o padrão climático de temperatura do ar e precipitação associado a estes aquecimentos, King et al. (2017) que avaliaram as alterações na frequência e intensidade de eventos extremos para a Austrália, Fu et al. (2018) e Sui et al. (2018) que analisaram as possíveis alterações nos extremos de temperatura e precipitação na China devido ao aquecimento global de 2°C para a China e Chen et al. (2020) para analisaram as alterações de eventos extremos de temperatura e precipitação na Europa e Ásia para um mundo 1,5°C e 2,0°C mais quente.

Entretanto, estudos avaliando o impacto na América do Sul ainda são escassos. Portanto, este primeiro capítulo da dissertação objetivou analisar os padrões climáticos regionais da temperatura do ar próximo a superfície e da precipitação sobre a América do Sul decorrentes do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C, quando comparado com o período pré-industrial, localizando as regiões mais afetadas e os possíveis impactos a serem enfrentados.

## **1.2. METODOLOGIA**

### **1.2.1. Área de estudo**

A América do Sul apresenta uma vasta extensão territorial (~17.840.000 km<sup>2</sup>) abrangendo desde baixas (8° 78' N) a altas latitude (55° 49' S). O continente sul americano apresenta diferentes zonas climáticas, determinada de acordo com o relevo, vegetação e latitude de cada região.



**Figura 1.2** – Área de estudo e subdivisões.

As regiões utilizadas na área de estudo seguem o padrão estabelecido pelo IPCC no Relatório Especial de Aquecimento Global em 1,5°C (IPCC 2018). Determinado pelas seguintes regiões: Amazonas (AMZ), Nordeste brasileiro (NEB), América Central e México (CAM), Sudeste da América do Sul (SSA) e Costa Leste da América do Sul (WSA).

### 1.2.2. Dados

Para a realização deste estudo utilizou-se dados mensais de temperatura do ar ( $T_{med}$ , °C) e precipitação acumulada ( $P$ , mm mês<sup>-1</sup>) provenientes do conjunto de simulações e projeções de 26 modelos climáticos do sistema terrestre do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5*, fornecidos pelo *World Climate Research Programme* e disponibilizados pelo *Earth System Grid data portal* (Tabela 1) (TAYLOR et al., 2012), disponível em <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip5-dkrz>. Estes dados possuem resoluções espaciais que variam de 0,8° a 3° de latitude/longitude. Por isso, para fins de intercomparação, os dados foram interpolados para uma grade regular de 1° x 1° latitude/longitude usando o

esquema de remapeamento conservador (JONES, 1999), método amplamente utilizado em estudos com a mesma temática (DIFFENBAUGH; GIORGI, 2012; TORRES et al., 2012; TORRES; MARENGO, 2014).

O conjunto de dados CMIP5 foi utilizado como base para as análises de mudanças climáticas do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC - IPCC AR5 (IPCC, 2014). E os 26 modelos climáticos utilizados neste estudo possuem simulações para o período de 1850 a 2005, denominado histórico. Para a comparação com o período pré-industrial, foi utilizado o intervalo de 1861 a 1890, representando as condições climáticas antes das atividades industriais em larga escala (IPCC, 2018).

As projeções climáticas são realizadas para o período de 2006 a 2100 e utilizam os cenários de emissões denominados *Representative Concentration Pathways* (RCP) (MOSS et al., 2010) e referenciados como RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, correspondendo a um forçamento radiativo aproximado ao final do século XXI de 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5  $W.m^{-2}$ , respectivamente, quando comparado com o período pré-industrial (MOSS et al., 2010). Com relação às concentrações de  $CO_2$  equivalente, os RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 correspondem, aproximadamente a 490, 650, 850 e 1.370 ppm, respectivamente, em 2100 (VAN VUUREN et al., 2011). Utilizou-se 14, 22, 9 e 26 modelos para os RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, respectivamente, totalizando 71 experimentos numéricos.

**Tabela 1.** Lista de modelos, resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude/longitude), simulações (histórico) e respectivas projeções disponíveis (RCP) do conjunto de dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). O asterisco (traço) indica que o modelo possui (não possui) a respectiva projeção.

Modelo	Resolução Horizontal	Histórico	RCP			
			2.6	4.5	6.0	8.5
CMCC-CMS	3.7° x 3.8°	*	-	*	-	*
CMCC-CESM	3.4° x 3.8°	*	-	-	-	*
FGOALS-g2	2.8° x 2.8°	*	*	*	-	*
MIROC-ESM	2.8° x 2.8°	*	*	*	*	*
MIROC-ESM-CHEM	2.8° x 2.8°	*	*	*	*	*
CanESM2	2.8° x 2.8°	*	*	-	-	*
GISS-E2-H	2.0° x 2.5°	*	*	*	*	*
GISS-E2-H-CC	2.0° x 2.5°	*	-	*	-	*
GISS-E2-R	2.0° x 2.5°	*	*	*	*	*
GISS-E2-R-CC	2.0° x 2.5°	*	-	*	-	*
IPSL-CM5A-LR	1.9° x 3.8°	*	*	*	*	*

IPSL-CM5B-LR	1.9° x 3.8°	*	-	*	-	*
CSIRO-Mk3.6.0	1.9°x 1.9°	*	*	*	*	*
MPI-ESM-LR	1.9° x 1.9°	*	*	*	-	*
MPI-ESM-MR	1.9° x 1.9°	*	*	*	-	*
INM-CM4	1.5° x 2.0°	*	-	*	-	*
CNRM-CM5	1.4° x 1.4°	*	*	*	-	*
IPSL-CM5A-MR	1.3° x 2.5°	*	*	-	*	*
ACCESS1.0	1.3° x 1.9°	*	-	*	-	*
ACCESS1.3	1.3° x 1.9°	*	-	*	-	*
HadGEM2-AO	1.3°x1.9°	*	*	*	*	*
HadGEM2-CC	1.3°x1.9°	*	-	*	-	*
EC-EARTH	1.1° x 1.1°	*	-	*	-	*
MRI-CGCM3	1.1° x 1.1°	*	*	*	*	*
MRI-ESM1	1.1° x 1.1°	*	-	-	-	*
CMCC-CM	0.8° x0.8°	*	-	*	-	*

### 1.2.2. Determinação dos limiares de aquecimento global e análise espacial

Para estimar os períodos em que as projeções atingem o aquecimento médio global de 1,5°C e 2°C, em relação ao período pré-industrial, e os respectivos padrões de temperatura e precipitação associados, foram empregados os seguintes passos.

Primeiramente, os valores da temperatura média anual foram calculados para todas as simulações e projeções dos modelos do sistema terrestre (1861 a 2100). Com as séries anuais médias, foi obtida a temperatura média climatológica do período pré-industrial (1861 a 1890) para cada modelo e para cada RCP individualmente. Em seguida, calculou-se a série anual de anomalias da temperatura, subtraindo o valor anual de cada projeção de sua respectiva climatologia pré-industrial. Para remover a variabilidade climática em uma escala inferior a 30 anos (devido principalmente à variabilidade natural do sistema climático), um simples filtro de média móvel centrado em 30 anos foi aplicado nas séries de anomalias, resultando em séries de anomalias anuais suavizadas para o período de 1876 a 2085.

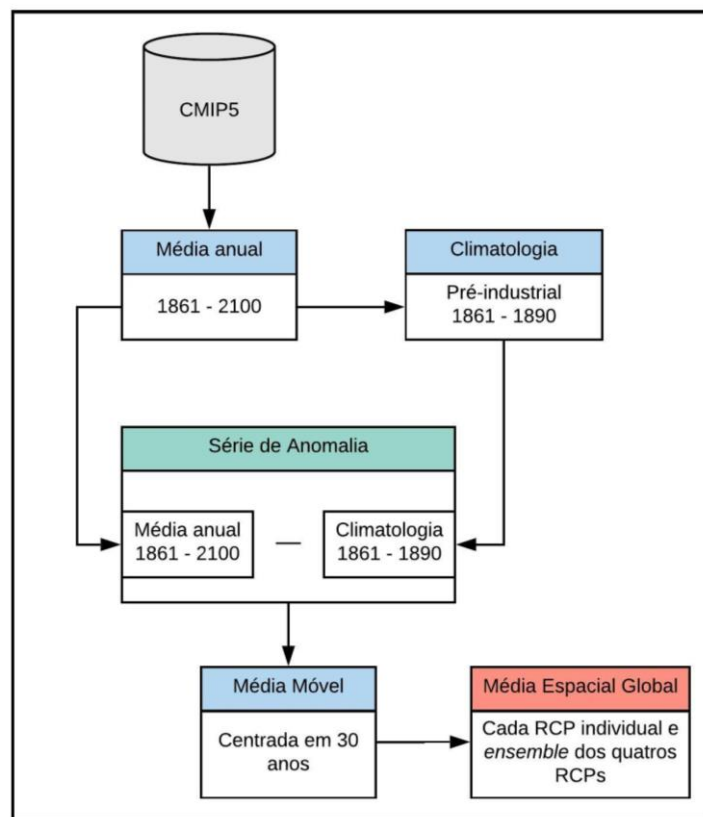
Para identificar os respectivos anos de aumento da temperatura global em 1,5°C e 2°C, uma média espacial global foi calculada a partir da série de anomalias anuais suavizadas, para cada modelo climático e RCP (Equação 1).

$$\overline{Xm}_l = \frac{1}{30} \sum_{k=i-15}^{i+15} \overline{X}_k \quad (1)$$

No qual  $\overline{Xm}_i$  é definido como a média móvel de  $\overline{X}_k$  (valores médios anuais de temperatura) para cada ponto de grade do globo e para o  $i$ -ésimo ano. A Figura 1.2 apresenta de forma esquemática os passos utilizados para a determinação dos limiares.

Ressalta-se que o cálculo da climatologia seguiu as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1989) estabelecidas no documento técnico OMM/TD-Nº 341.

Para a análise espacial, a média de todas as projeções disponíveis foi calculada dentro de cada RCP, usando as séries de anomalias anuais suavizadas para cada modelo em seu determinado ano em que o limiar é atingido (1,5°C e 2,0°C). Por fim, calculou-se a média do conjunto (*ensemble*) das projeções para os quatro RCPs.



**Figura 1.2** – Esquema da metodologia para a determinação do ano em que se projeta o aquecimento médio global de 1,5°C e 2°C.

O procedimento de obtenção dos padrões de precipitação foi semelhante ao utilizado nos dados de temperatura, exceto na etapa de cálculo da média global, que não foi necessária para esta variável.

### 1.3. Resultados e Discussão

#### 1.3.1. Período de aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C

A Tabela 1.2 mostra, para cada modelo e cenário de RCP, as projeções dos modelos dos anos em que os limiares de aquecimento global de 1,5°C e 2,0°C são atingidos. Em média, os RCPs 2.6 e 8.5 são responsáveis pelas projeções que atingem ambos os limiares antecipadamente, equivalente ao ano de 2027 para um aquecimento global de 1,5°C (ambos os RCPs) e aos anos de 2039 e de 2040 para um aquecimento de 2°C, para os RCPs 2.6 e 8,5, respectivamente.

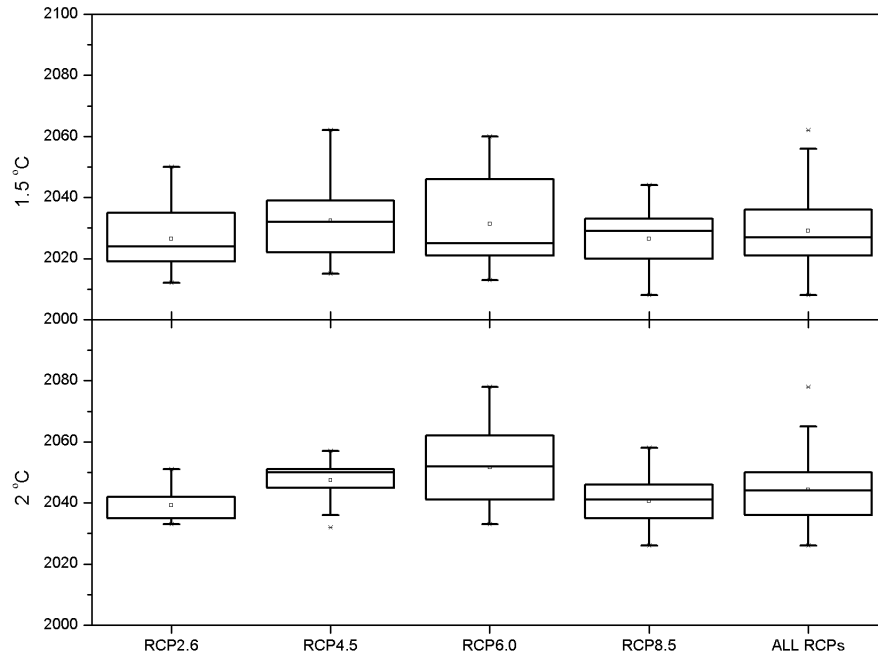
Os RCPs 2.6 e 8.5 são aqueles com maiores diferenças no forçamento radiativo e nas concentrações de gases de efeito estufa entre os RCPs. Nesse sentido, espera-se que os limiares sejam atingidos de forma antecipada no RCP 8.5. No entanto, como as principais divergências entre os cenários ocorrem na segunda metade do século XXI (VAN VUUREN et al., 2011), a proximidade entre os anos determinados para esses cenários pode estar relacionada à similaridade dos RCPs no início do século XXI (período em que a maioria das projeções dos modelos climáticos atinge os limiares de 1,5°C e 2,0°C). Esse comportamento também foi observado por Karmalkar e Bradley (2017), ao avaliarem as consequências do aquecimento global de 1,5°C e 2°C nos Estados Unidos usando os RCPs 4.5 e 8.5.

**Tabela 1.2.** Ano em que os limiares de 1,5°C e 2°C serão atingidos. Traço (-) representa que o modelo não possui projeção para o respectivo RCP e o asterisco (\*) representa que a projeção do modelo não atingiu o limiar de 1,5°C ou 2°C até 2100.

Modelo	1,5°C				2,0°C			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
ACCESS1.0	-	2032	-	2030	-	2052	-	2041
ACCESS1.3	-	2037	-	2030	-	2056	-	2041
CanESM2	2015	-	-	2013	2033	-	-	2027
CMCC-CESM	-	-	-	2036	-	-	-	2048
CMCC-CM	-	2033	-	2028	-	2050	-	2041
CMCC-CMS	-	2035	-	2030	-	2051	-	2041
CNRM-CM5	2041	2036	-	2030	*	2057	-	2044
CSIRO-Mk3.6.0	2035	2035	2047	2033	*	2048	2065	2045
EC-EARTH	-	2025	-	2022	-	2047	-	2039
FGOALS-g2	*	2040	-	2030	*	*	-	2046
GISS-E2-H	2030	2023	2025	-	*	2050	2052	-
GISS-E2-H-CC	-	2022	-	2021	-	2050	-	2041

GISS-E2-R	*	2019	2021	2008	*	*	2052	2026
GISS-E2-R-CC	-	2042	-	2037	-	*	-	2054
HadGEM2-AO	2050	2048	2046	2034	*	2045	2062	2046
HadGEM2-CC	-	2039	-	2029	-	2057	-	2042
INM-CM4	-	2062	-	2044	-	*	-	2058
IPSL-CM5A-LR	2012	2015	2013	2012	2035	2032	2033	2027
IPSL-CM5A-MR	2019	-	2020	2017	2051	-	2041	2031
IPSL-CM5B-LR	-	2027	-	2023	-	2050	-	2038
MIROC-ESM	2022	2021	2027	2020	2042	2034	2042	2031
MIROC-ESM-CHEM	2019	2022	2024	2019	2035	2036	2040	2031
MPI-ESM-LR	2024	2021	-	2019	*	2044	-	2035
MPI-ESM-MR	2025	2025	-	2021	*	2047	-	2039
MRI-CGCM3	*	2056	2060	2041	*	*	2078	2053
MRI-ESM1	-	-	-	2036	-	-	-	2049
Média	2027	2033	2031	2027	2039	2047	2052	2040
Desvio Padrão (anos)	12	12	16	9	7	7	14	9

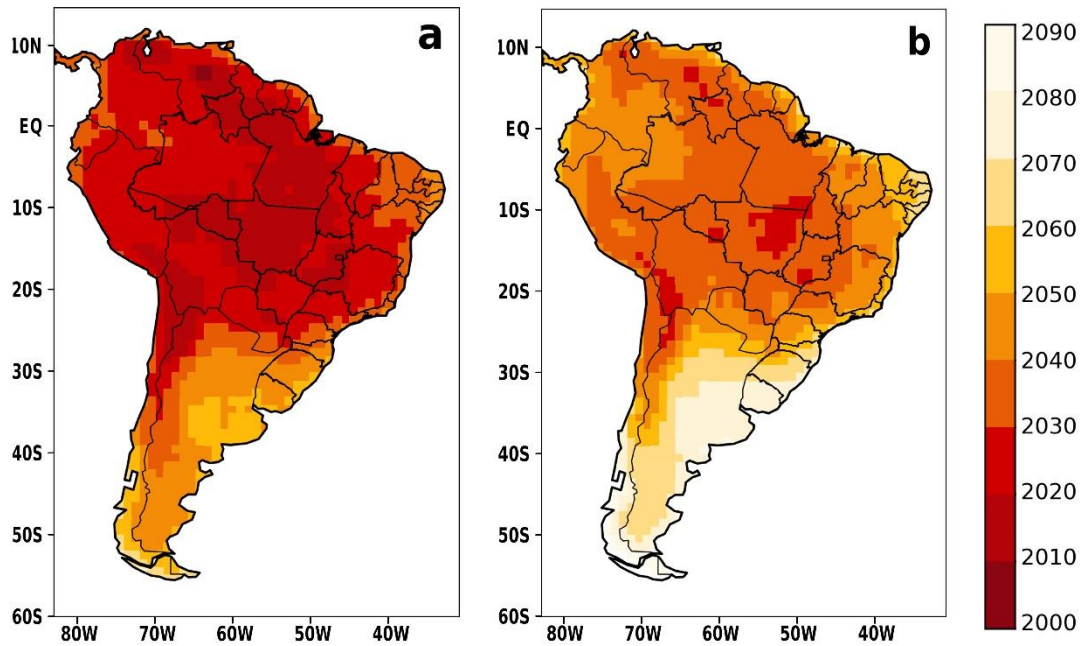
A Figura 1.3, demonstra o padrão temporal dos períodos em que os modelos climáticos do CMIP5 projetam o aumento de 1,5° e 2,0°C na temperatura média global e os respectivos desvios padrões. Em relação ao desvio padrão, destaca-se maiores valores para o cenário de emissão RCP 6.0, sendo igual a 16 anos para aumento de 1,5° e a 14 anos para 2,0°C. Este resultado pode ser explicado pela menor quantidade de projeções disponíveis que considera este RCP, mas também porque os resultados do modelo MRI-CGCM3, provenientes do *Meteorological Research Institute of Japan*, apresentaram projeções de aquecimento mais tardias, quando comparado com as demais projeções.



**Figura 1.3** - Demonstração do ano em que ocorre o aquecimento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C para os quatro cenários de forçante radiativa (RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) e para a média de todos os RCPs, denominado *ALL RCPs*.

Ressalta-se que o foco deste estudo não consistiu na identificação do período de aumento da temperatura média global, mas sim na análise dos padrões climáticos de temperatura e de precipitação associados a este aumento. Por este motivo optou-se pela utilização dos quatro RCPs, mesmo com os RCP2.6 e RCP6.0 possuindo menor número de modelos com projeções disponíveis (Tabela 1.1).

Por fim, a Figura 1.4 apresenta o *ensemble* do ano médio em que os limiares 1,5° e 2°C serão atingidos regionalmente, em relação ao período pré-industrial, baseado na média entre todos os cenários de RCPs. Devido aos vieses de aquecimento dos modelos na simulação da temperatura na América do Sul (TORRES; MARENGO, 2013), o ano apresentado está avançado quando comparado às observações. No entanto, a Figura 1.3 pode ser interpretada como uma análise qualitativa da evolução local do aquecimento regional. Para ambos os limiares, é possível observar que o aquecimento ocorrerá antecipadamente na subdivisão AMZ (região central e norte da América do Sul), principalmente no Centro-Oeste brasileiro, no leste/sul da Amazônia e na parte central dos Andes. Por outro lado, dentre as regiões que atingirão os limiares posteriormente, destaca-se o sul das subdivisões SSA e WSA, compreendendo o sul do Chile, a maior parte da Argentina, o Uruguai e os estados brasileiros do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.



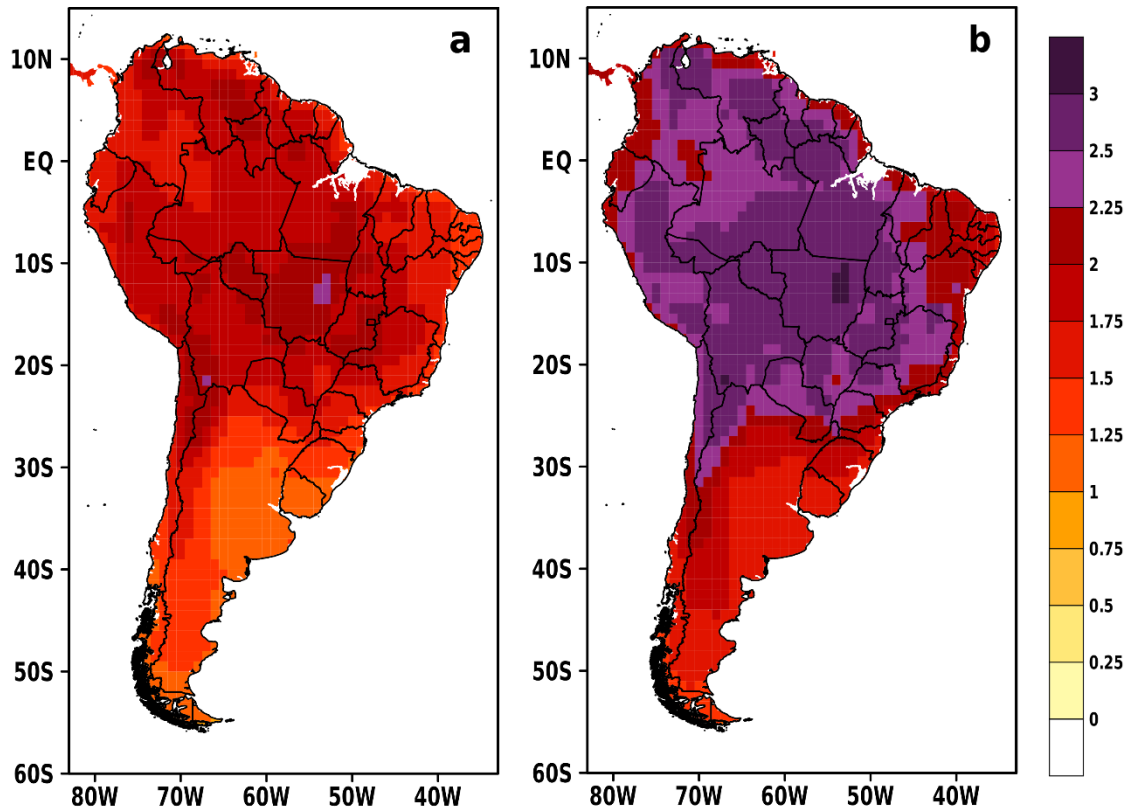
**Figura 1.4** – Ano médio em que os limiares de 1,5° (a) e 2,0°C (b) serão atingidos localmente, em relação ao período pré-industrial (1861-1890), baseado na média do conjunto de todos os cenários de RCPs.

### 1.3.2. Alterações nos padrões de temperatura e precipitação na América do Sul

Ao analisar a variação anual da temperatura na América do Sul, identifica-se um padrão semelhante em ambos os limiares de 1,5°C e 2,0°C (Figura 1.5). Um aumento adicional de cerca de 0,5°C é projetado em uma vasta área do continente, cobrindo praticamente toda as áreas pertencentes as subdivisões AMZ, CAM, centro-norte da WSA (Peru e parte da Cordilheira dos Andes) e NEB, com exceção da região litorânea do Nordeste brasileiro.

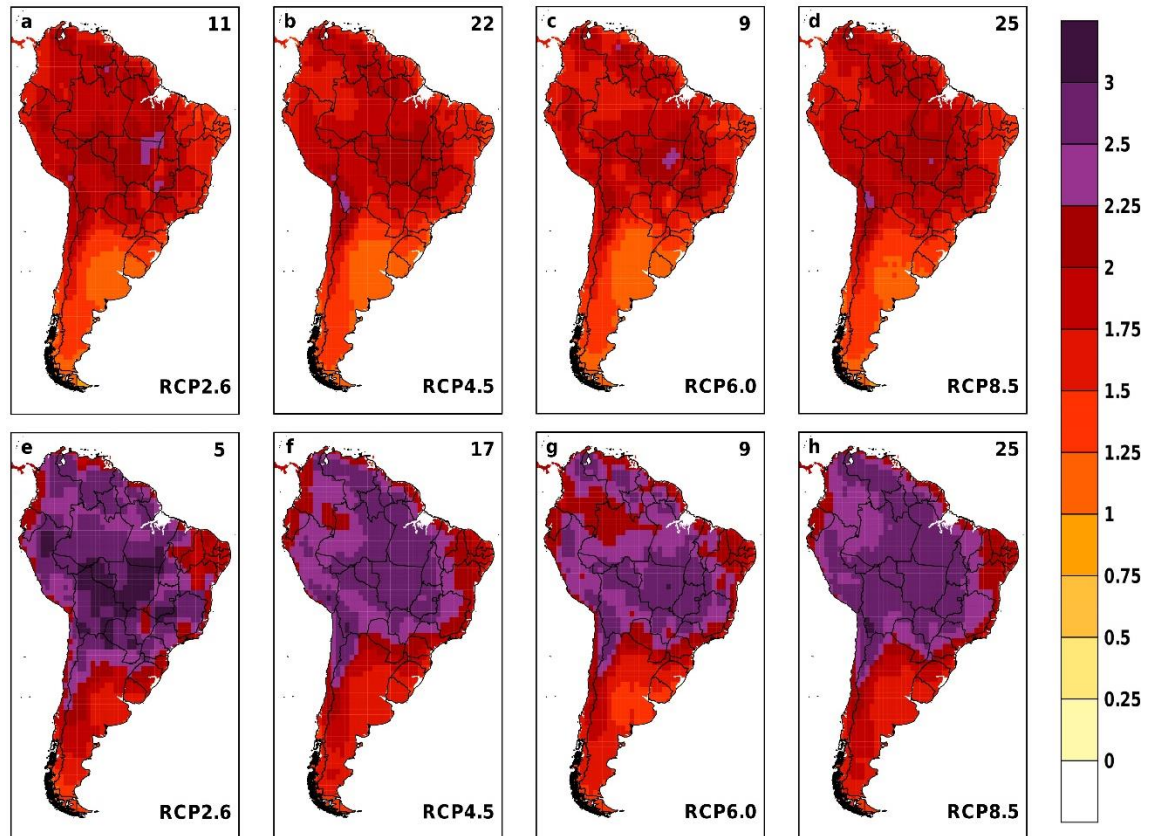
As regiões de aquecimento mais rápido na América do Sul coincidem com as regiões de mudanças mais pronunciadas nos padrões de temperatura já identificadas em outros estudos usando as projeções dos modelos climáticos CMIP3 e CMIP5 (IPCC, 2007, 2014; TORRES; MARENGO, 2013; BLÁZQUEZ; NUÑEZ, 2013), bem como em modelos climáticos regionais (MARENGO et al. 2010; SÁNCHEZ et al. 2015; CHOU et al. 2014). Além disso, alguns estudos analisando temperatura e precipitação já identificaram o sul da Amazônia e a região centro-oeste e oeste do estado de Minas Gerais no Brasil como pontos críticos de mudanças climáticas persistentes em diferentes cenários de forçantes nos conjuntos de dados do CMIP3 e do CMIP5 (TORRES et al., 2012; DIFFENBAUGH; GIORGI, 2012; TORRES; MARENGO, 2014; DARELA et al., 2016).

Estudos aplicados para outras regiões do globo identificaram padrões similares aos apresentados neste estudo, por exemplo, as projeções indicam que o norte da China experimentará um aquecimento mais rápido e intenso em comparação ao sul da China (SHI et al., 2018) e que a Europa será 1°C mais quente do que a média global para um aquecimento global de 2,0°C (SANDERSON et al., 2017).



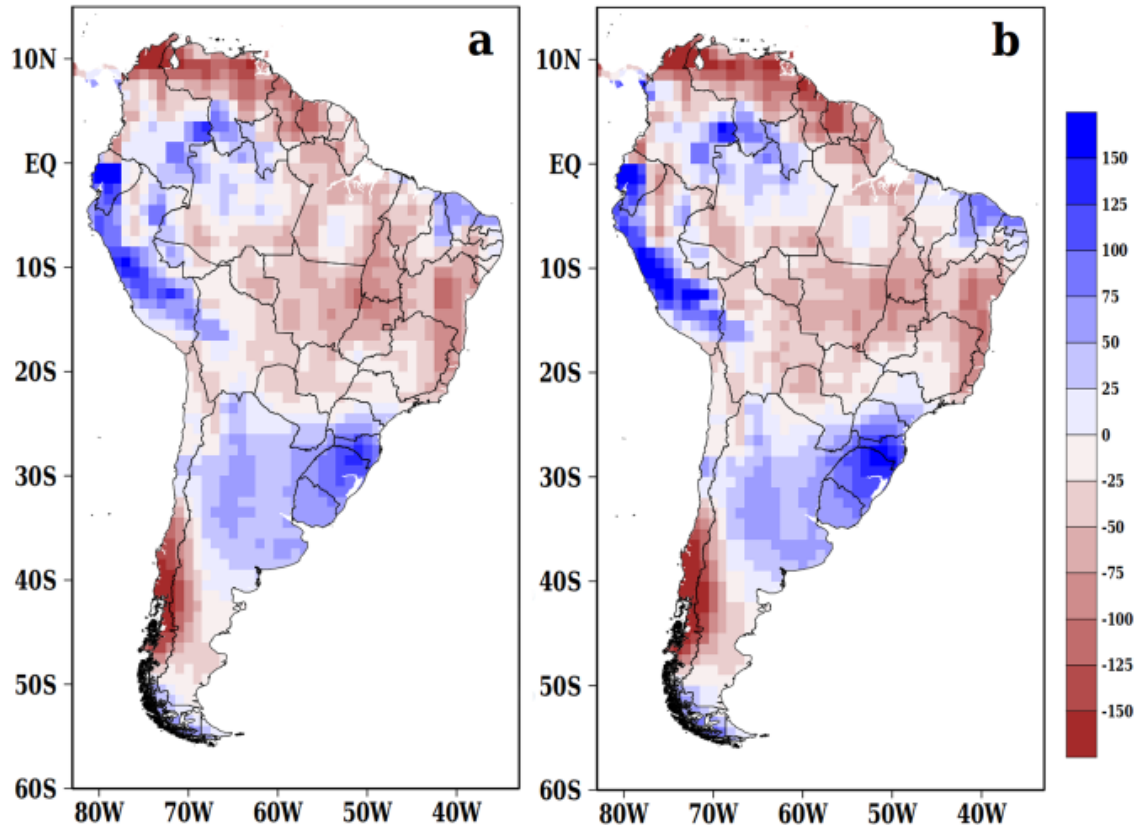
**Figura 1.5** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de temperatura do ar próximo à superfície (°C) na América do Sul, projetado por 26 Modelos do Sistema Terrestre do CMIP5 nos quatro cenários RCPs para um aquecimento global de 1,5°C (a) e 2°C (b), em relação ao período pré-industrial (1861 - 1890).

Ao analisar as mudanças de temperatura projetadas em cada cenário de forçante radiativa (Figura 1.6), observa-se a similaridade dos padrões de mudança de temperatura projetados pelos quatro RCPs e para os limiares de aquecimento global de 1,5°C e 2°C, o que pode indicar que há pouca influência das trajetórias de emissão na caracterização espacial da mudança. No entanto, há uma divergência maior nas projeções para os cenários RCP2.6 e RCP6.0 para o limiar de 2°C, que pode estar relacionada ao pequeno número de projeções disponíveis nestes cenários em comparação com os outros cenários (5 e 9 modelos para cenários RCP2.6 e RCP6.0, respectivamente).



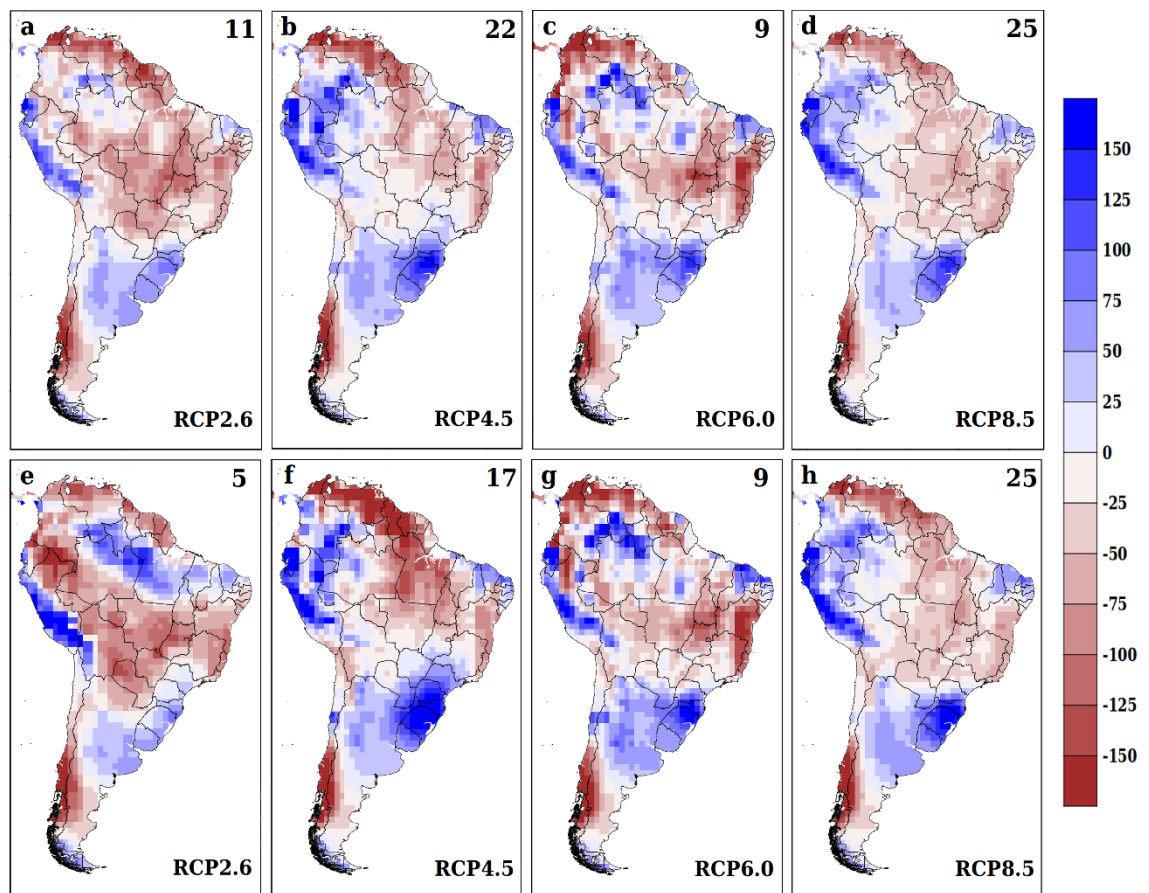
**Figura 1.6** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de temperatura do ar próximo a superfície (°C) na América do Sul, para o aquecimento global de 1,5°C (a,b,c,d) e 2°C (e,f,g,h) em relação ao período pré-industrial (1861-1890), nos cenários RCP2.6 (a, e), RCP4.5 (b, f), RCP6.0 (c, g) e RCP8.5 (d, h). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto superior direito de cada imagem.

Em relação aos padrões de variação da precipitação (Figura 1.7), também existe uma alta semelhança entre os limiares de 1,5°C e 2,0°C. É possível identificar regiões que apresentam projeções de aumento anual de precipitação, destacando-se a região Sul do Brasil, o norte da Argentina, o Uruguai, pertencente a subdivisão SSA, o litoral norte do NEB e a região norte da subdivisão WSA, cujos cenários projetam aumentos que podem exceder 100 mm ano<sup>-1</sup>. Em relação às regiões cujas projeções são de redução de precipitação, destacam-se as áreas entre ao sul da subdivisão WSA e SSA (Chile e a Argentina) e o extremo norte da AMZ e CAM, com anomalias negativas de até 150 mm ano<sup>-1</sup>. Redução menos intensa de precipitação também é projetada para a região central da AS.



**Figura 1.7** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de precipitação ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) na América do Sul, projetado por 26 Modelos do Sistema Terrestre do CMIP5 nos quatro cenários RCPs para um aquecimento global de  $1,5^{\circ}\text{C}$  (a) e  $2^{\circ}\text{C}$  (b), relativo ao período pré-industrial (1861 - 1890).

Os padrões espaciais de alterações na precipitação acumulada para cada cenário de emissão (Figura 1.8) são semelhantes entre os quatro RCPs, assim como observado para a temperatura (Figura 1.6). No entanto, é possível identificar um aumento na magnitude das anomalias no limiar de  $2^{\circ}\text{C}$ , quando comparado ao limiar de  $1,5^{\circ}\text{C}$ , principalmente para a região sul do Brasil (leste de SSA) e para o Peru (norte de WSA), com anomalias positivas de até  $150 \text{ mm ano}^{-1}$ . Quanto à temperatura (Figura 1.6), as trajetórias de emissão parecem ter pouca influência na caracterização espacial das mudanças. Estudos que avaliaram o impacto do aquecimento médio global de  $1,5^{\circ}\text{C}$  ou  $2^{\circ}\text{C}$  para outras regiões do globo, também destacaram diferenças na magnitude do padrão de precipitação entre os dois limiares, tanto para aumento como para redução da precipitação, além de divergências entre o padrão espacial com base em qual RCP analisado (SHI et al., 2018).



**Figura 1.8** – Padrão médio do *ensemble* da mudança de precipitação ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) na América do Sul, para o aquecimento global de  $1,5^{\circ}\text{C}$  (a,b,c,d) e  $2,0^{\circ}\text{C}$  (e,f,g,h) em relação ao período pré-industrial (1861-1890), nos cenários RCP2.6 (a, e), RCP4.5 (b, f), RCP6.0 (c, g) e RCP8.5 (d, h). O número de projeções usado para calcular a média é indicado no canto superior direito de cada imagem.

### 1.3.3. Possíveis impactos nas principais culturas na América do Sul

Os setores agrícola e florestal são importantes para a economia dos países da América do Sul. Devido aos diferentes tamanhos das áreas de cultivo, estruturas, e aos diferentes níveis de tecnologia entre os países da América do Sul, os dois setores possuem diferenças significativas em termos de culturas cultivadas, árvores plantadas, sistemas de produção, importância econômica e contribuição para a geração de renda e comércio. Uma vez que ambos setores são vulneráveis aos aumentos da temperatura do ar e déficit hídrico (MARTINS et al. 2019; ELLI et al. 2020a,b), um aumento adicional de  $0,5^{\circ}\text{C}$  em quase toda a América do Sul associado a padrões heterogêneos de precipitação, podem trazer ameaças adicionais.

Os estudos realizados até o momento destacaram que os impactos das mudanças climáticas nas culturas agrícolas e florestais além de serem altamente complexos, são dependentes da espécie e das condições climáticas da região de cultivo.

Um aumento adicional de 0,5°C em quase toda a América do Sul e mudanças nos padrões de precipitação (Figuras 1.5, 1.6, 1.7, 1.8) podem resultar em impactos positivos em algumas culturas para algumas regiões da América do Sul e impactos negativos em outras (MARENGO et al., 2014; ASSAD et al., 2016; SANTOS et al., 2017; ZILLI et al., 2020). Por exemplo, para as principais culturas de grãos na AS, o aumento da temperatura, como o aquecimento de até 0,5°C, pode alterar as taxas de desenvolvimento, as respostas fenológicas e fisiológicas (STRECK et al., 2012; MARTINS et al., 2019; FATIMA et al., 2020), além de interromper o crescimento e o desenvolvimento e modificar as áreas atualmente adequadas para ambas as culturas (ASSAD et al., 2016; RAMIREZ-CABRAL, 2017; ZILLI et al., 2020).

Projetam-se redução no ciclo de desenvolvimento das culturas de grãos na AS, ou seja, uma antecipação da ocorrência dos estágios fenológicos, principalmente no Sudeste do Brasil (STRECK et al., 2012; MINUZZI et al., 2017), na Argentina e no Uruguai (FATIMA et al., 2020), e aumento no ciclo de desenvolvimento, ou seja, um prolongamento na ocorrência dos estágios fenológicos em partes do Sudeste e do Nordeste do Brasil (MARTINS et al., 2019). Ambas as situações podem gerar mudanças significativas nas práticas do manejo do solo, devido ao binômio entre o aparecimento dos estágios e o momento de ocorrência de pragas e doenças, além de alterações no calendário de plantio (STRECK et al., 2013; ASSAD et al., 2016; CERA et al., 2017; MINUZZI et al., 2017). A princípio, uma antecipação dos estágios fenológicos pode ser benéfica por um lado, permitindo o cultivo de mais de uma safra de determinadas culturas por ano (STRECK et al., 2012; RAMIREZ-CABRAL et al., 2017; MARTINS et al., 2019). No entanto, devido ao encurtamento do ciclo e antecipação dos estágios fenológicos, como a floração e maturidade, pode haver menor produção e qualidade dos grãos (MARENGO et al., 2014; CERA et al., 2017; MARTINS et al., 2019; FATIMA et al., 2020). A redução na produção foi primeiramente atribuída ao menor tempo disponível para a realização da fotossíntese e acúmulo de fotoassimilados (TAO et al., 2015; SANTOS et al., 2017). Além disso, a elevação da temperatura durante as fases reprodutivas promove a esterilidade do pólen e eleva a evapotranspiração, resultando em menor taxa fotossintética, e no tamanho e peso dos grãos (STRECK et al., 2012; HATFIELD; PRUEGUER, 2015; FATIMA et al., 2020). Justamente por isso, em locais onde as temperaturas mais elevadas são projetadas para ocorrer mais cedo (Figura 1.4 e Tabela 1.2), deve ocorrer uma mudança nas

datas de semeadura afim de minimizar os danos devido ao estresse térmico e a possíveis lesões nas estruturas reprodutivas (STRECK et al., 2012; HAO et al., 2014; CERA et al., 2017; MARTINS et al., 2019). Além disso, insetos e patógenos podem se multiplicar ainda mais e sobreviver mesmo durante os meses mais frios, aumentando os riscos e custos com pulverizações, as quais não são estratégias ecologicamente corretas.

Com relação aos possíveis impactos na produtividade agrícola nos países da América do Sul, projeta-se o aumento da produtividade potencial nas regiões subtropicais, enquanto nas regiões tropicais projeta-se diminuição (ASSAD et al., 2016; CERA et al., 2017; MARTINS et al., 2019; ZILLI et al., 2020). Com exceção da Argentina, Uruguai, sul do Chile e sul do Brasil, reduções na produção de grãos são projetadas ao longo do século 21, principalmente no Centro-Oeste do Brasil (ASSAD et al., 2016). Parte desses resultados pode estar relacionado com a redução das áreas aptas para a produção de soja (entre 63 e 65,7%) e de milho (entre 43% e 85%) (ASSAD et al., 2016; RAMIREZ-CABRAL et al., 2017). Além disso, mesmo com os impactos positivos das mudanças climáticas nas produtividades potenciais de ambas as culturas, a competição pelo uso da terra e as projeções econômicas futuras resultam em uma redução da área com cultivo de soja (e milho) no Brasil, Argentina e Uruguai (RAMIREZ-CABRAL et al., 2017; ZILLI et al., 2020). Por exemplo, em 2050, a área destinada ao cultivo de soja no Brasil será 17% a 38,5% menor comparada ao clima atual (2000-2015), resultando em redução na produção de 6,3% a 36,5% (ZILLI et al., 2020). Da mesma forma que para a soja, em 2050, a redução percentual média da área de cultivo do milho no Brasil é de 14,6% a 37,5%, com reduções semelhantes na produção (ZILLI et al., 2020), e áreas produtoras migrando para o sul (CERA et al., 2017; ZILLI et al., 2020). Enquanto a Argentina e o Uruguai sofrerão redução na aptidão climática somente no final do século 21, o Brasil, Paraguai e Bolívia poderão ter uma redução radical na aptidão climática até 2050. Isso ocorrerá principalmente devido ao aumento da temperatura e diminuição na precipitação (RAMIREZ-CABRAL et al., 2017).

O futuro da agricultura sul-americana depende do crescimento da produtividade com rapidez suficiente para evitar (ou se adaptar) aos impactos mais nefastos das mudanças climáticas (ZILLI et al., 2020). As estratégias de adaptação são a única forma de reduzir os impactos negativos das mudanças climáticas agricultura. Esta abordagem envolve o uso de espécies/clones geneticamente adaptadas, revoluções nas técnicas de melhoramento de plantas (molecular e convencional, de forma a incorporar as características desejadas), melhoria nas práticas de manejo de safras, redimensionamento e expansão da irrigação (STRECK et al., 2012; MARTINS et al., 2019; FATIMA et al., 2020; ZILLI et al., 2020). Essas abordagens

requerem tempo. Por exemplo, é necessário de 8 a 12 anos para introduzir uma nova cultivar no mercado, e provavelmente estarão fora do alcance dos pequenos agricultores, que certamente serão fortemente impactados pelas mudanças climáticas (FATIMA et al., 2020; ZILLI et al., 2020). No entanto, outra opção para tornar a agricultura sul-americana mais resiliente é por meio da adoção em larga escala de práticas ambientais sustentáveis, como por exemplo, a recuperação e preservação de serviços ecossistêmicos valiosos (disponibilidade de água, controle de temperatura local, florestamento), resultando em maior resiliência a mudança climática e contribuindo para a sua mitigação.

Os impactos relacionados ao setor florestal, especialmente no eucalipto que é a espécie de maior importância na AS serão abordados no capítulo II.

#### **1.4. CONCLUSÃO**

Avaliações sobre os impactos do aquecimento médio global em 1,5°C e 2°C nos sistemas ambientais, sociais e econômicos são importantes para um melhor planejamento governamental e criações de medidas que mitiguem ou minimizem os danos causados por alterações no clima. Por isso, destaca-se a necessidade, e incentiva-se a elaboração de estudos que avaliem o impacto do aquecimento em 1,5°C e 2°C em escala regional e em setores específicos, como: agricultura, geração de energia, disponibilidade de recursos naturais e danos a população.

O limiar de aquecimento regional de 1,5°C e 2°C será atingido primeiramente no interior do continente, principalmente nas regiões central e norte da AMZ, e parte central dos Andes. Por outro lado, destaca-se o sul de WSA e a maior parte da SSA como as regiões que atingirão os limiares de aquecimento de forma mais tardia. Assim, as regiões que apresentam o aquecimento antecipadamente são as regiões que apresentam as maiores magnitudes de aumento de temperatura, quando comparado ao período industrial.

Em relação as alterações no padrão de precipitação sobre a América do Sul, destaca-se as regiões de SSA e WSA (Sul do Brasil, do litoral norte do Nordeste brasileiro, o norte da Argentina, o Uruguai e partes do Peru) e norte da AMZ e CAM (Equador, da Colômbia e da Venezuela), cujos cenários projetam aumentos que podem exceder 100 mm ano<sup>-1</sup>. Já as demais regiões serão afetadas com redução da precipitação anual. Na análise individual de cada RCP para o padrão de precipitação, destaca-se pequenas divergências nos padrões projetados entre o período de 1,5°C e 2°C e os diferentes cenários de forçantes radiativas.

A contribuição científica deste trabalho se deve, primeiramente, à lacuna de estudos dessa natureza realizados para a América do Sul. E a importância em determinar os padrões de precipitação e temperatura do ar próximo a superfície, para os períodos referentes ao aquecimento médio global de 1,5°C e 2°C.

## 1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; ROO, de A.; SALAMON, O.; WYSER, K.; FEYEN, L. Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, v. 5, n. 2, p. 171-182, 2017.

ALLEN, M.R.; DUBE O.P.; SOLECKI W.; ARAGÓN-DURAND F.; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J.; MAHOWALD, N.; MULUGETTA, Y.; PEREZ R.; WAIRIU, M.; ZICKFELD K. Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. 2018 [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, J. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD T. (eds.)]. In Press.

ANDERSON, K. Duality in climate science. *Nature Geoscience*, v. 8, p. 898, 2015.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. de MACHADO. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, p.1-8. 2013.

BARCELLOS, C.; HACON, S. de S. Um grau e meio. E daí? *Cadernos de Saúde Pública*, v. 32, p. 2123-2135, 2016.

BLÁZQUEZ J, NUÑEZ M. N. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Climate Dynamics*, v. 41, p. 1039–1056, 2013.

BOONE, R.B.; CONANT, R.T.; SIRCELY, J.; THORNTON, P.K.; HERRERO, M. Climate change impacts on selected global rangeland ecosystem services. *Global change biology*, v. 24, p.1382-1393, 2018.

CERA, J.C.; STRECK, N.A.; FENSTERSEIFER, C. A. J.; FERRAZ, S. E. T.; BEXAIRA, K. P.; SILVEIRA, W. B.; CARDOSO, Â. P. Soybean yield in future climate scenarios for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, p. 380-392, 2017.

CHEN, J.; CHAO, G.; XIAOFAN, Z.; MING, X.; YANJUN, W.; CHENG, J.; KRYSANOVA, V.; HUANG, J.; ZHAO, N.; SU, B. Assessing changes of river discharge under global warming of 1.5 C and 2 C in the upper reaches of the Yangtze River Basin:

Approach by using multiple-GCMs and hydrological models. **Quaternary International**, v. 453, p. 63-73, 2017.

CHEN, S.; WU, R.; CHEN, W. Projected changes in midhigh latitude Eurasian climate during boreal spring in a 1.5°C and 2°C warmer world. **International Journal of Climatology**, v. 40, p. 1851-1863, 2020.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014.

DARELA, JP; LAPOLA, D. M.; TORRES, R. R.; LEMOS, M. C. Socio-climatic hotspots in Brazil: how do changes driven by the new set of IPCC climatic projections affect their relevance for policy? **Climatic Change**, v. 136, p. 413-425, 2016.

DIFFENBAUGH N. S, GIORGI F. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. **Climatic Change** v. 114, p. 813–822, 2012.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; NEIL H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v.114, p.106325, 2020a.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020b.

FATIMA, Z.; AHMED, M.; HUSSAIN, M.; ABBAS, G.; UL-ALLAH, S.; AHMAD, S.; AHMED, N.; ALI, M.A.; SARWAR, G.; UL HAQUE, E.; IQBAL, P. The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-21, 2020.

FLORÊNCIO, G. W., MARTINS, F. B., FERREIRA, M. D. C.; PEREIRA, R. A. D. A. Impacts of climatic changes on the vegetative development of olive cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p.641-647, 2019.

FU, Y. H.; LU, R. Y.; GUO, D. Changes in surface air temperature over China under the 1.5 and 2.0 C global warming targets. **Advances in Climate Change Research**, v. 9, p. 112-119, 2018.

GAMBHIR, A.; JOERI, R.; GUNNAR, L.; SHERIDAN, F.; TAMARYN, N. Energy system changes in 1.5 C, well below 2 C and 2 C scenarios. **Energy Strategy Reviews**, v. 23, p. 69-80, 2019.

GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, p. 371-385, 2016.

HALLEGATTE, S.; ROGELJ, J.; ALLEN, M.; CLARKE, L.; EDENHOFER, O.; FIELD, C. B.; STOCKER T. F.; VAN VUUREN, D. P. Mapping the climate change challenge. **Nature Climate Change**, v. 67, p. 663–668, 2016.

HATFIELD, J.L.; PRUEGUER, H. Temperature extremes: effects on plant growth and development. **Weather Climate Events**, v. 10, p. 4-10, 2015.

HOEGH-GULDBERG, O.; BINDI, M.; ALLEN, M. Chapter 3: Impacts of 1.5 °C of Global Warming on Natural and Human Systems. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), v. 1, p. 1-246, 2018.

IPCC, 2007: Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp, 2007.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: **The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Edited by STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

JIANG, K.; CHENMIN, H.; XIANGYANG, X.; WEIYI, J.; PIANPIAN, X.; HONG, L.; JIA, L. Transition scenarios of power generation in China under global 2 C and 1.5 C targets. **Global Energy Interconnection**, v. 1, p. 477-486, 2018.

JONES PW. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. **Monthly Weather Review**, v. 127, p. 2204–2210, 1999.

KARMALKAR, A. V.; BRADLEY, R. S. Consequences of global warming of 1.5 C and 2 C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLoS One**, v. 12, p. 168697, 2017.

KING, A. D.; KAROLY, D. J.; HENLEY, B. J. Australian climate extremes at 1.5C and 2C of global warming. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 412-416, 2017.

KNUTTI, R.; ROGELJ, J.; SEDLÁČEK, J.; FISCHER, E. M. A scientific critique of the two-degree climate change target. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 13–18, 2016.

LEWIS, S. C.; KING, A. D.; PERKINS, K. S. E.; MITCHELL, D. M. Regional hotspots of temperature extremes under 1.5° C and 2° C of global mean warming. **Weather and Climate Extremes**, v. 26, p. 100233, 2019.

LI, Y.; TAO, H.; SU, B.; KUNDZEWICZ, Z. W.; JIANG, T. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on winter snow depth in Central Asia. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 2866-2873, 2019.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J.A.; CHOU, S., TORRES, R.R.; GIAROLLA, A.; ALVES, L.M.; LYRA, A. Climate change in central and South America: recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture, **CGIAR**, v. 73, p. 1-93, 2014.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 339-350, 2019.

MIDEKSA, T. K.; KALLBEKKEN, S. The impact of climate change on the electricity market: A review. **Energy Policy**, v. 38, p. 3579-3585, 2010.

MINUZZI, R.B.; FREDERICO, L.C.DO; SILVA, T.G.F DA. Estimation of soybean performance in climatic scenarios for Southern Brazil. **Revista Ceres**, v. 64, p. 567-573, 2017.

MENDELSON, R. The impact of climate change on agriculture in developing countries. **Journal of Natural Resources Policy Research**, v. 1, p. 5-19, 2008.

MONTROULL, N. B.; SAURRAL, R. I.; CAMILLONI, I, A. Hydrological impacts in La Plata basin under 1.5, 2 and 3° C global warming above the pre-industrial level. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 8, p. 3355-3368, 2018.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN-VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N. RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

PECL, G. T.; ARAUJO, M. B.; BELL, J.; BLANCHARD, J.; BONEBRAKE, T. C.; CHEN, I.; CLARK, T. D.; COLWELL, R. K.; DANIELSEN, F.; EVENGARD, B.; ROBINSON, S. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**, v. 355, p. 6332, 2017.

PIROVANI, D.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; JÚNIOR, W.C.J.; MACHUCA, M.A.H.; SANTOS, G.M.A.D.A.; SILVA, S.F.; ALMEIDA, S.L.H.; PELUZIO, T.O.; EUGENIO, F.C.; MOREIRA, T.R.; ALEXANDRE, R.S.; SANTOS, A.R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 405-416, 2018.

RAMIREZ-CABRAL, N. Y. Z.; KUMAR, L.; SHABANI, F. Global alterations in areas of suitability for maize production from climate change and using a mechanistic species distribution model (CLIMEX). **Scientific Reports**, v. 7, p. 1-13, 2017.

RHODES, C. J. The 2015 Paris climate change conference: COP21. **Science progress**, New York, v. 99, p. 97-104, 2016.

ROGELJ, J.; POPP, A.; CALVIN, K. V.; LUDERER, G.; EMMERLING, J.; GERNAAT, D.; FUJIMORI, S.; STREFLER, J.; HASEGAWA, T.; MARANGONI, G.; KREY, V.; KRIEGLER, E.; RIAHI, K.; VAN-VUUREN, D. P.; DOELMAN, J.; DROUET, L.; EDMONDS, J.; FRICKO, O.; HARMSSEN, M.; HAVLÍK, P.; HUMPENÖDER, F.; STEHFEST, E.; TAVONI, M. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 325, 2018.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R. P.; MOURÃO, C.; LI, L.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twentyfirst century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 2193-2212. 2015.

SANDERSON, BENJAMIN M.; XU, YANGYANG.; TEBALDI, CLAUDIA.; WEHNER, MICHAEL.; O'NEILL, BRIAN C.; JAHN, ALEXANDRA; PENDERGRASS, ANGELINE G.; LEHNER, FLAVIO.; STRAND, WARREN G.; LIN, LEI.; KNUTTI, RETO.; LAMARQUE, JEAN FRANCOIS. Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5 and 2 C futures. **Earth System Dynamics**, v. 8, p. 827-847, 2017.

SANTOS, D. F.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 77-82, 2017.

SCHLEUSSNER, C. F.; LISSNET, T. K.; FISCHER, E. M.; WOHLAND, J.; PERRETTE, M.; GOLLY, A.; ROGELJ, J.; CHILDERS, K.; SCHEWE, J.; FRIELER, K.; MENGEL, M.; HARE, W.; SCHAEFFER, M. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 C and 2 C. **Earth system dynamics**, v. 7, p. 327-351, 2016.

SILVA, Patricia S.; BASTOS, A.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; DA CAMARA, C. C. Impacts of the 1.5° C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest ecology and management**, v. 446, p. 193-203, 2019.

SHI, C.; ZHI-HONG J.; WEI-LIN C.; LAURENT L. Changes in temperature extremes over China under 1.5C and 2C global warming targets. **Advances in Climate Change Research**, v; 9, p. 120-129, 2018.

STRECK, N. A.; SILVA, S. D. DA; LANGNER, J. A. Assessing the response of maize phenology under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p.1-12, 2012.

SUI, Y.; LANG, X.; JIANG, D. Projected signals in climate extremes over China associated with a 2 C global warming under two RCP scenarios. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 678-697, 2018.

TAVARES, P. da S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S. C.; SILVA, A. J. de P.; LYRA, A. de A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, p.1-11, 2017.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, New York, v. 93, p. 485-498, 2012.

TORRES R. R.; LAPOLA D. M.; MARENGO J. A.; LOMBARDO M. A. Socioclimatic hotspots in Brazil. **Climate Change**, v. 115, p. 597–609, 2012.

TORRES R. R.; MARENGO J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 112, p. 253-272, 2013.

TORRES R. R.; MARENGO J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 117, p. 1-9, 2014.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and applied climatology**, v. 117, p. 579-587, 2014.

UL HASSON, S.; SAEED, F.; BOHNER, J.; SCHLEUSSNER, C. F. Water availability in Pakistan from Hindukush–Karakoram–Himalayan watersheds at 1.5° C and 2°C Paris Agreement targets. **Advances in Water Resources**, v. 131, p. 103365, 2019.

VAN VLIET, J.; BERG, M. V. D.; SCHAEFFER, M.; VAN VUUREN, D. P.; ELZEN, M. D.; HOF, A. F.; BELTRAN, A. M.; MEINSHAUSEN, M. Copenhagen accord pledges imply higher costs for staying below 2°C warming. **Climatic Change**, v. 113, p. 551-561, 2012.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C. KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, p.5, 2011.

WARREN, R.; PRICE, J.; GRAHAM, E.; FORSTENHAEUSLER, N.; VANDERWAL, J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5C rather than 2C. **Science**, v. 360, p. 791-795, 2018.

WMO. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. 1989.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLERE, D.; HAVLIK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M.A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 14, p. 139384, 2020.

## CAPÍTULO II

### IMPACTO DO AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM 1,5°C E 2°C NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA O EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL

#### 2.1 INTRODUÇÃO

O *Eucalyptus* é o gênero florestal mais plantado no mundo com área plantada de aproximadamente, 25 milhões de ha (ELLI et al., 2020a). A área cultivada com eucalipto na América do Sul (AS) é de mais de 10 milhões de ha, sendo que os maiores produtores são (em ordem de importância): Brasil (7,5 milhões de ha), Uruguai (760 mil ha), Argentina (350 mil de ha), Chile (200 mil ha) e Equador (164 mil ha) (CARPINETI, 1995; FAO 2011; RUBIO, 2016; ELLI et al., 2020a; RESQUIM et al., 2020). Por isso, é um gênero importante para a economia do Brasil, maior produtor mundial de eucalipto, e dos demais países da AS, que juntos, sem contabilizar o Brasil, ocupam a terceira posição no ranking mundial de cultivo e produção de eucalipto (IBÁ, 2019; ALFRED; ZAITON, 2020).

As espécies do gênero eucalipto são reconhecidas pelo rápido crescimento e curta rotação (geralmente inferior a 7 anos), pela diversidade de uso da sua matéria prima (papel e celulose, carvão vegetal, construção civil e indústria madeireira) e adaptabilidade às diferentes condições edafoclimáticas (HIGA et al., 2000; OTTO et al., 2013; SANTAROSA et al., 2014), permitindo o cultivo em diferentes regiões da AS. Mesmo com os avanços significativos nas práticas de manejo e preparação do solo, assim como a adaptação de clones, melhorias na produção de sementes e no controle de pragas e doenças, o desenvolvimento e a produtividade do eucalipto são fortemente influenciados pelas condições climáticas (GONÇALVES et al., 2017; ELLI et al., 2020a; RESQUIN et al., 2020). As principais condições limitantes ao desenvolvimento e produtividade do eucalipto estão associadas à deficiência hídrica, como períodos de seca prolongada ou intermitente (DE SOUZA et al., 2006; MARTINS et al., 2008; VOSE et al., 2016; QUEIROZ et al., 2017; CÂMARA et al., 2020; ELLI et al., 2020 a,b), e a ocorrência de eventos extremos de temperatura, pois o eucalipto se desenvolve adequadamente entre 10°C e 36°C (MARTINS; STRECK, 2007; FREITAS et al., 2017). Em condições de deficiência hídrica e estresse térmico ocorrem uma série de alterações fisiológicas (de curto a longo prazo) que causam modificações na estrutura celular e anatômica do eucalipto, podendo causar mortalidade das árvores e redução na

produtividade final (ALLEN et al., 2010; BAHUGUNA; JAGADISH, 2015; MARTINS et al., 2011; GONZALEZ-OROZCO et al., 2016). De forma geral, tais alterações são desencadeadas pela redução das reações do processo de fotossíntese, aumento da fotorrespiração e desequilíbrio entre a transpiração e a absorção de CO<sub>2</sub> (ABREU et al., 2015; GAVRICHKOVA et al., 2019; ELLI et al., 2020b).

Nesse sentido, estudos climáticos realizados recentemente para a América do Sul, apontam alterações significativas nos campos médios sazonais e de variabilidade principalmente associados a precipitação e a temperatura do ar (MARENGO, 2001; MARENGO, 2010; BLÁZQUEZ; NUÑES, 2013; TORRES; MARENGO, 2013; MARENGO et al., 2014; GULIZIA; CAMILLONI, 2015; SANTOS et al., 2017; TAVARES et al., 2018; AMBRIZZI et al., 2019; MARTINS et al., 2019; RESENDE et al., 2019; LLOPART et al., 2020). Tais alterações poderão afetar os padrões de evapotranspiração (ALVES et al., 2020; ELLI et al., 2020b) e a disponibilidade de água no solo (ASSAD et al., 2013; TANASIJCIC et al., 2014; MARTINS et al., 2019; SLAMA et al., 2019; RESENDE et al., 2019; ALVES et al., 2020), conseqüentemente gerando impactos no cultivo do eucalipto. Por isso, uma das melhores formas de avaliar o impacto das mudanças climáticas é utilizar as saídas dos modelos climáticos para o cômputo do balanço hídrico climatológico (BHC) (SANTOS et al., 2017; ALVES et al., 2020). O BHC informa a disponibilidade de água no solo através de três extratos: Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC) em nível regional (SENTELHAS et al., 2008; SANTOS et al., 2017; ALVES et al., 2020) para determinada espécie florestal (PIROVANI et al., 2018).

Adicionalmente, com o objetivo de estabilizar o aquecimento entre os limiares de 1,5°C e de 2,0°C em relação aos níveis pré-industriais, a 21ª Conferência das Partes (COP21) propôs um novo acordo internacional chamado de Acordo de Paris (HALLEGATTE et al., 2016; KNUTTI et al., 2016; IPCC, 2018). O acordo visa reduzir os riscos e impactos para os ecossistemas naturais, pois, de forma geral, aumentos acima destes limiares (1,5°C e 2,0°C) impactam negativamente na produtividade florestal (e agrícola), e na adaptação das espécies vegetais ao aquecimento (ALFIERI et al., 2017; ALLEN et al., 2018; IPCC, 2018; HOEGH et al., 2018; ROGELJ et al., 2018). Mesmo que as metas do Acordo de Paris sejam atingidas, os impactos nos sistemas florestais, principalmente em escala regional, ainda serão inevitáveis. Além disso, é importante salientar que os limites de aquecimento são relativos a uma temperatura média global, e quando analisados em escala regional podem projetar impactos heterogêneos.

Apesar de necessários, estudos que avaliam o impacto dos limiares de aquecimento global estabelecidos no Acordo de Paris (1,5°C e 2,0°C) ainda são escassos (KARMALKAR; BRANDLEY, 2017; ALFIERI et al., 2017; FU et al., 2018; CHEN et al., 2019) e não foram realizados para a AS. Por isso, além de não se saber quando esses padrões serão atingidos na AS, e caso sejam atingidos, não se sabe qual será o impacto no BHC, na disponibilidade de água, além de quais serão as consequências para a aptidão ao cultivo do eucalipto na AS. Os poucos trabalhos realizados para o eucalipto na AS, como os de Basso et al. (2010), Elli et al. (2020b) e Resquin et al. (2020) não analisaram essas questões e não apresentaram estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos desfavoráveis ao cultivo do eucalipto na AS.

Justamente por isso, o objetivo deste segundo capítulo da dissertação foi analisar os impactos no BHC (ETR, DEF e EXC) e as consequências na aptidão ao cultivo de eucalipto na AS decorrentes do aumento da temperatura média global em 1,5°C e 2,0°C quando comparado com o período pré-industrial. Ademais, este estudo também buscou elencar algumas estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos desfavoráveis ao cultivo do eucalipto no clima futuro.

## 2.2. METODOLOGIA

### 2.2.1. Dados

Utilizou-se mensais de temperatura do ar próximo à superfície ( $T_{med}$ , °C) e precipitação acumulada (P, mm mês<sup>-1</sup>) provenientes do conjunto de simulações e projeções de 26 modelos climáticos do sistema terrestre do CMIP5. Esses dados foram fornecidos pelo *World Climate Research Programme* e disponibilizados pelo *Earth System Grid data portal* (TAYLOR et al., 2012), disponível em <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip5-dkrz>, com resoluções espaciais que variam de 0,8° a 3° de latitude/longitude. Maiores informações sobre as especificações dos modelos climáticos (resoluções espaciais) e cenários de emissões (RCPs) foram detalhados no item 1.2.1 (Capítulo I). Além disso, informações sobre a determinação dos limiares de aquecimento médio global em 1,5°C e 2,0°C estão detalhadas no item 1.2.2 (Capítulo I).

Para o cálculo do BHC (detalhes em 2.2.3) foram utilizados dados de mensais de  $T_{med}$  e P referentes aos períodos em que as projeções atingem o aquecimento médio global de 1,5°C e 2,0°C.

Além da análise do BHC para o período pré-industrial (1861-1890) e para os períodos de aquecimento médio global em 1,5°C e 2,0°C, calculou-se também o BHC para o período

de 1975-2005, denominado período presente. O período presente foi determinado como sendo o período mais atual dentre as simulações dos modelos climáticos pertencentes ao CMIP5.

### 2.2.2 Obtenção da climatologia, da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração para o eucalipto

Primeiramente foram calculadas as médias mensais climatológicas da  $T_{med}$  do ar e P a partir do cálculo da média móvel (30 anos) centrada no ano em que se projeta o aquecimento de 1,5°C e 2,0°C, para cada modelo climático e cenário de emissão (RCP) pelas equações 1 e 2:

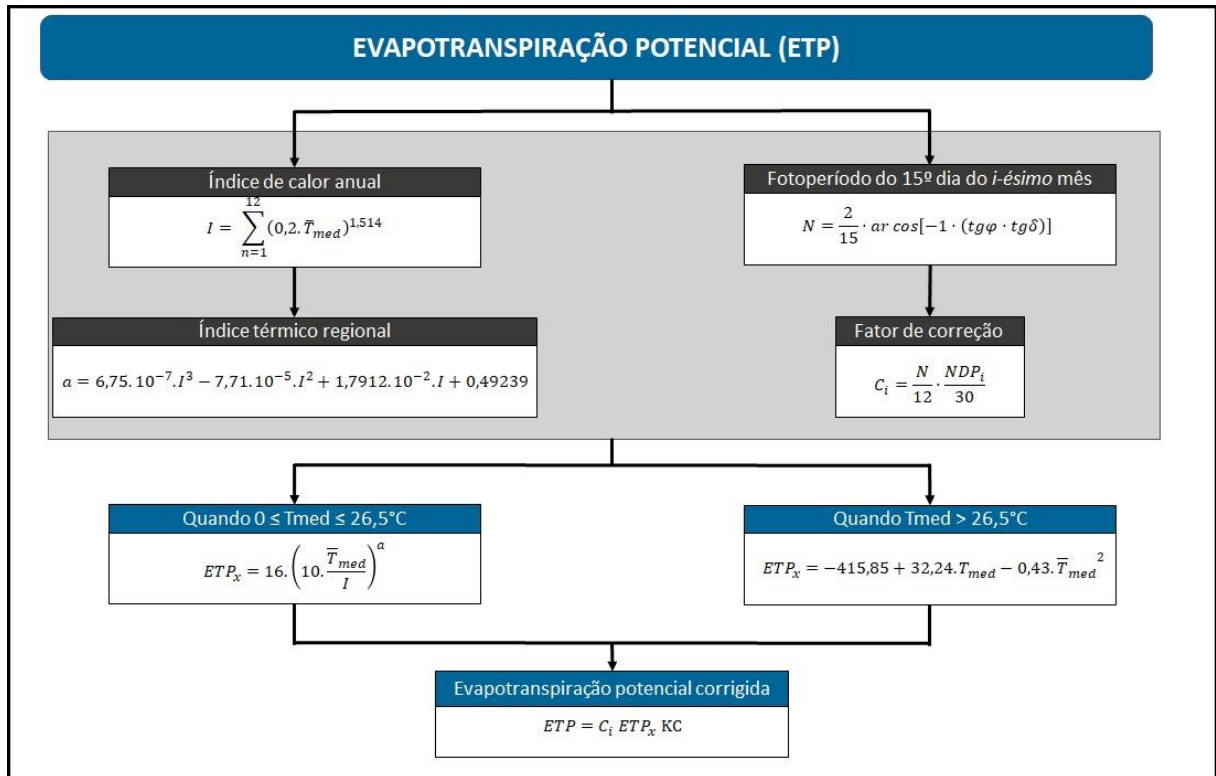
$$\bar{T}_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{med}}{n} \quad (1)$$

$$\bar{P}_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n} \quad (2)$$

Em que:  $\bar{T}_{med}$  é a média climatológica da temperatura média do ar do *i-ésimo* mês (°C),  $T_{med}$  é a temperatura média mensal próxima à superfície (°C) obtido para cada modelo climático e RCP;  $\bar{P}_{med}$  é a média climatológica da precipitação mensal acumulada (mm mês<sup>-1</sup>) e P é a precipitação acumulada do *i-ésimo* mês (mm mês<sup>-1</sup>) obtida para cada modelo climático e RCP.

Os resultados discutidos neste capítulo consideram a média do conjunto (*ensemble*) de todos os RCPs e de todos os modelos climáticos. Resultados individuais para cada RCP encontram-se nos ANEXOS de 1 a 6.

Para o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), foi utilizado o método proposto por Thornthwaite (1948) (Figura 2.1) por ser o método de estimativa da ETP mais utilizado nos BHC (SENTELHAS et al., 2008; ALVES et al., 2020) uma vez que fornece diretamente os valores climatológicos mensais da ETP (SANTOS et al., 2017).



**Figura 2.1.** Modelo esquemático do cálculo da Evapotranspiração Potencial.

Em que:  $ETP_x$  é a evapotranspiração potencial não corrigida para o  $i$ -ésimo mês considerado ( $i = 1$  a  $12$ ) ( $\text{mm mês}^{-1}$ );  $ETP$  é a evapotranspiração potencial corrigida para o  $i$ -ésimo mês considerado ( $\text{mm mês}^{-1}$ );  $\bar{T}_{med}$  é a média climatológica da temperatura média do ar do  $i$ -ésimo mês ( $^{\circ}\text{C}$ );  $I$  é o índice anual de calor (adimensional);  $\alpha$  é o índice térmico regional (adimensional);  $NDP_i$  é o número de dias do  $i$ -ésimo mês;  $N_i$  é o fotoperíodo do 15º dia do  $i$ -ésimo mês (horas), considerado representativo da média mensal;  $\varphi$  é a latitude (grau);  $\delta_i$  é a declinação solar do 15º dia do  $i$ -ésimo mês (grau) e  $KC$  é o coeficiente de cultura (adimensional e característico do eucalipto).

Como a ETP expressa a demanda evaporativa da atmosfera, independentemente do tipo de cultura, estágio de desenvolvimento e práticas de manejo (BERTI et al., 2014; JERSZURKI et al., 2019) foi necessário multiplicá-la pelo  $KC$  para obter a ETP para o eucalipto. O  $KC$  representa a demanda hídrica da cultura em questão em determinado estágio de desenvolvimento (FAO, 1998). Neste estudo, considerou o valor de  $KC$  como 1,15, seguindo as recomendações de Dong et al. (1992), FAO (1998), Tatagiba et al. (2015) e Freitas et al. (2020).

### 2.2.3 Balanço Hídrico Climatológico e extratos

Para o cômputo do BHC aplicado para o eucalipto, foi utilizado o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955, 1957) e simplificado por Pereira (2005). Esse método fornece a disponibilidade de água no solo por meio de três extratos: evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) em nível regional (SENTELHAS et al., 2008; SANTOS et al., 2017; ALVES et al., 2020). O BHC requer como dado de entrada as climatologias mensais de  $\bar{T}_{med}$ ,  $\bar{P}_{med}$  e  $\overline{ETP}$ , além da Capacidade de Água Disponível (CAD) para o eucalipto (detalhes no item 2.2.4).

Primeiramente definiu-se o mês (i) de inicialização do BHC, através de duas possíveis situações: Situação I - valores anuais de  $\sum(\bar{P}_{med} - \overline{ETP}) \geq 0$  ou  $\sum(\bar{P}_{med} - \overline{ETP})^+ \geq CAD$ , e Situação II: valores anuais de  $\sum(\bar{P}_{med} - \overline{ETP}) < 0$  ou  $\sum(\bar{P}_{med} - \overline{ETP})^+ < CAD$ . Adotou-se o critério de inicialização proposto em Pereira (2005) para cada situação. A partir do mês de inicialização, calcula-se simultaneamente o negativo acumulado (NEGACUM) e o armazenamento (ARM), através das expressões (PEREIRA, 2005; ALVES et al., 2020):

#### Para a situação I:

$$NEGACUM_i = \bar{P}_{med_i} - \overline{ETP}_i \quad (2)$$

$$ARM_i = CAD \cdot e^{\left(\frac{NEGACUM_i}{CAD}\right)} \quad (3)$$

Se  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP}$  do mês  $i+1 < 0$ , calcula-se o  $NEGACUM_{i+1}$  (Equação 4) e para o cálculo do  $ARM_{i+1}$  utiliza-se a equação 5.

$$NEGACUM_i = NEGACUM_{i-1} + (\bar{P}_{med_i} - \overline{ETP}_i) \quad (4)$$

Para os meses subsequentes ( $i+2, i+3, \dots, i+n$ ) em que  $\bar{P}_{med_{i+n}} - \overline{ETP}_{i+n} < 0$ , o mesmo procedimento é realizado. Em caso de alteração nos valores mensais de  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP}$  ( $\geq 0$ ), calcula-se primeiramente o ARM (equação 5) e posteriormente o NEGACUM (equação 6):

$$ARM_i = ARM_{i-1} + (\bar{P}_{med_i} - \overline{ETP}_i) \quad (5)$$

$$NEGACUM_i = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM_i}{CAD}\right) \quad (6)$$

Quando o ARM for superior ao valor da CAD, assume-se que  $ARM = CAD$  e que o restante se refere aos valores de EXC.

#### Para a situação II:

Inicia-se o cálculo pelo NEGACUM da equação 7, e posteriormente o ARM pela equação 3 (PEREIRA, 2005):

$$NEGACUM_i = CAD \cdot \left[ \ln\left(\frac{M}{CAD}\right) - \ln\left(1 - e^{\frac{N}{CAD}}\right) \right] \quad (7)$$

Em que:  $M$  é o valor acumulado de  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP}$  do período chuvoso (valores positivos de  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP} > 0$ ) e  $N$  é o valor acumulado de  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP}$  do período seco (valores negativos de  $\bar{P}_{med} - \overline{ETP} < 0$ ).

Posteriormente, foram calculados os valores de ETR (equação 8), EXC (equação 9) e DEF (equação 10).

$$ETR_i = \begin{cases} \overline{ETP} & \text{quando } (\bar{P}_{med} - \overline{ETP})_i \geq 0 \\ \bar{P}_{med_i} + |ARM_i - ARM_{i-1}| & \text{quando } (\bar{P}_{med} - \overline{ETP})_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

O EXC refere-se à quantidade de água excedente do período chuvoso, que por ser um valor acima da capacidade de armazenamento de água, é perdida por percolação (drenagem profunda) e/ou escoamento superficial.

$$EXC_i = \begin{cases} 0 & \text{quando } ARM_i < CAD \\ (\bar{P}_{med} - \overline{ETP})_i - (ARM_i - ARM_{i-1}) & \text{quando } ARM = CAD \end{cases} \quad (9)$$

A DEF é calculada apenas quando  $(\bar{P}_{med} - \overline{ETP})_i < 0$ , caso contrário a DEF é nula:

$$DEF_i = \overline{ETP}_i - ETR_i, \text{ quando } (\bar{P}_{med} - \overline{ETP})_i < 0 \quad (10)$$

Após as etapas de cálculo, foram realizadas as aferições, conforme recomendações de Pereira (2005) e Alves et al. (2020) (equações 11 a 14)

$$\sum P = \sum ETP + \sum (P - ETP) \quad (11)$$

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXC \quad (12)$$

$$\sum ETP = \sum ETR + \sum DEF \quad (13)$$

$$\sum ALT = 0 \quad (14)$$

#### 2.2.4 Capacidade de água disponível no solo (CAD)

A CAD refere-se ao limite máximo de armazenamento de água no solo disponível para a cultura, sendo dependente, principalmente, do comprimento do sistema radicular da cultura de interesse e do tipo de solo (SANTOS et al., 2017; PIROVANI et al., 2018). Devido a lacuna de informações referente ao comprimento radicular do eucalipto e informações de solo específicas para a AS, optou-se pela definição de valores médios de comprimento radicular e de tipos de solos. Por isso, foi adotado o comprimento radicular efetivo de 300 cm para o eucalipto (CRISTINA et al., 2017; ELLI et al., 2020a,b; FREITAS et al., 2020). Além disso, na tentativa de representar a CAD para toda AS foi adotado o valor de 1,00 mm cm<sup>-1</sup>. Esse valor refere-se a média de três tipos de solos padrões (ELLI et al., 2020a,b; FREITAS et al.,

2020): i) solos argilosos ( $1,52 \text{ mm cm}^{-1}$ ); ii) solos francos ( $0,9 \text{ mm cm}^{-1}$ ), e iii) solos arenosos ( $0,60 \text{ mm cm}^{-1}$ ). Com isso, o valor de CAD adotado foi de 300mm, corroborando com Souza et al. (2006), Guimarães et al. (2008), Ribeiro (2009) e Almeida e Sands (2015).

### **2.2.5 Consequências na aptidão ao cultivo do eucalipto na América do Sul**

Para avaliar as consequências na aptidão ao cultivo de eucalipto na AS foi considerada apenas a necessidade hídrica, dada pela DEF anual ( $DEF_{\text{anual}}$ ). Por brevidade, as regiões que apresentaram  $DEF_{\text{anual}}$  inferior ao valor de CAD (detalhes no item 2.2.4) não apresentam restrições hídricas ao cultivo do eucalipto e podem ser consideradas favoráveis ao cultivo. Por outro lado, as áreas que apresentaram  $DEF_{\text{anual}}$  superior a CAD, não são capazes de suprir as necessidades hídricas e podem ser consideradas desfavoráveis ao cultivo do eucalipto.

## **2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

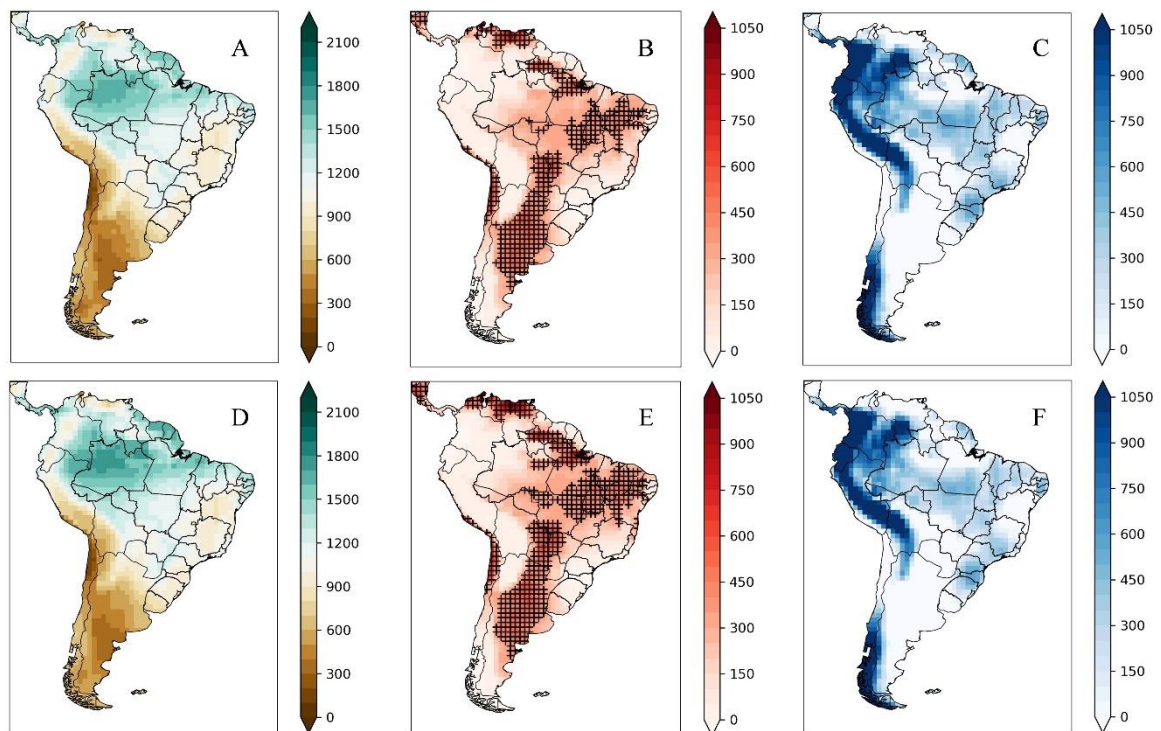
### **2.3.1 Balanço Hídrico para os períodos pré-industrial e presente**

Os extratos do Balanço Hídrico Climatológico para o eucalipto (ETR, DEF e EXC) estão apresentados na Figura 2.2, referentes ao período pré-industrial (A, B, C) (1861-1890) e ao período presente (D, E, F) (1975-2005). O cômputo do BHC para os períodos pré-industrial e presente foram realizados com o objetivo principal de analisar o padrão espacial e temporal de alteração da ETR, DEF e EXC ao longo destes dois períodos, assim como verificar o impacto do aquecimento médio global na disponibilidade hídrica.

Os padrões espaciais para os três extratos do BHC são análogos entre os períodos pré-industrial e presente, porém com maior expansão para a DEF no período presente. Ou seja, os locais com maior ETR e EXC, e menor DEF concentram-se no norte da AMZ, principalmente na região entre o Peru e oeste da Venezuela e parte do norte do Brasil (norte do Pará e do Amazonas). Isto ocorre porque o período presente apresenta temperatura média global apenas  $0,4^{\circ}\text{C}$  superior ao período pré-industrial (NOAA, 2020). No entanto, vale ressaltar que a temperatura média global em 2020 já ultrapassou em  $1^{\circ}\text{C}$  a temperatura do período pré-industrial. Mesmo com um padrão espacial semelhante entre os dois períodos, observa-se que as áreas com  $DEF_{\text{anual}} > 300\text{mm}$  (áreas hachuradas) são maiores no período presente em comparação com o período pré-industrial, principalmente nas regiões Centro-oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Essas três regiões já apresentam restrições nas áreas favoráveis ao cultivo do eucalipto para o clima presente considerando a necessidade hídrica, sendo necessária

irrigação suplementar (ELLI et al., 2020b), principalmente no início do desenvolvimento (ABREU et al., 2015; DE MORAES; GONÇALVES et al., 2013). Além disso, essas regiões podem ser ainda mais impactadas nas projeções de aumento da temperatura do ar nos limiares de 1,5°C e 2,0°C (item 2.3.2).

O aumento da  $DEF_{\text{anual}} (> 300\text{mm})$  exatamente nessas regiões brasileiras ocorre em função dos maiores valores de  $T_{\text{med}}$  (Figura 1.4) e menores valores de  $P$  (Figura 1.6) (MARENGO, 2001; MARENGO, 2010; SANTOS et al., 2017; LLOPART et al., 2018; TAVARES et al., 2018; MARTINS et al., 2019; RESENDE et al., 2019). Essa combinação promove o aumento da ETP (LLOPART et al., 2020) e alteram a demanda atmosférica, impactando no BHC (SANTOS et al., 2017; ALVES et al., 2020).



**Figura 2.2.** Extratos do Balanço Hídrico para o eucalipto: Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F), referente ao período pré-industrial (1861-1890) (A,B,C) e ao período presente (1975-2005) (D,E,F). Áreas hachuradas nos painéis B e E indicam regiões desfavoráveis ao cultivo de eucalipto ( $DEF > 300 \text{ mm ano}^{-1}$ ).

### 2.3.2 Balanço Hídrico para o período de aquecimento médio global em 1,5°C e 2°C e impactos para o cultivo do eucalipto na América do Sul

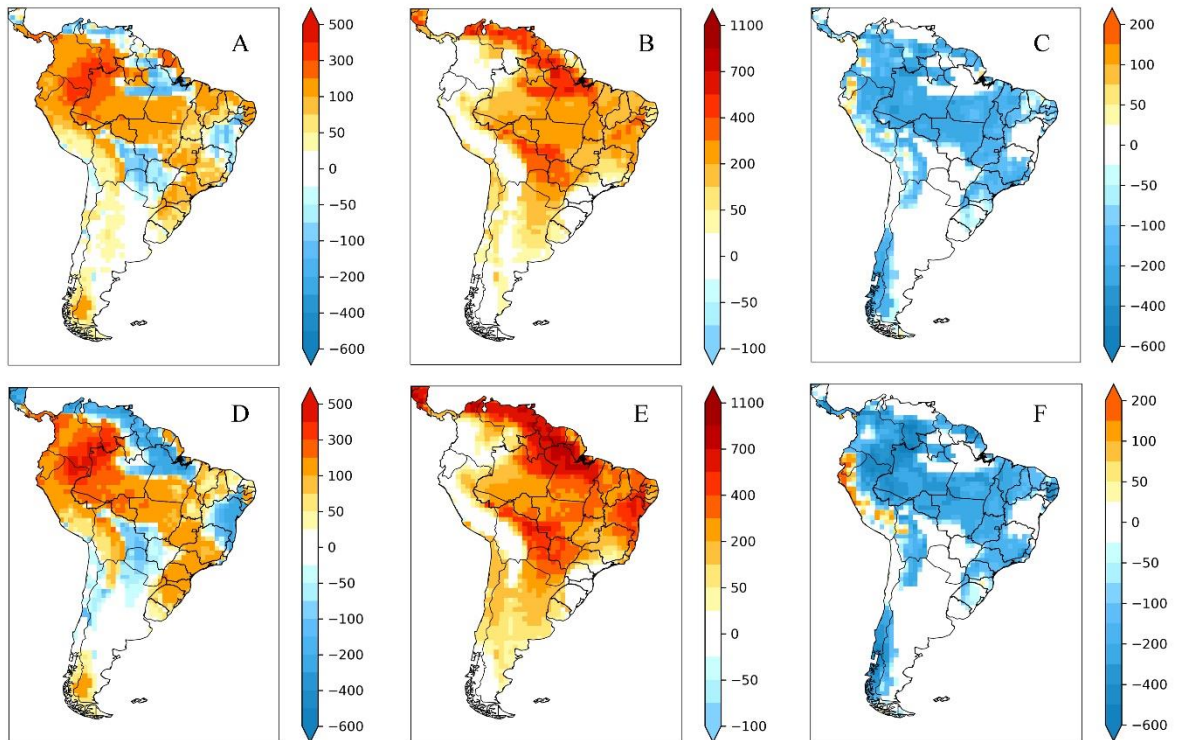
Na Figura 2.3 (Figura 2.4), observa-se a diferença entre os extratos do BHC (ETR, DEF e EXC) calculados para os respectivos períodos de aquecimento médio global de 1,5°C e 2,0°C e os extratos calculados para o período pré-industrial – 1861 a 1890 (período presente –

1975 a 2005). As diferenças dos valores de ETR, DEF e EXC são espacialmente semelhantes entre ambos os limiares, porém com maior magnitude para as projeções referentes ao período de aquecimento de 2,0°C subtraídas do período pré-industrial.

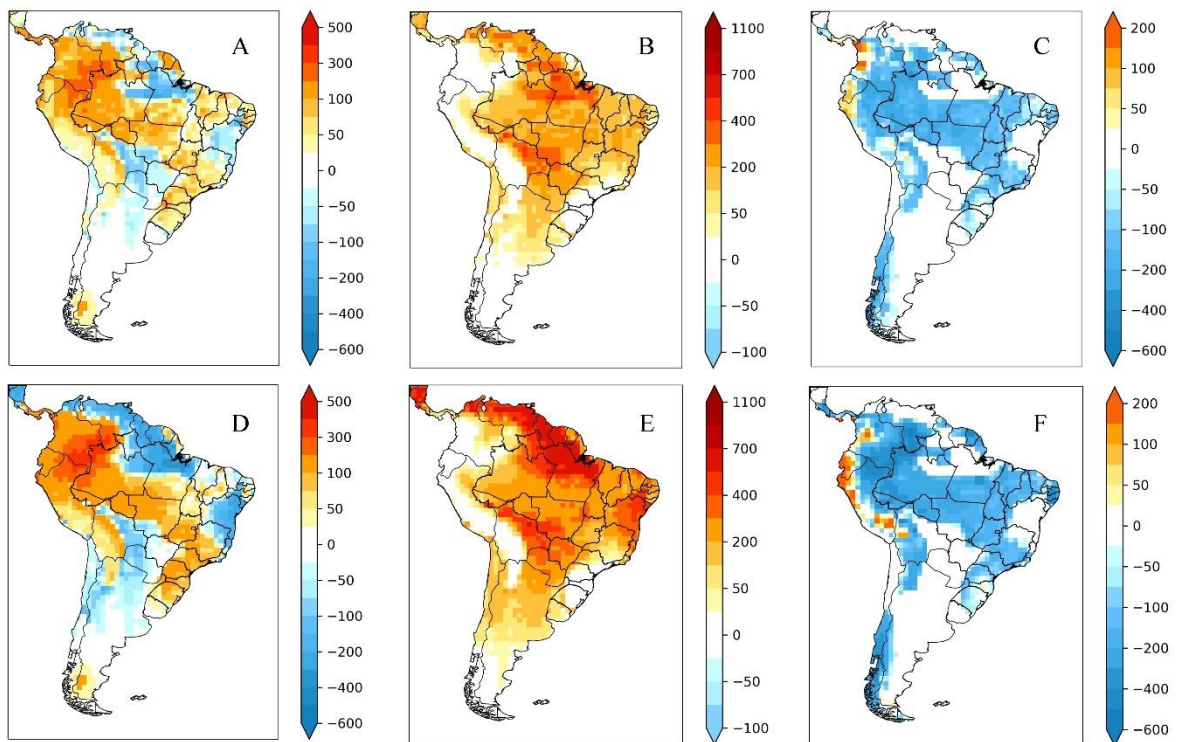
De maneira geral, as diferenças positivas de ETR e DEF seguem os padrões observados para a  $T_{med}$  (Figura 1.4), enquanto as diferenças de EXC são análogas aos padrões de P (Figura 1.6). Ou seja, locais onde há aumentos da  $T_{med}$ , há aumentos na ETR e DEF, enquanto que nos locais com aumento da P, há aumento do EXC.

Observa-se aumento das áreas com valores positivos de ETR (Figuras 2.3 e 2.4 A,D) nas projeções de aquecimento (1,5°C e 2,0°C), cujas magnitudes são maiores no centro-norte da AMZ (Venezuela, Colômbia e em partes das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil) e no centro-norte de NEB. Enquanto valores negativos de ETR são observados no sul de NEB e em SSA (norte de Minas Gerais, na Bahia, no norte do Pará, no Paraguai e no leste da Bolívia), como resposta ao aquecimento da temperatura do ar próximo a superfície (Figura 1.4) e às alterações na precipitação (Figura 1.6).

Valores positivos e com maior magnitude de DEF (Figuras 2.3 e 2,4 B,E) são observados no Norte da AMZ (Venezuela, Guiana e Suriname), no NEB, além da maior parte de SSA (com exceção do Sul do Brasil), com aumento na DEF em até 1000 mm ano<sup>-1</sup>. Por outro lado, no Equador, na região central e sul da Colômbia, na Bolívia e na região Sul do Brasil não foram observadas alterações no padrão de DEF. Nesses locais, apesar do aumento da temperatura média global (e regional), as projeções também indicam aumento da precipitação, tal que a proporção do aumento de  $T_{med}$  e de P foram mantidas no cômputo do BHC no período de aquecimento global em relação aos períodos pré-industrial e presente (Figura 1.6). As áreas com valores negativos de maior magnitude de EXC são análogas às áreas em que foram observados valores positivos de ETR.



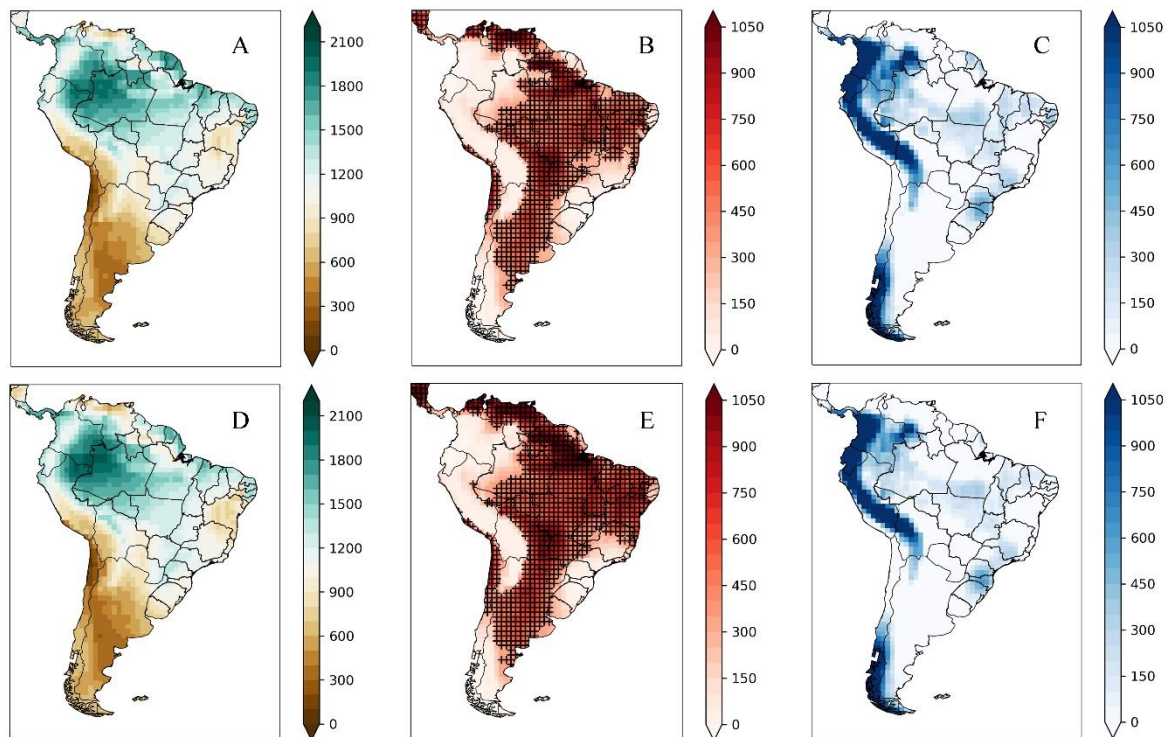
**Figura 2.3.** Diferença entre os extratos do balanço hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C (A,B,C) e 2°C (D,E,F) e os extratos referente ao período pré-industrial. Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F). O número de projeções utilizados para calcular a média do conjunto de 1,5°C (A,B,C) e de 2°C (D,E,F) foi de 66 e 56 projeções, respectivamente.



**Figura 2.4.** Diferença entre os extratos do balanço hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C (A,B,C) e 2°C (D,E,F) e os extratos referente ao período pré-industrial. Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F). O número de projeções utilizados para calcular a média do conjunto de 1,5°C (A,B,C) e de 2°C (D,E,F) foi de 66 e 56 projeções, respectivamente.

Nas áreas em que são projetadas redução da P associadas ao aumento da  $T_{med}$ , observa-se aumento da ETP, que por sua vez altera a demanda atmosférica impactando nos extratos do BHC (ETR, DEF e EXC). As alterações na DEF são aquelas que mais impactarão no eucalipto (GONÇALVES et al., 2017; ELLI et al., 2020a,b; FREITAS et al., 2020; RESQUIM et al., 2020).

Para analisar o impacto no cultivo do eucalipto, optou-se por mostrar o padrão espacial da ETR, DEF e EXC referente ao período de aquecimento de 1,5°C e 2,0°C (Figura 2.5). Quando comparado aos períodos pré-industrial e presente (Figura 2.2), percebe-se alteração nos valores médios de ETR, com anomalias positivas mais significativas e de até 500 mm ano<sup>-1</sup>, aumento nos valores de DEF acima de 300 mm ano<sup>-1</sup> (com áreas de até 1000 mm ano<sup>-1</sup>) principalmente no norte de WSA e na AMZ (Amazônia, parte da Colômbia e do Peru) e redução do EXC ( $\approx 350$  mm ano<sup>-1</sup>) em praticamente todo o continente. De maneira geral, o padrão espacial de ETR, DEF e EXC seguirá o mesmo padrão apresentado nas projeções de temperatura (Figura 1.4) e de precipitação (Figura 1.6), no qual nas áreas em que há aumento da  $T_{med}$  e redução da P, observa-se aumento (redução) da ETR e da DEF (EXC). Isso indica que apesar dos padrões heterogêneos de precipitação, o aumento nos acumulados anuais em centro-norte de SSA e norte de WSA, e redução na região central da AS e no sul de SSA e WSA e na porção Norte da AMZ, compreendida entre a Colômbia e o Suriname, a demanda evaporativa (ETP) será maior pelo impacto do aumento da temperatura do ar, refletindo diretamente em alterações nos extratos do BHC (ETR, DEF e EXC) (ALVES et al., 2020).



**Figura 2.5.** Extratos do Balanço Hídrico do eucalipto: Evapotranspiração Real (A,D), Deficiência Hídrica (B,E) e Excedente Hídrico (C,F) referente ao período de aumento da temperatura média global em 1,5°C (A,B,C) e 2,0°C (D,E,F). Os valores representam a média entre todos os modelos climáticos e RCPs. Áreas hachuradas nos painéis B e E indicam regiões desfavoráveis ao cultivo de eucalipto ( $DEF > 300 \text{ mm ano}^{-1}$ ).

A necessidade de irrigação, informada diretamente pela ETR, deverá aumentar em praticamente todo o continente, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais da AS devido ao aumento da temperatura do ar nestas regiões, por decorrência do aumento da temperatura média global. Como o BHC é limitado pela CAD, a redução da precipitação associada ao aumento da ETP (devido ao aumento da  $T_{med}$ ), principalmente nas regiões ao sul e ao norte de AMZ e no norte de SSA, influencia diretamente no valor da ETR. Além disso, observa-se uma relação inversa entre a ETR e EXC, ou seja, nas áreas em que há aumento da ETR, há redução do EXC. No entanto, com relação ao EXC, haverá um padrão heterogêneo de alteração dessa variável, com redução na maior parte do continente sul-americano e alterações inferiores a  $50 \text{ mm ano}^{-1}$  na Argentina, Uruguai, Bahia e norte do Pará, exatamente nas áreas que foi observada redução nos valores anuais de ETR. Esse padrão é corroborado por Právālie et al. (2019) em estudo feito para a Romênia, por Sentelhas et al. (2008) para o Brasil e Santos et al. (2017) para parte da região Sudeste brasileira. As reduções do EXC (em torno de  $350 \text{ mm ano}^{-1}$ ) também são acompanhadas pelos aumentos na DEF ( $300 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figuras 2.3, 2.4 e 2.5).

Em relação à DEF, as áreas que apresentam  $DEF \geq 300 \text{ mm ano}^{-1}$  (áreas hachuradas) possuem restrições hídricas e podem ser consideradas desfavoráveis ao cultivo de eucalipto. Nesse sentido, as áreas com  $DEF > 300 \text{ mm ano}^{-1}$  sofrerão aumento em ambos os limiares de aquecimento ( $1,5^\circ\text{C}$  e  $2,0^\circ\text{C}$ ) quando comparado com os períodos pré-industrial e presente (Figura 2.5). As regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte do Brasil, com exceção do oeste do Amazonas, Paraguai, parte centro-norte da Argentina, Venezuela e norte do Chile, serão as que sofrerão maior aumento da DEF e redução do EXC. Enquanto para o oeste da AS, mais precisamente entre a Colômbia e a Bolívia, além das regiões Sul e Sudeste do Brasil e parte do Amazonas, não sofrerão aumento da DEF. Justamente nessas áreas brasileiras, Elli et al. (2020b) observaram redução da DEF, porém, com aumento da produtividade para médio prazo (2040 a 2069) e longo prazo (2070 a 2099). No entanto, Elli et al. (2020b) ressaltaram sobre as incertezas das projeções climáticas na produtividade, especialmente para o cenário do RCP8.5, devido as inconsistências projetadas entre os modelos climáticos para a variável de precipitação.

Portanto, pode haver o comprometimento e o aumento das áreas desfavoráveis ao cultivo do eucalipto (Tabela 2.1), sendo necessária a adoção de estratégias para mitigar os efeitos desfavoráveis do aumento da DEF, especialmente nas áreas em que ocorrerão os maiores aumentos da DEF, quando comparado com os períodos pré-industrial e presente (Figura 2.5).

**Tabela 2.1.** Proporções de áreas favoráveis e desfavoráveis ao cultivo de eucalipto, referente aos períodos pré-industrial, presente e aquecimento médio global em  $1,5^\circ\text{C}$  e  $2^\circ\text{C}$ .

Período	Favoráveis		Desfavoráveis	
	%	Km <sup>2</sup> (10 <sup>4</sup> )	%	Km <sup>2</sup> (10 <sup>4</sup> )
Pré-industrial	78,9	1407	21,1	376
Presente	70,8	1262	29,2	521
Aquecimento 1,5°C	50,8	905	49,2	878
Aquecimento 2,0°C	43,2	769	56,8	1014

O principal impacto do aumento da temperatura média global em  $1,5^\circ\text{C}$  e  $2,0^\circ\text{C}$  refere-se ao aumento das áreas consideradas desfavoráveis ao cultivo de eucalipto (Tabela 2.1). Em função do aumento da temperatura do ar acima de  $1,0^\circ\text{C}$  da média global em todo o continente, principalmente na AMZ e norte de SSA, haverá aumento da demanda evaporativa

(ETP) e da necessidade de irrigação (ETR). Além disso, essas regiões sofrerão redução significativa na precipitação média anual de até 100 mm ano<sup>-1</sup> quando comparado com o período pré-industrial (Figura 1.6). Tal situação aumenta a DEF e reduz o EXC, ou seja, a oferta de água às plantas acaba sendo inferior à taxa de evapotranspiração (ETP e ETR). Como consequência há redução das trocas gasosas (transpiração e assimilação de CO<sub>2</sub> para a realização da fotossíntese) (ELLI et al., 2020b), desequilíbrio na razão fotorrespiração/fotossíntese, as quais alteram os processos fisiológicos (PIROVANI et al., 2018). Além disso, uma série de anomalias fenológicas podem ocorrer, as quais promoveriam a redução progressiva no desenvolvimento, produtividade, qualidade da madeira (BOOTH, 2017; ELLI et al., 2020b).

Apesar dos impactos negativos para o eucalipto devido ao aumento da DEF, da ETP, da ETR e da  $T_{med}$ , e redução da P, estudos como os de Elli et al. (2020b) e Resquim et al. (2020), tem demonstrado que as projeções de aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> podem elevar a taxa fotossintética, devido a maior dependência do eucalipto à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (AINSWORTH; LONG, 2004; AINSWORTH; ROGERS, 2007; BOOTH, 2017) e, conseqüentemente, elevar a produtividade do eucalipto (BOOTH et al., 2017; ELLI et al., 2020b). Mesmo assim, a qualidade da madeira não é garantida nessas condições. Além disso, a maior concentração de CO<sub>2</sub> associado à redução da precipitação pode gerar efeitos adversos. Por um lado, pode ocasionar o fechamento parcial dos estômatos reduzindo a condutância estomática e a transpiração, mas por outro pode resultar em maior eficiência do uso da água (AINSWORTH; LONG, 2004; AINSWORTH; ROGERS, 2007). No entanto, os efeitos positivos do aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> podem ser limitados pela disponibilidade de fósforo no solo (ELLSWORTH et al., 2017) e pelo desequilíbrio na razão fotorrespiração/fotossíntese causado por temperaturas extremas (BATTAGLIA et al., 1996; BOOTH, 2017).

De qualquer forma, o futuro do cultivo do eucalipto na AS depende da rapidez para evitar (ou se adaptar) aos impactos majoritariamente prejudiciais devido ao aumento da DEF e da  $T_{med}$ . Nesse sentido, algumas estratégias de adaptação envolvem o uso de novos híbridos ou clones com híbridos interespecíficos (GONÇALVES et al., 2013), por serem mais resilientes a deficiência hídrica no solo, revoluções nas técnicas de melhoramento de plantas (molecular e convencional, de forma a incorporar as características desejadas), melhoria nas práticas de manejo e condução dos plantios florestais. Alterações no manejo das mudas, como o uso de sombrite, plantios dentro de casas de vegetação ou estufas e alterações nos materiais das estufas, podem ser estratégias efetivas para minimizar os impactos negativos devido ao

aumento combinado da DEF e da  $T_{med}$ . Ademais, a irrigação (PIROVANI et al., 2018; FRAGA et al., 2020) é outra possível estratégia para reduzir os impactos negativos no cultivo do eucalipto, principalmente aplicado nos períodos imediatamente posteriores ao plantio (GONÇALVES et al., 2013; ABREU et al., 2015; SCOLFORO et al., 2019). No entanto, pode ser uma estratégia problemática para a região de AMZ (Venezuela, Colômbia, Suriname, região central do Brasil e Bolívia) e NEB, além das regiões ao sul de SSA e de WSA, onde são projetados os maiores aumentos (reduções) da DEF (precipitação), e que apresentaram maior expansão do cultivo de eucalipto nos últimos anos.

## 2.4. CONCLUSÃO

A evapotranspiração real, deficiência hídrica e excedente hídrico para o eucalipto no período presente (1975-2005) já sofreram pequenas alterações quando comparadas com o período pré-industrial. Porém, as projeções climáticas indicam que as alterações referentes ao aquecimento médio global de 1,5°C e 2,0°C serão ainda mais intensas, impactando diretamente diversas regiões produtoras de eucalipto na América do Sul, desfavorecendo o cultivo de eucalipto em 49,2% e 56,8% da AS, para os períodos de aquecimento de 1,5°C e 2,0°C, respectivamente.

Os padrões de temperatura e de precipitação para os dois limiares tende a ser prejudicial ao cultivo do eucalipto, assim como para o setor florestal na América do Sul, especialmente no Brasil. No Brasil, apenas a região Sul e parte do Sudeste serão favoráveis ao cultivo de eucalipto considerando a disponibilidade de água. Para as demais regiões, principalmente para AMZ, centro-norte de SSA, o cultivo do eucalipto será afetado negativamente, de modo que medidas de mitigação e estratégias de adaptação serão necessárias, como a utilização de espécies (híbridas e alteradas geneticamente) e o uso de irrigação, os quais representariam um grande adicional aos custos de operação.

A contribuição científica deste trabalho se deve, primeiramente, à lacuna de estudos dessa natureza realizados na América do Sul, tanto da análise do impacto do aquecimento médio global em 1,5°C e 2°C nos padrões de temperatura e de precipitação, como na consequência destes padrões no balanço hídrico para o eucalipto, tornando possível identificar as áreas que serão mais afetadas pela disponibilidade e comparar com os padrões dos períodos pré-industrial e presente.

## 2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H. de; PEREIRA, R. A. A. Thresholds for transpiration, development and growth of *Corymbia citriodora* (hook.) kd hill & las johnson in response to soil water stress. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 841-852, 2015.

AINSWORTH, E.A., LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. **New Phytol.** v. 165, p. 351–372, 2004.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell & Environ**, v. 30, p. 258–270, 2007.

ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; ROO, de A.; SALAMON, O.; WYSER, K.; FEYEN, L. Global projections of river flood risk in a warmer world. **Earth's Future**, v. 5, n. 2, p. 171-182, 2017.

ALFRED, K.; ZAITON, S. A REVIEW ON THE POTENTIAL SOCIO-ECONOMIC IMPACT OF EUCALYPTUS PLANTATION ON LOCAL COMMUNITY. **The Malaysian forester**, v. 83, p. 322-339, 2020.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, **Rome**, v. 9, p. 300, 1998.

ALLEN, C. D.; MACALADY, A.K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D.D.; HOGG, E.H.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J.H.; ALLARD, G.; RUNNING, S.W.; SEMERCI, A.; COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 660-684, 2010.

ALLEN, M.R.; DUBE O.P.; SOLECKI W.; ARAGÓN-DURAND F.; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J.; MAHOWALD, N.; MULUGETTA, Y.; PEREZ R.; WAIRIU, M.; ZICKFELD K. Framing and Context. In: **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. 2018 [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, J. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD T. (eds.)]. In Press.

ALMEIDA, A.C.; SANDS, P.J. Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. **Ecohydrology**, v. 9, p. 610-630, 2016.

ALVES, A. M. D. M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para itajubá-mg: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 1-21, 2020.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. de MACHADO. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.1, p.1-8, jan. 2013.

BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, p. 335-344, 2010.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. SV. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 83-90, 2015.

BATTAGLIA, M., BEADLE, C., LOUGHHEAD, S. Photosynthetic temperature responses of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. **Tree Physiol**, v. 16, p. 81–89, 1996.

BERTI, A.; TARDIVO, G.; CHIAUDANI, A.; RECH, F.; BORIN, M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. **Agricultural Water Management**, v. 140, p. 20-25, 2014.

BOOTH, T. H. Impacts of climate change on eucalypt distributions in Australia: an examination of a recent study. **Australian Forestry**, v. 80, p. 208-215, 2017.

CÂMARA, A.P., VIDAURRE, G.B., OLIVEIRA, J.C.L., DE TOLEDO PICOLI, E.A., ALMEIDA, M.N.F., ROQUE, R.M., TOMAZELLO FILHO, M., SOUZA, H.J.P., OLIVEIRA, T.R. AND CAMPOE, O.C. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 1183801, 2020.

CARPINETI, L.A. Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina, 1995.

CHEN, S.; WU, R.; CHEN, W. Projections of climate changes over mid-high latitudes of Eurasia during boreal spring: uncertainty due to internal variability. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 9-10, p. 6309-6327, 2019.

CHEN, Shangfeng et al. Projected changes in mid–high-latitude Eurasian climate during boreal spring in a 1.5 and 2° C warmer world. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 3, p. 1851-1863, 2020.

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, p. 509-519, 2017.

DE SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.

DONG, A.; TANJI, K.; GRATTAN, S.; KARAJEH, F.; PARLANGE, M. Water quality effects on eucalyptus ET. In **Irrigation and Drainage Sessions at Water Forum**, p. 164-170, 1992.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; NEIL H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v. 114, p. 106325, 2020a.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020b.

ELLSWORTH, D.S.; ANDERSON, I.C.; CROUS, K.Y.; ANDERSON, I.C.; CROUS, K.Y.; COOKE, J.; DRAKE, J.E.; GHERLEND, A.N.; GIMENO, T.E.; MACDONALD, C.A.; MEDLYN, B.E.; POWELL, J.R.; TJOELKER, M.G.; REICH, P.B. Elevated CO<sub>2</sub> does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. **Nature Climate Change**, v.7, p. 279–282, 2017.

FALAVESSA, M. **Impacto das mudanças climáticas na resistência de clones de eucalipto a ceratocystis fimbriata**. 2014. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

FLORES, C. A.; FILIPPINI A. J. M.; WREGGE, M. S. Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na Região do Corede Sul-RS. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2009.

FRAGA, H.; PINTO, J.G.; SANTOS, J.A. Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106193, 2020.

FREITAS, C. H. de; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 52, n. 5, p. 283-292, 2017.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood Eucalyptus productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 139, p. 759-776, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Estrategia para el desarrollo forestal en el Cono Sur, Vol. III: Paraguay y Uruguay. Cooperative Program of the FAO and World Bank, Investment Center, **Rome**, p. 87, 2011.

FU, Yuan-Hai; LU, Ri-Yu; GUO, Dong. Changes in surface air temperature over China under the 1.5 and 2.0 C global warming targets. **Advances in Climate Change Research**, v. 9, n. 2, p. 112-119, 2018.

GARDI, C.; ANGELINI, M.; BARCELÓ, S.; COMERMA, J.; CRUZ GAISTARDO, C.; ENCINA ROJAS, A.; JONES, A.; KRASILNIKOV, P.; MENDONÇA- SANTOS, M.L.; MONTANARELLA, L.; MUÑIZ UGARTE, O.; SCHAD, P.; VARA RODRÍGUEZ, M.I.; VARGAS, R.; RAVINA DA SILVA, M. (eds). **Atlas de solos de América Latina e do Caribe**, Comissão Europeia – Serviço das Publicações da União Europeia, L-2995 Luxembourg, 176 pp, 2015.

GAVRICHKOVA, O.; SCARTAZZA, A.; GUIDOLOTTI, G.; KUZYKOV, Y.; LEONARDI, L.; MATTIONI, M.; NAWROCKA, J.; PALLOZZI, E.; SKWAREK, M.; TOMCZYNSKA, M.; CALFAPIETRA, C. When the Mediterranean becomes harsh: Heat pulses strongly affect C allocation in plant-soil-atmosphere continuum in *Eucalyptus camaldulensis*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 181-191, 2019.

GONCALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; HIGA, A.; R.; SILVA, L.; D.; ALFENAS, A.; C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. DE B. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GUIMARÃES, D.P., SILVA, G.G.C., SANS, L.M.A. AND LEITE, F.P. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no Estado de Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado**, 2007.

GONZÁLEZ-OROZCO, C. E.; POLLOCK, L. J.; THORNHILL, A. H.; MISHLER, B. D.; KNERR, N.; LAFFAN, S. W.; MILLER, J. T.; ROSAUER, D. F.; FAITH, D. P.; NIPPERESS, D. A.; KUJALA, H.; LINKE, S.; BUTT, N.; KULLHEIM, C.; CRISP, M.; GRUBER, B. Phylogenetic approaches reveal biodiversity threats under climate change. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 1110–1114, 2016.

HALLEGATTE, S.; ROGELJ, J.; ALLEN, M.; CLARKE, L.; EDENHOFER, O.; FIELD, C. B.; STOCKER T. F.; VAN VUUREN, D. P. Mapping the climate change challenge. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 663–668, 2016.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. Embrapa, 2000.

HOEGH G. O.; JACOB, D.; TAYLOR, M. Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems. **Notes**, v. 41, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2019.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

JALOTA, S.K.; VASHISHT; B.B.; SHARMA, S.; KAUR, S.; JALOTA, S.K.; VASHISHT, B.B.; SHARMA, S.; KAUR, S. Climate Change Impact on Crop Productivity and Field Water Balance. Underst. Clim. Chang. Impacts Crop Product. **Water Balance**, v. 12, n. 4, p. 87–148, 2018.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de.; SILVA, L. de. C. R. Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1-2, p. 1-14, 2019.

KARMALKAR, A. V.; BRADLEY, R. S. Consequences of global warming of 1.5 C and 2 C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLoS One**, v. 12, n. 1, p. e0168697, 2017.

KEENAN, R. J.; NITSCHKE, C. Forest management options for adaptation to climate change: a case study of tall, wet eucalypt forests in Victoria's Central Highlands region. **Australian Forestry**, v. 79, n. 2, p. 96-107, 2016.

KLIPPEL, V. H.; PEZZOPANE, J. E. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; TOLEDO, J. V. Impacto da deficiência hídrica no crescimento inicial de eucalipto. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 23, p. 48-59, 2014.

KONGSAGER, R.; LOCATELLI, B.; CHAZARIN, F. Addressing climate change mitigation and adaptation together: A global assessment of agriculture and forestry projects. **Environmental Management**, v. 57, p. 271-282, 2016.

KNUTTI, R.; ROGELJ, J.; SEDLÁČEK, J.; FISCHER, E. M. A scientific critique of the two-degree climate change target. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 13–18, 2016.

LLOPART, M., REBOITA, M.S., COPPOLA, E., GIORGI, F., DA ROCHA, R.P.; DE SOUZA, D.O. Land use change over the Amazon Forest and its impact on the local climate. **Water**, v. 10, p. 149, 2018.

LLOPART, M.; REBOITA, M.S.; da ROCHA, R.P., 2020. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 99-116, 2020.

MARCOLINI, M. de P. **Efeito das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático para cultura do eucalipto (eucalyptus urograndis) no estado do Tocantins**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, p. 1-18, 2001.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **CLIMATE DYNAMICS**, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J.A.; CHOU, S., TORRES, R.R.; GIAROLLA, A.; ALVES, L.M.; LYRA, A. Climate change in central and South America: recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture, **CGIAR**, v. 73, p. 1-93, 2014.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1091-1100, 2007.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; SILDA, J. C. da.; MORAIS, W. W.; SUSIN, F.; NAVROSKI, M. C.; VIVIAN, M. A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1297-1306, 2008.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 9, p. 1089-1098, 2011.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 339-350, 2019.

National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for April. **NOAA**, Estados Unidos, 05 de dez. 2020. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202004>>. Acesso em: 05 de dez. 2020.

OTTO, M. S. G.; VERGANI, A. R.; GONÇALVES, A. N.; VRECHI, A.; SILVA, S. R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de Eucalyptus sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, v. 37, p. 431-439, 2013.

PAN, S., TIAN, H., DANGAL, S.R.S., YANG, Q., YANG, J., LU, C., TAO, B., REN, W., OUYANG, Z. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO<sub>2</sub> in the 21st century. **Earth's Future**, v.3, p. 15–35, 2015.

PEREIRA, A.R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v. 64, p. 311-313, 2005.

PINKARD, E.A., BATTAGLIA, M., BRUCE, J., LERICHE, A. KRITICOS, D.J. Process-based modelling of the severity and impact of foliar pest attack on eucalypt plantation productivity under current and future climates. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 839-847, 2010.

PIROVANI, D.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; JÚNIOR, W.C.J.; MACHUCA, M.A.H.; SANTOS, G.M.A.D.A.; SILVA, S.F.; ALMEIDA, S.L.H.; PELUZIO, T.O.; EUGENIO, F.C.; MOREIRA, T.R.; ALEXANDRE, R.S.; SANTOS, A.R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 405-416, 2018.

PORFIRIO, L. L.; NEWTH, D.; FINNIGAN, J. J.; CAI, Y. Economic shifts in agricultural production and trade due to climate change. **Palgrave Communications**, v. 4, p. 111, 2018.

PRĂVĂLIE, R.; PITICAR, A.; ROȘCA, B.; SFÎCĂ, L.; BANDOC, G.; TISCOVSCHI, A.; PATRICHE, C. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013. **Catena**, v. 172, p. 295-312, 2019.

QUEIROZ, T. B.; ROCHA, S. M. G.; FONSECA, F. S. A. da.; ALVARENGA, I. C. A.; MARTINS, E. R. Efeitos do déficit hídrico no cultivo de mudas de Eucalipto. **Irriga**, v. 22, p. 659-674, 2017.

RIBEIRO, C. A. D. **Delimitação de zonas agroclimáticas para a cultura do Eucalipto no norte do Espírito Santo e sul da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia): Universidade Federal do Espírito Santo–Centro de Ciências Agrárias, p. 180, 2009.

RAWAL, D.S.; KASEL, S.; KEATLER, M. R.; NITSCHKE, C. R. Climatic and photoperiodic effects on flowering phenology of select eucalyptus from south-eastern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 231-242, 2015.

RESENDE, N. C.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R.; CHU, M. L.; CHOU, S. C. Impacts of regional climate change on the runoff and root water uptake in corn crops in Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 556-565, 2019.

RESQUIN, F.; DUQUE-LAZO, J.; ACOSTA-MUÑOZ, C.; RACHID-CASNATI, C.; CARRASCO-LETELIER, L.; NAVARRO-CERRILLO, R.M. Modelling Current and Future Potential Habitats for Plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. **Forests**, v. 11, p. 948, 2020.

RHODES, C. J. The 2015 Paris climate change conference: COP21. **Science progress**, New York, v. 99, p. 97-104, 2016.

ROGELJ, J.; POPP, A.; CALVIN, K. V.; LUDERER, G.; EMMERLING, J.; GERNAAT, D.; FUJIMORI, S.; STREFLER, J.; HASEGAWA, T.; MARANGONI, G.; KREY, V.; KRIEGLER, E.; RIAHI, K.; VAN-VUUREN, D. P.; DOELMAN, J.; DROUET, L.; EDMONDS, J.; FRICKO, O.; HARMSSEN, M.; HAVLÍK, P.; HUMPENÖDER, F.; STEHFEST, E.; TAVONI, M. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 325, 2018.

SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterization of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p.273-292, 2002.

SANTAROSA, E.; PENTEADO-JUNIOR, J. F.; GOULART, ICG dos R. Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. **Embrapa Florestas-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, D. F. dos; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, p. 77-82, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO-FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. rev. ampl.[e-book]. Brasília, DF: Embrapa. 2018.

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.3, p.29-42, 2008.

TANASIJEVIC, L.; TODOROVIC, M.; PEREIRA, L.S.; PIZZIGALLI, C.; LIONELLO, P. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 54-68, 2014.

TATAGIBA, S. D.; XAVIER, T. M. T.; TORRES, H.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S.S. Determinação da máxima capacidade de retenção de água no substrato para produção de mudas de eucalipto em viveiro. **Floresta**, v. 45, p. 745-754, 2015.

TAVARES, P. da. S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S. C.; SILVA, A. J. de P.; LYRA, A. de A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 1, p. 1-11, 2018.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, New York, v. 93, p. 485-498, 2012.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The moisture balance. **Publications in climatology**, v. 8, 1955.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 1957.

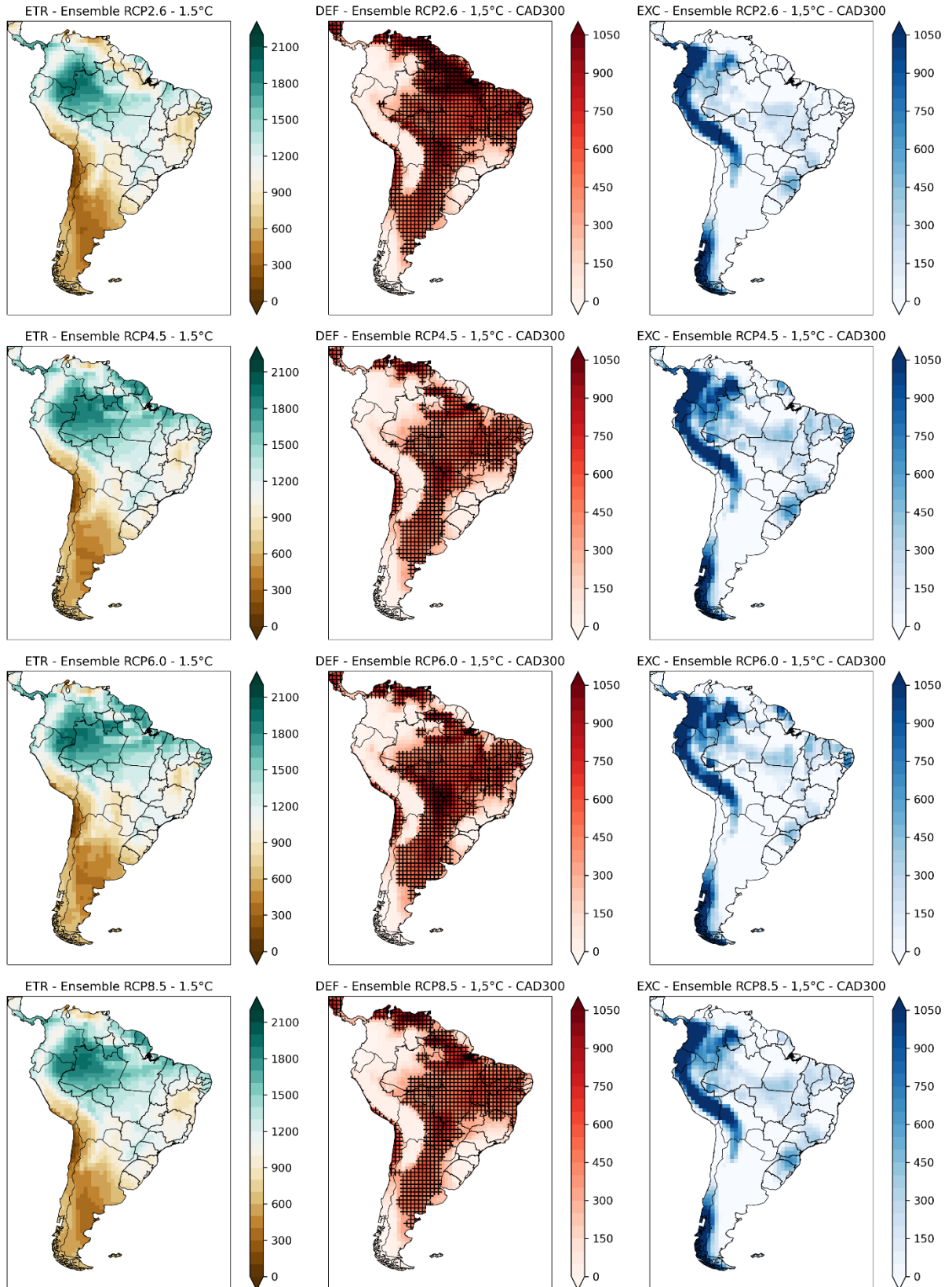
VOSE, J. M.; MINIAT, C. F.; LUCE, C. H.; ASBJORNSEN, H.; CALDWELL, P. V.; CAMPBELL, J. L.; GRANT, G. E.; ISAAK D. J.; LOHEIDE II, S. P.; Sun, G. Ecohydrological implications of drought for forests in the United States. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 335–345, 2016.

Woodward, F.I. *Climate and Plant Distribution* Cambridge University Press, **Cambridge**, 1987.

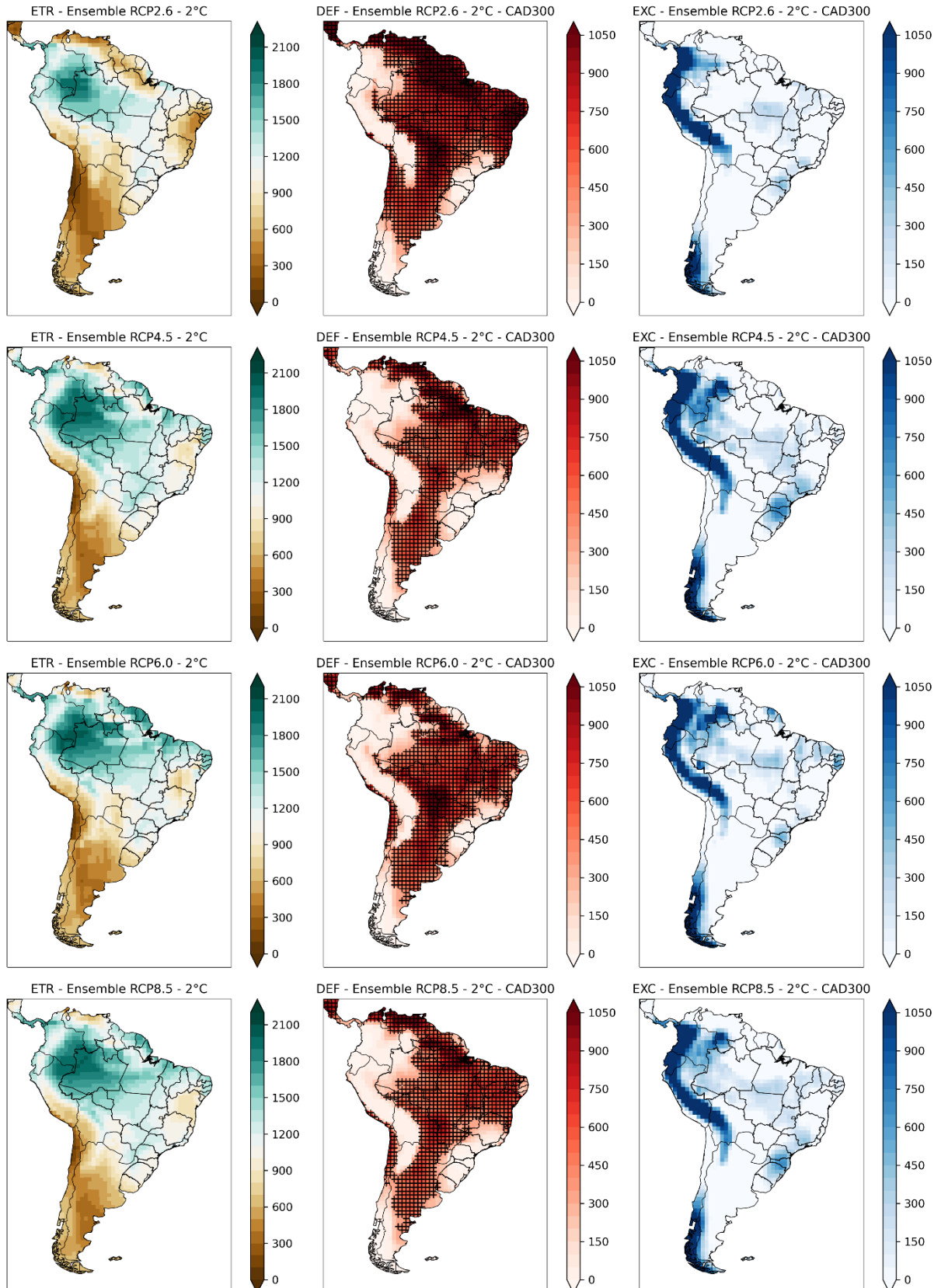
ZHANG, D.; STENGER, A.; HAROU, P.A. Policy instruments for developing planted forests: Theory and practices in China, the U.S., Brazil and France. **Journal of Forest of Economics**, Umea, v. 21, p. 223-237, 2015.

## ANEXOS

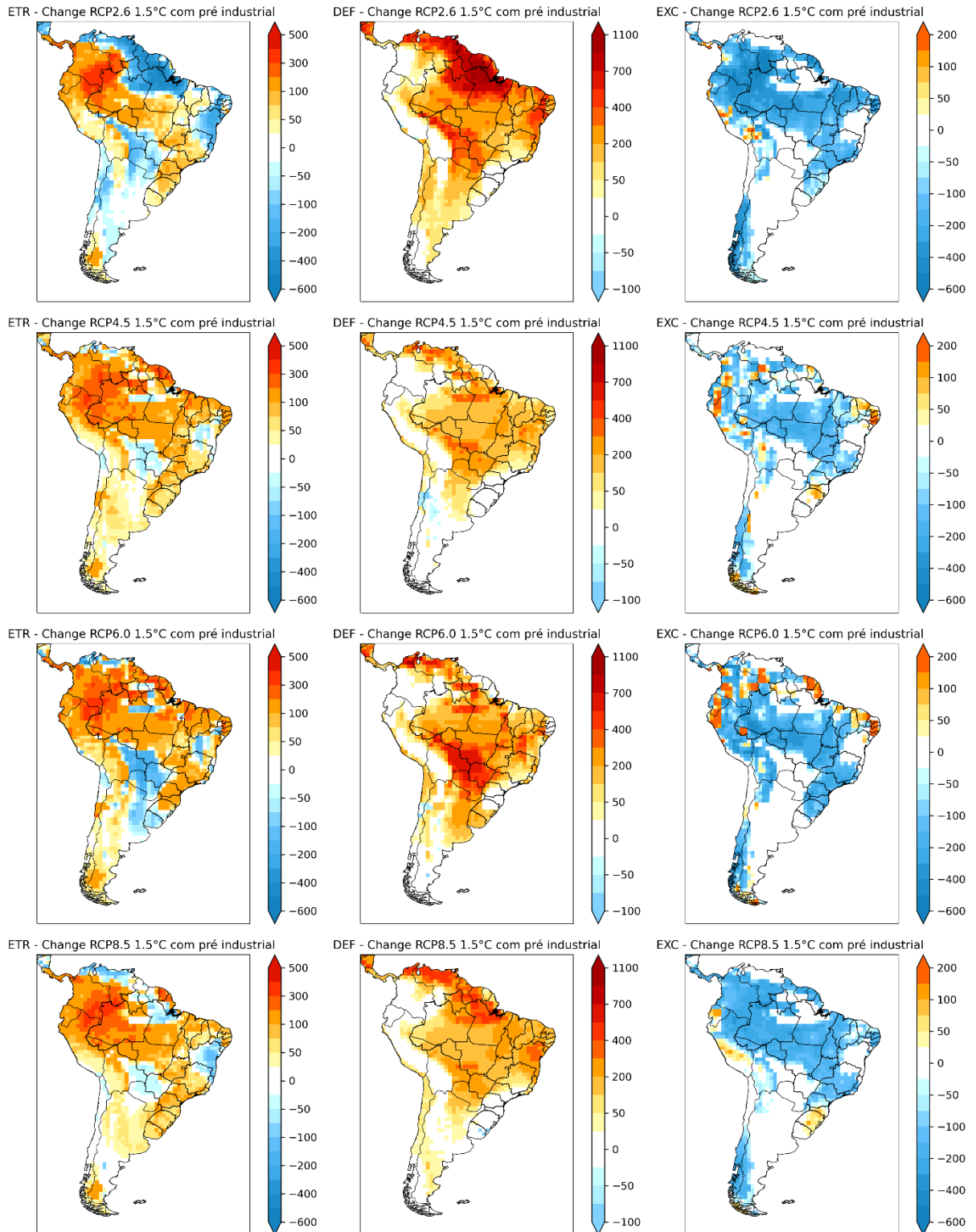
**Anexo 1.** Extratos do Balanço Hídrico do eucalipto: Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC) referente ao período de aumento da temperatura média global em 1,5°C. Áreas hachuradas na DEF indicam regiões desfavoráveis para o cultivo de eucalipto (DEF < 300 mm).



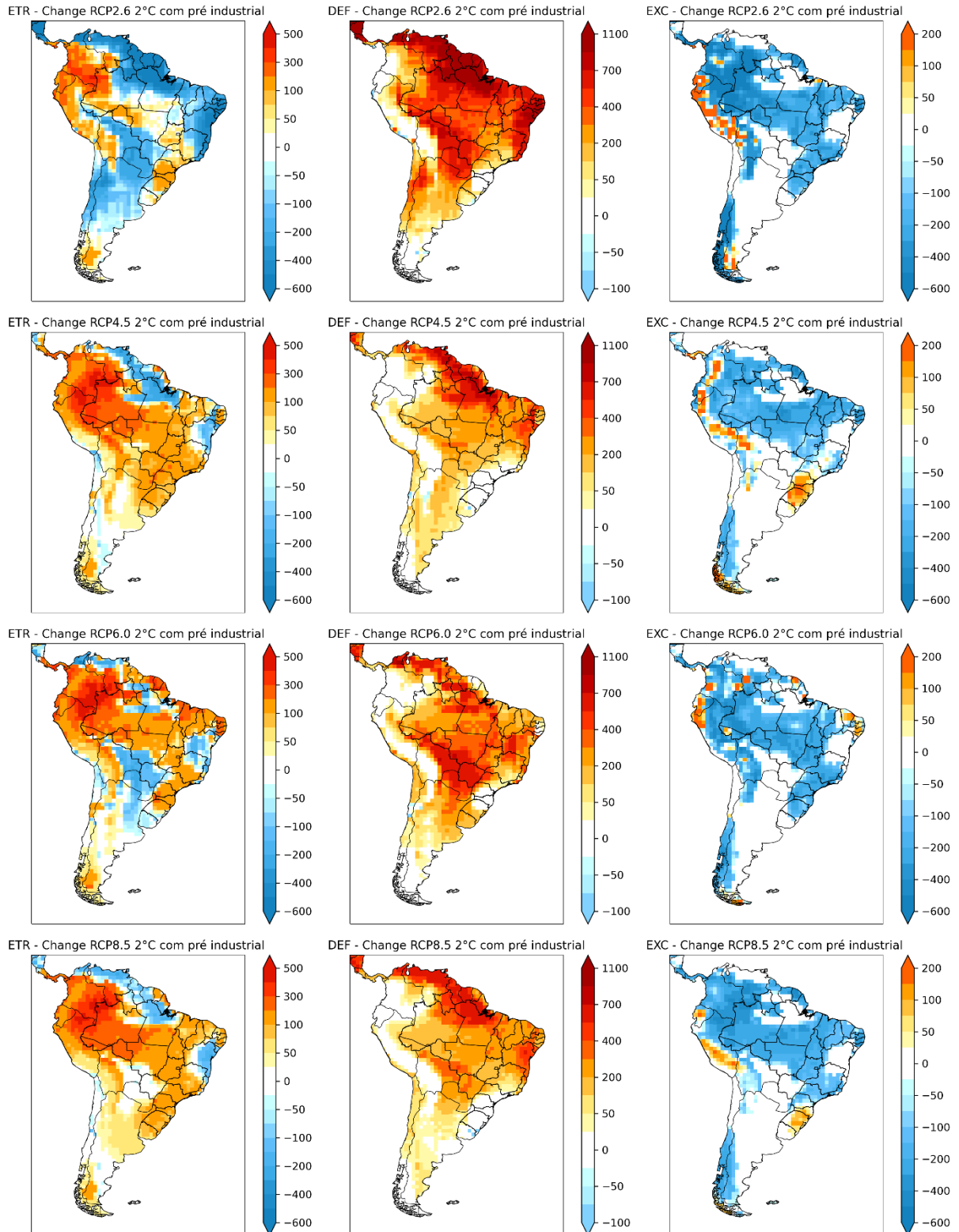
**Anexo 2.** Extratos do Balanço Hídrico do eucalipto: Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC) referente ao período de aumento da temperatura média global em 2°C. Áreas hachuradas na DEF indicam regiões desfavoráveis para o cultivo de eucalipto (DEF < 300 mm).



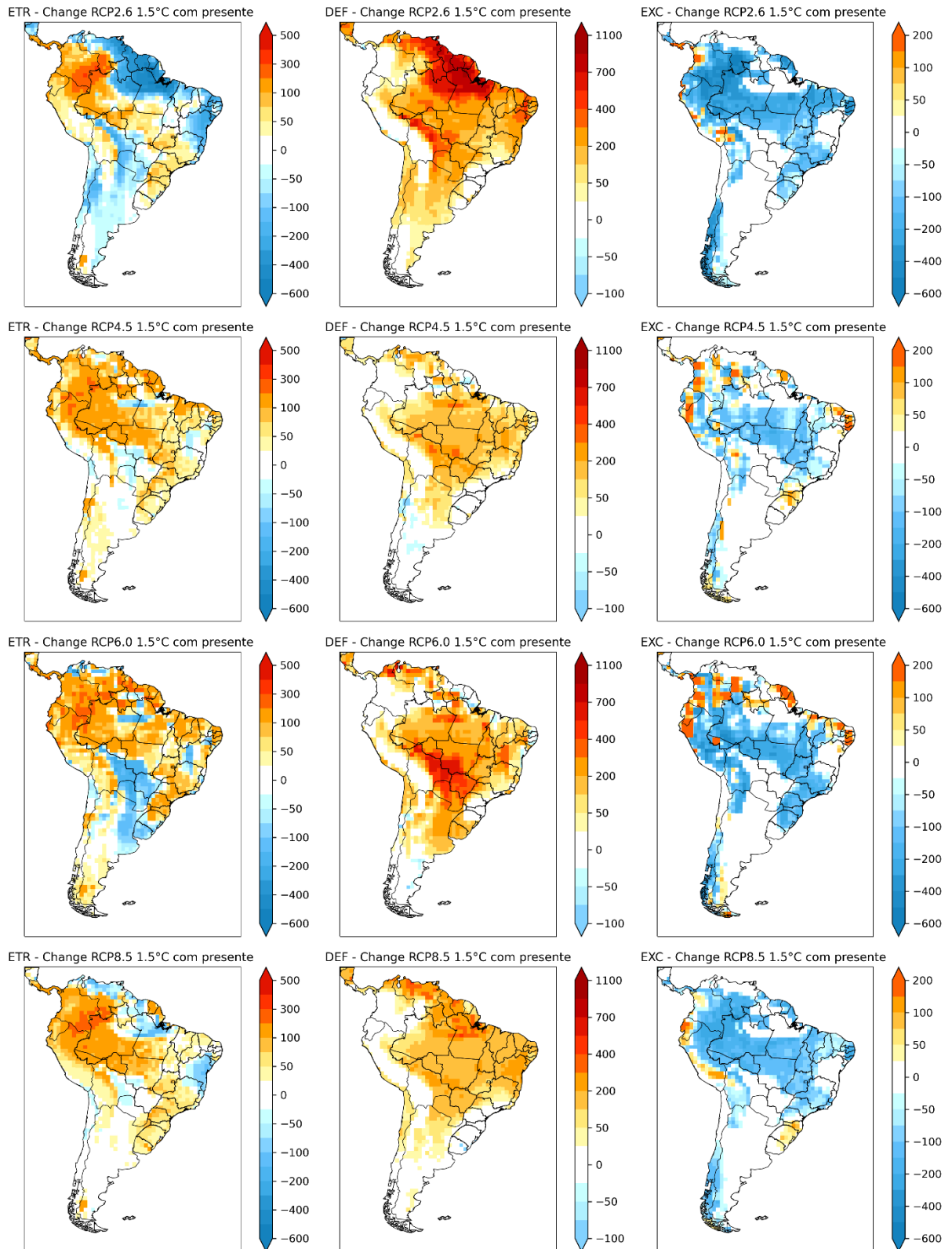
**Anexo 3.** Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C e os extratos referente ao período pré-industrial. Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC).



**Anexo 4.** Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 2°C e os extratos referente ao período pré-industrial. Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC).



**Anexo 5.** Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 1,5°C e os extratos referente ao período presente. Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC).



**Anexo 6.** Diferença entre os extratos do Balanço Hídrico climatológico para o eucalipto no período de aquecimento médio global em 2°C e os extratos referente ao período presente. Evapotranspiração Real (ETR), Deficiência Hídrica (DEF) e Excedente Hídrico (EXC).

