



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.18.19.52-TDI

**A INFLUÊNCIA DAS ÁREAS ALAGÁVEIS NO
BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO PRATA E
IMPLICAÇÕES NA AGRICULTURA EM CENÁRIOS
FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Caroline Estéphanie Ferraz de Mourão

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Chou Sin Chan, e José Antônio Marengo Orsini, aprovada em 24 de novembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KKETCS>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.18.19.52-TDI

**A INFLUÊNCIA DAS ÁREAS ALAGÁVEIS NO
BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO PRATA E
IMPLICAÇÕES NA AGRICULTURA EM CENÁRIOS
FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Caroline Estéphanie Ferraz de Mourão

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Chou Sin Chan, e José Antônio Marengo Orsini, aprovada em 24 de novembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KKETCS>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Mourão, Caroline Estéphanie Ferraz.

M865i A influência das áreas alagáveis no balanço hídrico da Bacia do Prata e implicações na agricultura em cenários futuros de mudanças climáticas / Caroline Estéphanie Ferraz de Mourão. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xx + 94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.18.19.52-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Chou Sin Chan, e José Antônio Marengo Orsini.

1. Bacia do Prata. 2. Pantanal. 3. Áreas alagadas. 4. Mudanças climáticas. 5. Impactos na agricultura. I.Título.

CDU 551.583



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

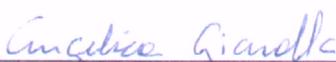
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Caroline Estéphanie Ferraz Mourão**

Título: "A INFLUÊNCIA DAS ÁREAS ALAGÁVEIS NO BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO PRATA E IMPLICAÇÕES NA AGRICULTURA EM CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dra. Angélica Giarolla



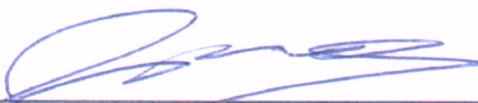
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Chou Sin Chan



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. José Antônio Marengo Orsini



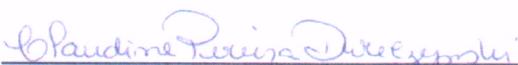
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Ana Maria Heuminski de Avila



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Dra. Claudine Pereira Dereczynski



Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 24 de novembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos familiares que me apoiaram nessa difícil jornada.

À Dra. Chou Sin Chan e Dr. José Marengo pela orientação, dedicação e incentivo.

Aos colegas do PROJETA, pelo convívio sempre muito agradável e pelas colaborações.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre pelos ensinamentos.

Aos colegas de Pós-graduação e funcionários do CST pelo bom convívio, durante as disciplinas e pela amizade que ficou após o curso.

Aos amigos que tiveram um papel muito importante no desenrolar do trabalho, agradeço os momentos vividos intensamente e o apoio nos momentos difíceis.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

Aos membros da Banca examinadora pela predisposição em analisar este trabalho e pelos comentários e sugestões.

RESUMO

A Bacia do Prata (LPB – *La Plata Basin*) se estende ao longo de 5 países no sudeste da América do Sul, onde o clima e hidrologia sustentam uma das regiões mais densamente povoadas e agricolamente importante do continente. Nas últimas décadas observações mostram que existe uma tendência positiva na precipitação e nível/vazão dos rios, tendo o El Niño um forte impacto na região, propiciando condição anormalmente úmidas durante esse evento. Na LPB encontra-se o pantanal, que é uma imensa planície de áreas alagáveis que varia durante todo o ano influenciando no balanço de energia dessa região. Portanto, neste trabalho, as áreas inundáveis foram inseridas no modelo climático regional Eta, e foram avaliados os processos de superfície na região, para mostrar como essas áreas afetam o balanço hídrico e de energia da LPB. Os resultados desse experimento mostraram que o balanço de umidade na LPB é fortemente influenciado pela variação espacial das áreas alagadas do pantanal. Como a economia da LPB é fortemente baseada em sistemas de cultivos, neste trabalho foi realizada uma análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas na agricultura dessa região a partir da análise de eventos extremos simulados pelo modelo Eta, através da simulação controle e do experimento com a inclusão das áreas inundadas. As projeções mostraram uma tendência de aumento da temperatura do ar para toda a LPB, sendo a região nordeste da Bacia a mais quente e com uma tendência de redução da precipitação também identificada. Portanto, essa região poderia ser climatologicamente desfavorável ao cultivo de diversas culturas, como a soja, por exemplo, no entanto, verificou-se que algumas culturas como a cana-de-açúcar poderia não ser atingida por essas variações climáticas, por ser uma cultura que se adapta bem as altas temperaturas, necessitando apenas de sistemas de irrigação nos casos em que a precipitação fosse reduzida. Apesar dos impactos que as mudanças climáticas podem causar a essa região, espera-se que trabalhos como este sirvam de subsídio para estudos de adaptação, que possam compensar os efeitos negativos da mudança do clima, através do desenvolvimento de culturas mais resistentes as variações climáticas.

THE INFLUENCE OF WETLANDS ON WATER BALANCE OF LA PLATA BASIN AND IMPLICATIONS ON AGRICULTURE IN SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

The La Plata Basin extends along five countries in Southeastern South America, where climate and hydrology sustains one of the most densely populated and agricultural important regions of the continent. In recent decades observations show that there is a positive trend in precipitation and river levels/discharges, and El Niño has a strong impact of the region with anomalously wet conditions during this event. We find the Pantanal in LPB, which is an immense plain of wetlands which have annual variability, and have influence on the energy balance of this region. Therefore, in this work, the wetlands were included in the Eta regional climate model, and we assess surface processes in this region, to show how the wetlands affect the water and energy balance of the LPB. The results of this experiment showed that the moisture balance in the LPB is heavily influenced by the variation in the wetlands. As the economy of LPB is strongly based cropping systems, in this work was carried out an analysis of the possible impacts of climate change on agriculture in this region from the analysis of extreme events simulated by the Eta model, by means of experiment with the inclusion of the flooded areas and control simulation. The analysis of the projections showed an increase in temperature for the entire LPB, and northeast of Basin being the warmest, while a negative rainfall trend was also identified. Therefore, this region could be climatologically unfavorable for the cultivation of various crops, such as soybean, for example, however we found that some cultures like sugarcane could not be affected by climatic variations, since it is a culture that adjusts to the high temperatures, requiring only irrigation systems where precipitation was reduced. Despite the impacts that climate change can cause to the region, it is expected this work can provide support for adaptation studies that may offset the negative effects of climate change, by developing crops more resistant to climate variations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa da América do Sul, com destaque para a Bacia do Prata (em verde).	1
Figura 2.1 – Média anual da precipitação CMAP (mm) para a Bacia do Prata. Fonte: Berbery e Barros (2002).	8
Figura 2.2 - Média sazonal da precipitação CMAP (mm/dia) para a Bacia do Prata: (a) SON (primavera), (b) DJF (verão), (c) MAM (outono), e (d) JJA (inverno). [A linha pontilhada em (d) é o contorno de 0,5 mm/dia.]. Fonte: Berbery e Barros (2002).	10
Figura 2.3 – Localização da bacia do alto rio Paraguai (BAP) no Brasil, Bolívia e Paraguai, na América do Sul e o limite do Pantanal dentro da bacia do alto Paraguai.	14
Figura 2.4 - Área arborizada no leste do Paraguai, em hectares.	16
Figura 3.1 - Modelo solo superfície.	26
Figura 3.2 - Distribuição dos tipos de vegetação, na grade de 10 km do modelo Eta, para todo o domínio da simulação, de acordo com a classificação exposta na tabela 3.1.	28
Figura 3.3 - Mapa de frequência de inundação do Pantanal e sub-regiões.	31
Figura 3.4 - Série temporal do mapeamento das áreas inundadas obtidas a partir do modelo de mistura espectral, para o ano 2006.	32
Figura 3.5 - Mapa de vegetação utilizados pelo modelo Eta, agrupados para a grade de 10 km. A figura da esquerda representa o período de agosto a março e a da direita o período de abril a julho.	33
Figura 4.1 - Média sazonal da precipitação (mm/dia) para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (DJF) e inverno (JJA). Dados observados	

(CRU), simulados pelo modelo Eta e o viés da precipitação (mm/dia) derivado do modelo do Eta em relação aos dados do CRU.	40
Figura 4.2 - Ciclo anual da precipitação (mm/dia) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). A linha preta representa os dados do CRU e a vermelha representa o modelo Eta-10km.	41
Figura 4.3 - Média sazonal da temperatura próximo à superfície (°C) para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (DJF) e inverno (JJA). Dados observados (CRU), simulados pelo modelo Eta e o viés da temperatura (°C) derivado do modelo do Eta em relação aos dados do CRU.....	42
Figura 4.4 - Ciclo anual da Temperatura a 2m (°C) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). A linha preta representa os dados do CRU e a vermelha representa o modelo Eta-10km.....	43
Figura 4.5 - Média sazonal da anomalia de precipitação (mm/dia), para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, em relação ao período de 1961-1990.	44
Figura 4.6 - Ciclo anual da precipitação (mm/dia) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). As linhas representam o clima presente (1961-1990 - preta) e os períodos de 2011-2040 (vermelha), 2041-2070 (verde) e 2071-2099 (azul).	44
Figura 4.7 - Média sazonal da anomalia de Temperatura (°C), para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, referente ao período de 1961-1990..	45
Figura 4.8 - Ciclo anual da temperatura (°C) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). As linhas representam o clima presente (1961-1990 - preta) e os períodos de 2011-2040 (vermelha), 2041-2070 (verde) e 2071-2099 (azul).	46
Figura 4.9 - Representação da LPB e das quatro regiões escolhidas para análise.....	48

Figura 4.10 - Fluxos zonal e meridional de umidade (em vermelho) e saldo de umidade (em azul), média para os períodos de DJF, MAM, JJA e SON, da simulação controle (kg/ms^{-1}), para cada região representada na figura 4.9.....	50
Figura 4.11 - Fluxos zonal e meridional de umidade (em vermelho) e saldo de umidade (em azul), média para os períodos de DJF, MAM, JJA e SON, do experimento com a inclusão das áreas alagadas (kg/ms^{-1}), para cada região representada na figura 4.9.	51
Figura 4.12 - Balanço médio de umidade (mm/dia) para o período de 1961-1990, simulado pelo modelo Eta. Em vermelho a simulação controle e em azul o experimento com as áreas alagadas.....	53
Figura 4.13 - Diferença da media mensal da precipitação (mm/dia) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.	54
Figura 4.14 - Ciclo anual de precipitação, média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.	56
Figura 4.15 - Evolução temporal da precipitação média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.	57
Figura 4.16 - Diferença da media mensal da temperatura próximo a superfície ($^{\circ}\text{C}$) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.	59
Figura 4.17 - Ciclo anual de temperatura próximo a superfície, média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.	60
Figura 4.18 - Evolução temporal da temperatura próximo à superfície, média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões	

representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.	61
Figura 4.19 - Diferença da media mensal do fluxo de calor latente (W/m^2) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990. 62	62
Figura 4.20 - Diferença da media mensal do fluxo de calor sensível (W/m^2) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990. 63	63
Figura 4.21 - Ciclo anual dos fluxos de calor latente (linha cheia) e sensível (linha pontilhada), média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha azul representa o experimento e a vermelha a simulação controle.....	64
Figura 4.22 - Evolução temporal dos fluxos de calor latente(linha cheia) e sensível (linha pontilhada), média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha azul representa o experimento e a vermelha a simulação controle.	65
Figura 4.23 – Índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para o período de 1961-1990: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.....	68
Figura 4.24 – Índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para o período de 1961-1990: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.	69
Figura 4.25 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.	70
Figura 4.26 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.	71

Figura 4.27 – Índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para o período de 1961-1990: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.	72
Figura 4.28 – Índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para o período de 1961-1990: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.....	73
Figura 4.29 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.....	74
Figura 4.30 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Taxas de precipitação média na bacia, vazão do rio da Prata e evaporação, correspondente à variabilidade de diferentes escalas de tempo.	12
Tabela 3.1 - Tipos de cobertura de uso do solo.	27
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados pelo modelo Eta, para a classificação do tipo de vegetação número 15.	33
Tabela 3.3 - Índices de extremos de precipitação.	37
Tabela 3.4 - Índices de extremos de temperatura.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Características gerais da Bacia do Prata	7
2.1.1 Regime de precipitação	8
2.1.2 Variabilidade climática e hidrológica	10
2.1.3 O Pantanal	13
2.1.4 Agricultura na LPB	15
2.2 Projeções climáticas	18
3. METODOLOGIA	23
3.1 Etapa I - Downscaling Climático para a Região da Bacia do Prata	23
3.1.1 Modelo Eta	23
3.1.1.1 Configuração da simulação	25
3.1.1.2 Parametrização de superfície	25
3.1.2 HadGEM2-ES	28
3.1.3 Cenários de emissão de gases efeito estufa	29
3.2 Etapa II – Influência das áreas alagáveis no Balanço Hídrico na LPB	30
3.2.1 Representação das áreas alagáveis	30
3.2.2 Estudo do balanço hídrico	34
3.3 Etapa III - Avaliação das implicações das mudanças climáticas na agricultura	36
4. RESULTADOS	39
4.1 Etapa I - Downscaling Climático para a Região da Bacia do Prata	39
4.1.1 Análise do Clima presente (1961-1990)	39
4.1.1.1 Precipitação	39
4.1.1.2 Temperatura	41
4.1.2 Projeções do clima futuro	43
4.1.2.1 Precipitação	43
4.1.2.2 Temperatura	45
4.1.3 Discussões e Conclusões	46

4.2 Etapa II – Influência das áreas alagáveis no Balanço Hídrico na LPB	47
4.2.1 Análise do Fluxo de umidade	48
4.2.2 Análise do Balanço de umidade	51
4.2.3 Análise da Precipitação	53
4.2.4 Análise da Temperatura	58
4.2.5 Análise dos Fluxos de Calor Latente e Sensível	62
4.2.6 Discussões e conclusões	66
4.3 Etapa III - Avaliação das implicações das mudanças climáticas na agricultura	66
4.3.1 Análise dos índices extremos	66
4.3.2 Análise das implicações na agricultura	75
4.3.3 Discussões e conclusões	81
5. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1. INTRODUÇÃO

A região de estudo deste trabalho é a Bacia do Prata (LPB – *La Plata Basin*), que abrange cerca de 3.200.000 km² (figura 1.1). Em termos de extensão geográfica esta bacia é a quinta maior do mundo, perdendo apenas para a Bacia Amazônica na América do Sul. A bacia é composta basicamente de três grandes sub-bacias, correspondendo aos rios Paraná, Paraguai e Uruguai. A LPB cobre cinco países, com aproximadamente 46% da área pertencente ao Brasil, 30% à Argentina, 13% ao Paraguai, 7% à Bolívia e 4% ao Uruguai.

Os recursos hídricos da LPB sustentam uma das regiões mais densamente povoadas da América do Sul, onde a agricultura e a pecuária estão entre seus recursos essenciais. O transporte de superfície aumentou consideravelmente nos últimos anos devido à integração das economias regionais e os rios são utilizados como cursos de água naturais. Por último, mas não menos importante, várias usinas hidrelétricas fornecem a maior parte da energia consumida. Argentina e Uruguai construíram Salto Grande, no rio Uruguai. Brasil e Paraguai construíram o que é hoje a maior estação de energia no mundo em Itaipu, no rio Paraná. Argentina e Paraguai construíram Yacyretá, que é também uma estação de energia muito grande a jusante de Itaipu.

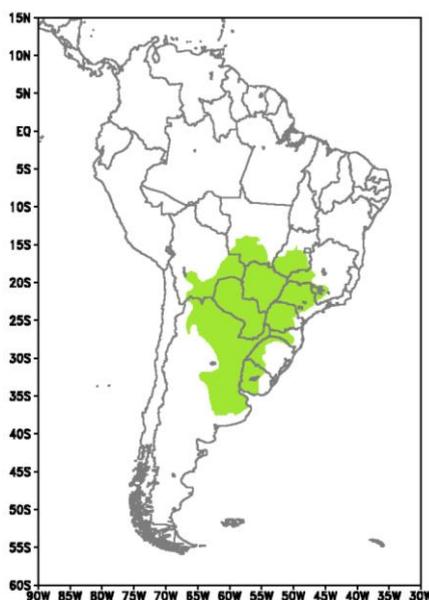


Figura 1.1 – Mapa da América do Sul, com destaque para a Bacia do Prata (em verde).

A LPB contém vários ecossistemas importantes, tais como: (1) O grande Pantanal, compartilhado pelo Brasil, Bolívia e Paraguai, que se comporta como um regulador de todo o sistema hidrológico da LPB, retardando o fluxo das águas do rio Paraguai até o rio Paraná (SOLDANO, 1947); (2) Os planaltos das bacias do Paraguai e Paraná, que são importantes corredores ecológicos ligando os Cerrados do Pantanal; (3) O bioma Cerrado, que abrange cerca de 2.000.000 km² do Brasil Central, 25% do território do país. Esse bioma é utilizado principalmente para a agricultura, produzindo 52% da soja do Brasil, 41% da carne bovina, 34% do arroz, 26% do milho e 21% do café (RESCK, 2002); (4) A região do Chaco, outro ecossistema chave, que é dominada por florestas secas e savanas, e uma área aluvial formada por sedimentos dos rios Bermejo e Pilcomayo; (5) Os Pampas, que é o ecossistema com os solos mais férteis da LPB, em grande parte convertidos para produção agrícola (HALL et al., 1992; SORIANO et al., 1991); (6) Outro bioma importante é a Mata Atlântica, no nordeste da LPB, caracterizado por intenso desmatamento e uso da agricultura. Com apenas 7% de sua extensão original remanescente, a Mata Atlântica é considerada um “*hotspot*” (ponto quente) de biodiversidade global, devido à riqueza de sua biodiversidade e seu alto número de espécies endêmicas ameaçadas de extinção.

O setor agrícola dessa região tem se ampliado nas últimas décadas devido a demanda mundial por alimentos e biocombustíveis. Além disso, o aumento da média anual da precipitação entre 20 e 30% nos últimos 30 anos tem favorecido a expansão da fronteira agrícola, principalmente de trigo e soja. No entanto, as projeções de aquecimento global até finais do Século XXI podem trazer riscos de quebra de safra devido à vulnerabilidade das culturas as grandes variações das mudanças climáticas, principalmente, devido aos longos períodos de seca e ao aumento na frequência de chuvas intensas (CHRISTENSEN et al., 2007; ASSAD e PINTO, 2008; MARENGO et al., 2009b; CHRISTENSEN et al., 2013; VASCONCELOS et al., 2014; MARENGO et al., 2014).

A vulnerabilidade da agricultura às mudanças climáticas tem sido motivo de preocupação de inúmeros estudos na LPB e no mundo. No entanto, existem pelo menos duas razões para supor que, a menos que as mudanças levem a cenários extremos como inundações permanentes ou uma elevada redução da umidade do solo por causa do aumento de temperatura ou menores precipitações, a adaptação à mudança climática seria bastante rápida. A primeira razão é que sendo uma atividade de ciclo anual, os produtores são capazes de se adaptar rapidamente e de forma autônoma às mudanças climáticas progressivas, mas relativamente lentas. A segunda razão é que o desenvolvimento atual da biotecnologia é tão formidável que certamente será capaz de superar muitos dos problemas causados pelas tendências climáticas negativas (BARROS, 2004). No entanto, estudos como este de impactos das mudanças climáticas na agricultura se fazem necessários para a elaboração de estratégias de adaptação.

Mudanças do uso e cobertura da terra (*Land Use and Land Cover* - LULC) contribuem aproximadamente com 20% das atuais emissões antropogênicas de CO₂ (WUEBBLES et al., 1999) e representam a principal força motriz na perda de diversidade biológica (VITOUSEK et al., 1997). Hoje, há um reconhecimento crescente de que a mudança de uso do solo é o principal fator das mudanças ambientais globais (MEYER; TURNER, 1994). Portanto, uma boa representação do solo nos modelos numéricos é um fator importante no estudo do clima.

De acordo com Chamorro (2006) alguns problemas são encontrados na Bacia do Prata devido as mudanças hidrológicas associadas as mudanças climáticas na região. As inundações não são eventos tão dramáticos como furacões ou terremotos, mas elas estão entre os fenômenos naturais mais letais, totalizando 40% das vítimas de desastres naturais. Os alagamentos resultam em catástrofes humanitárias porque grande parte da população mundial vive nas costas e margens de rios e estuários.

No Paraguai, as cheias do rio Paraguai causam perdas milionárias, afetando milhares de pessoas, destruindo casas, prédios públicos, estradas, gado e fazendas. Estima-se que mais de 60 mil pessoas sofreram danos nas inundações de 1982/83. Outro estudo realizado pelo Comitê de Emergência Nacional (CEN) do Paraguai, estimou que mais de 70 mil pessoas foram afetadas pelas cheias do rio Paraguai e seus afluentes em 1992. Nas cheias de 1997 e 1998, em torno de 25 mil pessoas foram atingidas em Assunção (principal centro urbano do Paraguai) e mais de 80 mil no resto do país.

Na Argentina, os prejuízos da enchente de 1983 chegaram a um total de aproximadamente 965 milhões de dólares americanos. Tais valores só representam a quantidade de perdas devido a danos diretos sofridos pela pecuária, agricultura e infraestrutura (AISIKS, 1984).

Dentro dos impactos e adaptação na sociedade (por exemplo, na agricultura, gestão de recursos hídricos, saúde, entre outros) há um movimento crescente para avaliação integrada, onde as projeções de mudanças climáticas regionais constituem um fator principal para os sistemas de apoio à decisão visando reduzir a vulnerabilidade. Segundo Marengo et al. (2009a) um número relativamente pequeno de estudos no Brasil foram dedicados aos impactos e vulnerabilidades utilizando avaliações de cenários de mudanças climáticas regionais. No entanto, eles não deixam margem para dúvidas: o Brasil não ficará ileso as mudanças do clima (PINTO et al., 2008; ASSAD e PINTO, 2008; SCHAEFFER et al., 2008; CEDEPLAR e FIOCRUZ, 2008; MARENGO et al., 2009a, b; VASCONCELOS et al., 2014).

Cenários de mudanças climáticas futuras de alta resolução, desenvolvidos a partir de resultados do modelo climático regional foram produzidos por diversos autores para a América do Sul (MARENGO et al., 2009a, b; NUÑEZ et al., 2008; SOLMAN et al., 2008; SOLMAN et al., 2008; GARREAUD e FALVEY, 2009; CABRÉ et al., 2010; URRUTIA e VUILLE, 2009; PESQUERO et al., 2009, CHOU et al., 2011, MARENGO et al., 2011).

Na América do Sul, experimentos com *downscaling* dinâmico para cenários de mudança climática tornaram-se recentemente disponíveis para diversos cenários de emissões e horizontes temporais até o final do século XXI, usando diferentes modelos regionais forçados com condições de contorno de vários modelos climáticos globais (MARENGO et al., 2009a; NUÑEZ et al., 2009; PESQUERO et al., 2009; MARENGO et al., 2011; CHOU et al., 2014b; SÁNCHEZ et al., 2015).

De acordo com Solman (2013), vários estudos têm sido realizados nos últimos anos para a América do Sul, os quais têm demonstrado que as simulações climáticas regionais são afetadas por várias fontes de incerteza. Uma das fontes de incerteza dos modelos deriva da representação solo-superfície. O aumento da resolução entre outros fatores pode contribuir para uma melhor representação da superfície, fornecendo um detalhamento maior na topografia, por exemplo.

Neste trabalho foi utilizado o modelo regional Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994) que é um modelo em ponto de grade de equações primitivas, que vem sendo utilizado desde 1996 no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), para previsões de curto, médio e longo prazos.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é representar as áreas alagáveis e os processos de superfície na Bacia do Prata e avaliar a contribuição dessas áreas no balanço hídrico da Bacia, assim como as implicações na agricultura em simulações de cenários futuros de mudanças climáticas utilizando o modelo regional Eta.

De acordo com os objetivos traçados, o trabalho foi dividido em três etapas principais:

I - Downscaling climático para a Região da Bacia do Prata: etapa dedicada a avaliação da configuração e resolução escolhidas, para as simulações com o modelo Eta (Simulação Controle);

II – Influência das áreas alagáveis no Balanço Hídrico na LPB: discussão dos resultados das simulações com a inclusão das áreas alagadas, juntamente com a análise do balanço hídrico na LPB, mostrando como as áreas alagáveis influenciam neste balanço;

III - Avaliação das implicações das mudanças climáticas na agricultura: aborda a avaliação dos possíveis impactos das mudanças climáticas na agricultura, utilizando as projeções do modelo Eta, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, com o RCP 4.5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado, um pouco do conhecimento sobre a Bacia do Prata e sua variabilidade climática, o pantanal e os efeitos das áreas inundadas no clima da região e agricultura na LPB. Será discutido também o uso de modelagem numérica regional em estudos de mudanças climáticas.

2.1 Características gerais da Bacia do Prata

A Bacia do Prata está localizada na América do Sul entre as latitudes 16° e 34°S. É limitada a oeste pela Cordilheira dos Andes e a nordeste e leste pelo Planalto Brasileiro e a Serra do Mar, respectivamente. Os principais tributários do rio da Prata são os rios Paraná e Uruguai e o rio Paraguai, que é um afluente do rio Paraná, que também é importante para a LPB.

A bacia do rio Paraná representa cerca de metade da área da Bacia do Prata (1.510.000 km²). Normalmente é dividida em três sub-bacias, o Alto, Médio e Baixo Paraná. A maior parte das vazões do rio Paraná vem da parte superior e média, com uma pequena contribuição da porção inferior. Altas vazões no Médio Paraná produzem inundações que se estendem por grandes áreas do Baixo Paraná, mesmo sem uma contribuição local significativa. O Baixo Paraná também recebe vazão do rio Paraguai.

A bacia do rio Paraguai é essencialmente uma grande planície, com algumas exceções com pequena e uniforme inclinação (TOSSINI, 1959), que ocupa uma área de cerca de 1.095.000 km². A elevação da bacia do Paraguai raramente ultrapassa 70 m acima do nível do mar. Cerca de 100.000 km² da bacia do Paraguai são cobertos por um vasto pântano chamado de Pantanal, uma das zonas úmidas mais importantes do mundo, que está localizada na parte superior da bacia do rio Paraguai sendo compartilhada por Brasil, Bolívia e Paraguai. A zona úmida do pantanal é um reservatório de enorme riqueza biológica que também funciona como regulador do sistema hidrológico da Bacia do Prata. O regime de cheia no rio Paraguai como um todo é fortemente influenciado pelo armazenamento no Pantanal. Um declive suave nesta região

produz um atraso no pico de cheia entre o norte e o sul do Pantanal de cerca de quatro meses. Segundo Hamilton et al. (1996) as estimativas mensais da área total inundada na região variam de 11.000 km² a 110.000 km², onde a inundação máxima ocorre no início de fevereiro na região Norte e em Junho na região Sul, o que reflete o atraso na drenagem da região.

A bacia do rio Uruguai é uma pequena sub-bacia diferente das outras duas, com uma área de aproximadamente 365.000 km². Essa bacia tem um relevo variado ao longo de seu curso de 1500 km, com vários pequenos vales e pequenos cursos d'água. E devido ao seu pequeno gradiente longitudinal e com uma seção transversal relativamente estreita, a defasagem entre a vazão do rio e a chuva é pequena (TOSSINI, 1959).

2.1.1 Regime de precipitação

A precipitação média anual sobre a Bacia do Prata (Figura 2.1), possui um gradiente leste-oeste, com dois máximos: um em direção à fronteira norte, e um segundo sobre a região central da bacia. Estes dois centros são resultado de diferentes regimes de precipitação (BERBERY e BARROS, 2002).

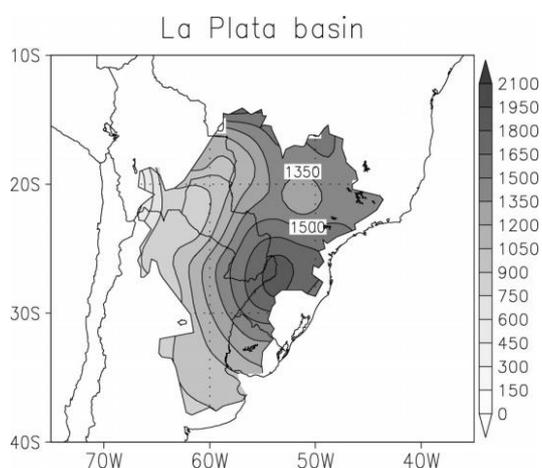


Figura 2.1 – Média anual da precipitação CMAP (mm) para a Bacia do Prata.
Fonte: Berbery e Barros (2002).

O extremo norte da Bacia possui os maiores valores de precipitação durante o verão (Figura 2.2b), o que está relacionado com a extensão sul do sistema de monção (BERBERY e BARROS, 2002). A região ao sul da Bacia Amazônica e o Planalto Brasileiro (aproximadamente 13°-17°S, 46°-52°W) compõem a

região central do sistema de monção da América do Sul (*South American monsoon system* - SAMS, ZHOU e LAU, 1998), que possuiu uma precipitação máxima durante o verão austral. Esse padrão de precipitação associado ao sistema de monção que se estende do sudeste da Bacia Amazônica para o sudeste do Brasil e no Oceano Atlântico, como uma banda de nuvens e precipitação é conhecido como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; KODAMA, 1993).

O núcleo de máxima precipitação sobre a região central da bacia está presente durante todas as estações (BERBERY e BARROS, 2002) (Figuras. 2.2a-d), sendo que grande parte dessa precipitação está relacionada aos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), que são frequentes durante a estação quente (outubro-abril) (VELASCO e FRITSCH, 1987; LAING e FRITSCH, 2000). Enquanto na estação fria (JJA), a forçante mais relevante é a atividade transiente, que é responsável por grande parte da precipitação total da região sudeste da América do Sul (VERA et al., 2002).

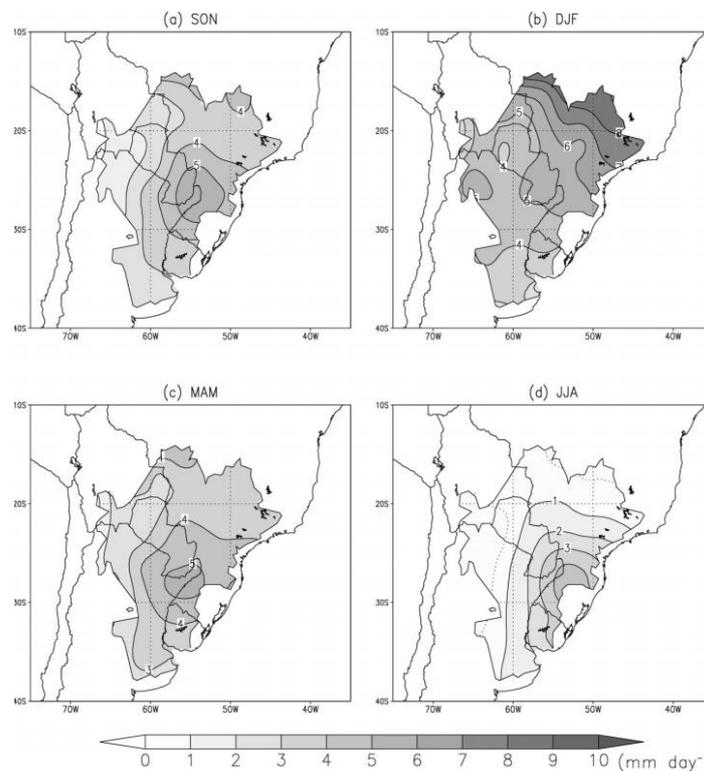


Figura 2.2 - Média sazonal da precipitação CMAP (mm/dia) para a Bacia do Prata: (a) SON (primavera), (b) DJF (verão), (c) MAM (outono), e (d) JJA (inverno). [A linha pontilhada em (d) é o contorno de 0,5 mm/dia.]. Fonte: Berbery e Barros (2002).

Uma característica notável que afeta as duas regiões de precipitação é o Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes (JBN; VIRJI, 1981; SILVA e BERBERY, 2006) de noroeste, que se estende do oeste da Bacia Amazônica para o sudeste através do leste da Bolívia e do Paraguai. O fluxo associado ao JBN transporta umidade da Amazônia tropical para altas latitudes da América do Sul (BERBERY e COLLINI, 2000; GAN et al., 2004; MARENGO et al., 2004; SILVA e BERBERY, 2006). Embora este jato possa estar presente em todo o ano, durante o verão ele tem uma relação melhor definida com o sistema de monção (ZHOU e LAU, 1998; RODWELL e HOSKINS, 2001; BERBERY e BARROS, 2002; SILVA e BERBERY, 2006).

2.1.2 Variabilidade climática e hidrológica

As vazões dos principais rios da Bacia do Prata tem uma forte variabilidade interanual e interdecadal forçada pela variabilidade climática (CAMILLONI e BARROS, 2000).

Berberly e Barros (2002) notaram que há uma diferença na magnitude da precipitação, vazão e evaporação na Bacia do Prata, entre a média dos períodos com El Niño e com La Niña (Tabela 2.1), no entanto, essa diferença é relativamente baixa, porque eventos de La Niña não estão associados com seca, nem mesmo com uma significativa redução da vazão nesta região. A razão é que a redução da precipitação ocorre ao sul da bacia e fora da área que alimenta a vazão dos principais rios (GRIMM et al., 2000).

Berberly e Barros (2002) encontraram também um aumento da vazão no Rio da Prata de 35%, para o período de 1980-99 em relação ao período de 1951-70. Os autores acreditam que a mudança considerável no uso do solo que vem ocorrendo em todas as bacias consideradas desde 1950, com um aumento notório da agricultura em detrimento da vegetação natural (TUCCI e CLARKE, 1998) pode ter contribuído para o aumento da vazão, em adição ao efeito do aumento das chuvas que foi de 16%.

Durante a estação quente, as maiores magnitudes do fluxo de umidade de noroeste são encontradas perto das latitudes tropicais e durante o inverno, o máximo é observado em direção ao sul, próximo a parte noroeste da Bacia do Prata. Um deslocamento lateral na direção leste também pode ser observado durante o verão, o que implica que a região de monção no norte da Bacia do Prata pode receber umidade diretamente do fluxo quente e úmido do continente tropical (BERBERLY e BARROS, 2002).

De acordo com Berberly e Barros (2002) a relação entre o JBN no inverno e a precipitação na Bacia do Prata, ainda não está clara. O JBN parece proporcionar uma fonte contínua de umidade e calor às zonas frontais e sistemas ciclônicos que produzem a maior parte da precipitação de inverno (VERA et al. 2002).

Berberly e Barros (2002) analisaram a evolução temporal do fluxo de umidade a leste dos Andes por um período de 22 anos e encontraram que o fluxo de umidade de noroeste se apresentou maior nos anos de El Niño, o que sustenta a hipótese de que os eventos de El Niño favorecem um JBN mais intenso. Em

particular, os autores encontraram que o El Niño de 1997/98 apresentou o maior fluxo de umidade de todo o período de estudo. Esse aumento do fluxo de umidade na Bacia do Prata durante o El Niño é consistente com o aumento da precipitação observada (ROPELEWSKI e HALPERT, 1987; GRIMM et al., 2000). No entanto, os autores notaram que o grande fluxo de umidade não é limitado aos eventos de El Niño, já que existem outros períodos em que o fluxo é intenso também.

Tabela 2.1 - Taxas de precipitação média na bacia, vazão do rio da Prata e evaporação, correspondente à variabilidade de diferentes escalas de tempo.

	Rainfall rate* over La Plata Basin ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Streamflow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Evaporation + infiltration ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
1998	107 000	36 600	70 400
1999	81 600	20 440	61 600
Difference	23%	44%	13%
El Niño	76 000	25 250	50 750
La Niña	71 000	21 640	49 360
Difference	7%	17%	3%
1951–70	72 000	19 300	52 700
1980–99	83 500	26 000	56 500
Difference	16%	35%	9%

* For lack of available precipitation records north 20°S during the 1951–70 period, rainfall rates over La Plata basin for this and for the 1980–99 period, as well as for El Niño/La Niña composites, were calculated only for the area south of this latitude.

Fonte: Berbery e Barros (2002).

Segundo Barros et al. (2005), a Bacia do Prata possui duas características que fazem com que sua vazão seja altamente suscetível às mudanças climáticas. A primeira é que as taxas percentuais de mudança na maioria das vazões são amplificadas por um fator geralmente maior que 2, quando comparadas com as taxas correspondentes à mudanças na precipitação (BERBERY e BARROS, 2002). Os autores sugerem que a amplificação da resposta hidrológica a precipitação não depende somente da mudança no uso do solo, mas é uma característica intrínseca dependente da declividade entre outras características da bacia. No contexto das mudanças climáticas, essa característica aumenta a vulnerabilidade às mudanças hidrológicas porque, não importa o sinal da mudança da precipitação, as respostas da vazão serão consideravelmente grandes. O segundo fator que tem tornado os recursos de água da Bacia do

Prata potencialmente vulneráveis as mudanças climáticas é que significativas mudanças na precipitação já vem sendo observadas durante os últimos anos.

A tendência positiva na vazão encontrada na Bacia do Prata nos últimos anos foi atribuída por alguns autores (como Camilloni e Barros, 2003 e Barros et al., 2005) principalmente a intensificação do sinal do El Niño na precipitação, levando a um aumento na frequência de grandes inundações no Médio e Baixo Paraná, onde quatro das cinco maiores cheias do século 20 ocorreram durante os últimos 20 anos desse século.

Esses exemplos mostram a grande sensibilidade das vazões dos principais rios da Bacia do Prata à variabilidade do clima. Esta sensibilidade se transforma em vulnerabilidade para as atividades que dependem do fornecimento de água do rio e se torna uma questão de preocupação, já que durante a última metade do século passado, a região já apresentava grande variabilidade interanual e interdecadal na precipitação que pode se repetir no futuro.

2.1.3 O Pantanal

O pantanal é uma imensa planície de áreas alagáveis que está incluído entre os maiores ecossistemas do planeta. Está localizado no extremo norte da LPB, na bacia do alto rio Paraguai, entre as latitudes 14°S e 23°S e as longitudes 53°W e 61°W. Sua área de cerca 138.183 km² na parte brasileira (VILA DA SILVA e ABDON, 1998) se estende pela Bolívia e Paraguai (figura 2.3). Representa uma área de transição entre os domínios do Cerrado no Brasil Central, do Chaco na Bolívia e da Região Amazônica ao Norte (DA SILVA, 1990). Caracteriza-se por uma extensa planície aluvial situada abaixo da cota de 200 m, que é drenada por 12 rios principais e caracterizada por um baixo índice de declividade, de 3 a 15 cm/km do Norte para o Sul e de 30 a 50 cm/km, de Leste para Oeste (ADÂMOLI, 1986).

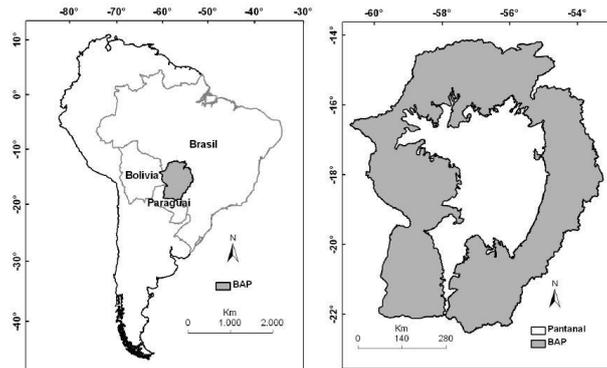


Figura 2.3 – Localização da bacia do alto rio Paraguai (BAP) no Brasil, Bolívia e Paraguai, na América do Sul e o limite do Pantanal dentro da bacia do alto Paraguai.
Fonte: Padovani (2010).

O pantanal apresenta uma grande diversidade de ambientes, decorrente da sua heterogeneidade edáfica e hidrológica. A vegetação é um mosaico de espécies de plantas, podendo ser encontradas desde gramíneas até árvores de grande porte que chegam a atingir alturas superiores a 20 metros (MAGALHÃES, 1992).

A precipitação média anual varia de 1000 a 1400 mm, com a maior parte da precipitação ocorrendo no período denominado chuvoso, que ocorre nos meses de novembro a março. Nos demais meses tem-se o período seco. A temperatura média anual flutua em torno de 25°C, chegando a atingir 40°C no verão, enquanto que no inverno pode chegar à 0°C (POR,1995), como resultado da atuação de frentes frias que penetram nessa região.

A superfície da região do Pantanal apresenta grandes contrastes ao longo do ano, apresentando épocas muito secas, com alto risco de queimadas, até períodos chuvosos, chegando a formar uma lâmina de água sobre a superfície em alguns locais (MAGALHÃES, 1992). Isso favorece uma modificação periódica espacial e temporal no albedo, na umidade do solo, na rugosidade e, conseqüentemente, na variabilidade dos processos físicos da atmosfera da região (OLIVEIRA et al., 2006).

As informações científicas acerca do pantanal, especialmente do ponto de vista meteorológico são muito escassas. Por esta razão, foi elaborado um extenso

projeto de pesquisa multidisciplinar, denominado Experimento Interdisciplinar do Pantanal Sul Mato-Grossense (Projeto IPE), que vem realizando campanhas de medidas de superfície e da camada limite desde 1998 na Base de Estudos do Pantanal, da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

A influência da variabilidade espacial e temporal das inundações no Pantanal no clima vem sendo estudada por diversos autores, para compreender melhor as diversas componentes dos processos de trocas de energia, bem como suas variações sazonais (ALVALÁ et al., 1998, MARQUES, 2000, KUBOTA et al., 2002, OLIVEIRA et al., 2006). Esses estudos mostram a grande relação entre as áreas inundadas e o clima na região, o que caracteriza a importância da representação dessas áreas em modelos numéricos climáticos.

2.1.4 Agricultura na LPB

A agricultura é uma atividade altamente dependente de fatores climáticos, cujas mudanças e variabilidade podem afetar a produtividade. A adaptação da agricultura às mudanças climáticas pode variar, tornando-a mais ou menos vulnerável, em função dos diferentes cenários climáticos (De LIMA et al. 2001).

A identificação dos principais tipos de uso do solo e das mudanças no uso da terra agrícola na LPB é fundamental para identificar quais áreas da bacia são mais vulneráveis às adversidades climáticas. 45% da área total da Bacia do Prata é dominada por pastagem e monoculturas de exportação, esta caracterização pode ser útil para o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas (SCHLINDWEIN et al., 2011).

Mudanças na cobertura e uso do solo foram observadas principalmente em relação às culturas temporárias e de produção animal que têm aumentado em todos os estados brasileiros na LPB. A expansão agrícola a partir de 1960 especialmente no Brasil tem deixado algumas áreas com apenas 5% de sua cobertura florestal original (CORONEL e MENÉNDEZ, 2006). Fatores econômicos podem ter determinado a dinâmica verificada de utilização das

terras agrícolas, que podem ser significativamente alteradas pelas mudanças climáticas futuras, influenciando a geografia da produção agrícola nessa região da LPB.

Em São Paulo a área de floresta primária caiu de 58% para aproximadamente 8% no final do século XX. No estado do Paraná, a cobertura florestal passou de 83% em 1890 para 5% em 1990. Em 1945, 55% do lado leste do Paraguai era composto de floresta e em 1990 esse índice era de apenas 15% (Figura 2.4).

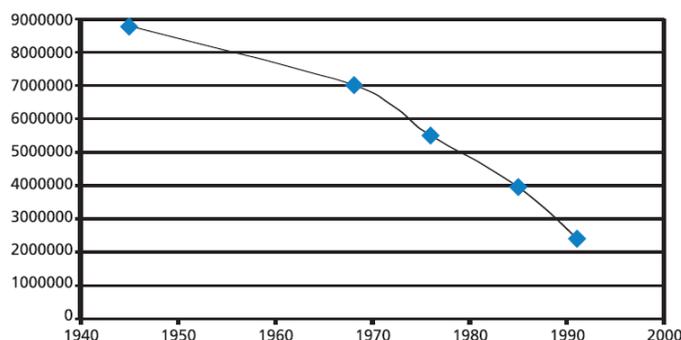


Figura 2.4 - Área arborizada no leste do Paraguai, em hectares.
Fonte: CORONEL e MENÉNDEZ, 2006

As principais culturas anuais na Bacia do Prata são soja, arroz, girassol, trigo e milho. O arroz representa o maior consumidor de água, uma vez que é cultivado pelo sistema de inundação. Este sistema de cultivo utiliza cerca de 15.000 m³/ha/ano, que representa o consumo doméstico de 800 pessoas. Atualmente, essa cultura se estende sobre o sul do Paraguai e do Brasil na bacia dos afluentes do rio Uruguai. No Brasil, na bacia do rio Ibicuí, um afluente do Uruguai, onde o arroz é produzido com irrigação, existe um conflito entre os agricultores de arroz e as cidades da região que precisam de água para o consumo doméstico.

Na Argentina, as áreas semeadas de cereais e oleaginosas aumentaram de 20 para 26 milhões de hectares na última década. Essa produção intensiva de cereais aumentou o risco de degradação do solo, na região. No entanto, a introdução do plantio direto de culturas está crescendo rapidamente, o que leva a uma restauração da área cultivável (CORONEL e MENÉNDEZ, 2006).

De acordo com Coronel e Menéndez (2006), a economia do Paraguai é altamente dependente da agricultura, onde 90% é relativo à produção de gado. No entanto, sua produção de grãos, vem aumentando como resultado de novas tecnologias. Nos Pampas, as pastagens estão sendo substituídas por cultivos, devido aos preços mais favoráveis em comparação com a pecuária. Na província de Buenos Aires as áreas de cultivo aumentaram 40% entre 1988 e 1993.

Schindwein et al. (2011), em um estudo realizado pelo projeto CLARIS-LPB na Argentina (Junin, Buenos Aires), relataram que a seca seria o evento climático mais importante que afeta a agricultura, de acordo com entrevistas específicas realizadas com os agricultores. Com base nesses resultados, um modelo de árvore de decisão baseado em equilíbrio hidrológico foi desenvolvido. Basicamente, o modelo calcula o risco de ter rendimentos muito baixos, baixos ou regulares, onde foi encontrada uma previsão muito bem observada de maus rendimentos em anos de secas. O passo seguinte foi usar essa árvore de decisão para estudar os possíveis impactos de cenários de mudanças climáticas sobre os rendimentos. Verificou-se que a única maneira de compensar o aumento da temperatura está em aumentar significativamente a precipitação com relação ao clima presente (que segundo os autores parece ser improvável).

No Uruguai, a maior vulnerabilidade climática de áreas de pastagens está associada à secas. As estimativas de períodos mais frequentes e intensos de secas, combinado com a intensificação da produção e da mudança para solos mais rasos, devido à expansão da agricultura, tornou o sistema de pastagem mais vulnerável. Essa vulnerabilidade é claramente manifestada durante as secas severas, através de perdas econômicas e grandes transtornos sociais (perda de empregos, o endividamento, falência e deslocamento dos produtores, especialmente os pequenos), particularmente nos setores de laticínios e produtores de gado.

O Ministério da Agricultura do Uruguai estimou uma perda econômica de 450 milhões de dólares devido à seca durante a primavera austral de 2008 e verão de 2009. A Associação Rural do Uruguai dobrou a estimativa levando em consideração a perda de peso no rebanho bovino nacional, e também relatou um total de 12.800 empregos perdidos devido ao impacto da seca.

Com base neste contexto Schindwein et al. (2011) afirmam que, o que é mais procurado em cenários de mudanças climáticas é o impacto sobre riscos climáticos associados com períodos de seca. Ou seja, espera-se que os cenários de mudanças climáticas gerem uma estimativa da frequência e da intensidade das secas, especialmente as secas plurianuais, que historicamente têm gerado impactos mais devastadores. Há várias ideias tomando conta do setor público para melhor preparar-se para a próxima seca. Atualmente, essas estratégias estão sendo enquadradas sob o entendimento conceitual que é uma manifestação da mudança climática. Sistemas de irrigação de grande porte, fundos de emergência devido à seca, seguros e outros mecanismos financeiros estão sendo exploradas pelo setor público. Um elemento fundamental e comum a todas estas ferramentas é uma avaliação correta do risco climático associado à secas.

2.2 Projeções climáticas

Para poder avaliar os possíveis impactos da mudança climática vê-se a necessidade de usar projeções do clima derivadas de modelos climáticos. Modelos climáticos globais acoplados oceano-atmosfera (MCGAOA - *Atmosphere-Ocean General Circulation Models* - AOGCMs) são as ferramentas de modelagem tradicionalmente utilizadas para gerar as projeções e cenários de mudanças climáticas. No entanto, a resolução horizontal atmosférica utilizada pelos AOGCMs é relativamente grosseira, cerca de 300 km, e o clima regional é frequentemente afetado por forças e circulações que ocorrem em escalas menores (GIORGI e MEARNs, 1991). Como resultado, os AOGCMs não podem capturar explicitamente a estrutura de pequena escala que caracteriza as variáveis climáticas em muitas regiões do mundo o que é

necessário para muitos estudos de avaliação de impacto. Portanto, diferentes técnicas de “regionalização” foram desenvolvidas para melhorar a informação regional fornecidas pelos AGCMs (*Atmospheric General Circulation Models*) e AOGCMs. Os primeiros estudos de impacto utilizaram informações de mudanças climáticas fornecidas pelas simulações dos AGCMs e AOGCM sem qualquer processamento de maior regionalização. Isto ocorreu principalmente devido à pronta disponibilidade da informação e ao desenvolvimento relativamente recente de técnicas de regionalização (MARENGO et al., 2011).

O *downscaling* usando modelos climáticos regionais (*Regional Climate Models* - RCMs) pode ser considerado como uma ferramenta extremamente útil para gerar cenários de mudanças climáticas em alta resolução para o uso em estudos de impactos climáticos e adaptação. O *downscaling* dinâmico se refere a um modelo RCM aninhado em um AOGCM. O AOGCM fornece condições iniciais e condições de contorno lateral meteorológicas para gerar simulações de alta resolução com o RCM, para determinados períodos de tempo (por exemplo, DICKINSON et al. 1989; GIORGI, 1990). Temperatura da superfície do mar (TSM), o gelo do mar, gases de efeito estufa e dos aerossóis, bem como as condições iniciais do solo, também são fornecidas pelo AOGCM.

O *downscaling* de cenários de mudanças climáticas segue a metodologia desenvolvida pelo Hadley Center (JONES et al. 2004).

A importância dos cenários climáticos de alta resolução para estudos de impactos e adaptação vem sendo explorada no Brasil e América do Sul. Cenários de alta resolução desenvolvidos a partir de resultados do modelo climático regional foram aplicados nas avaliações de impactos em várias partes do mundo, como América do Norte e Europa, no âmbito de projetos internacionais. Em alguns estudos, principalmente em matéria de agricultura e recursos hídricos, foram encontradas diferenças significativas nos impactos estimados com base em alta resolução espacial (MARENGO et al., 2011).

Chou et al. (2002) realizaram um dos primeiros experimentos com um modelo regional sazonal para a América do Sul, com um mês de integração contínua.

O modelo Regional Eta-CPTEC foi utilizado por Chou et al. (2005) para investigar a previsibilidade da precipitação em diferentes escalas de tempo - sazonal, mensal e semanal – sobre a América do Sul. As comparações entre as previsões do GCM do CPTEC e as previsões do Eta-CPTEC mostraram que o Eta forneceu melhoras consideráveis sobre o modelo global. A avaliação das previsões sazonais com o Eta-CPTEC mostrou que, em geral, o modelo produziu informações adicionais úteis sobre a climatologia.

Chou et al. (2011) avaliaram simulações climáticas sobre a América do Sul utilizando o Modelo Regional Eta forçado por quatro membros do modelo global HadCM3. Cada membro do modelo global tem uma sensibilidade climática diferente, e os quatro membros foram selecionados para preencher o intervalo de incertezas do conjunto. O Modelo Eta foi configurado com 40 km de resolução horizontal e 38 camadas na vertical. Nesse trabalho os autores concluíram que o modelo Eta reproduziu razoavelmente bem o “clima presente” (1961-1990), quando forçado pelo HadCM3.

Solman et al. (2013) realizaram um estudo sobre um conjunto de sete modelos climáticos regionais, na América do Sul forçados com reanálises do ERA Interim, para o período de 1990-2008 e concluíram que todos os modelos apresentaram uma boa distribuição espacial da precipitação e temperatura média no verão e inverno, assim como reproduziram bem os ciclos anuais ao longo de várias sub-regiões, no entanto, os modelos em geral subestimam a precipitação no inverno e superestimam a temperatura no verão, na LPB.

No trabalho realizado por Chou et al. (2014a), o modelo Eta foi utilizado com resolução de 20km, utilizando os modelos Globais HadGEM2-ES, BESM e MIROC5, como condição de contorno. Os autores encontraram que em geral as simulações com o modelo Eta reproduziram as características climatológicas de temperatura e precipitação ao longo das estações. As simulações apresentaram desvio negativo de temperatura ao longo do ano, enquanto a precipitação em geral foi subestimada durante o verão e superestimada no inverno, na região norte do Brasil. Alguns dos erros dessas

simulações são provenientes dos modelos Globais, no entanto, os autores destacam a importância de melhorar a parametrização de superfície e de convecção do modelo.

3. METODOLOGIA

Este trabalho está dividido em três etapas principais. A primeira é dedicada a avaliação do downscaling climático, utilizando o modelo Eta-10 km, para a LPB (configuração Controle). Na segunda etapa, os resultados do experimento com a inclusão das áreas alagadas são discutidos, juntamente com a análise do balanço hídrico na LPB, mostrando como as áreas inundáveis influenciam neste balanço, com base nas simulações para o clima presente (1961-1990). A terceira parte aborda a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na agricultura, utilizando as projeções do modelo Eta, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. A metodologia e dados utilizados em cada etapa deste trabalho serão descritos neste capítulo.

3.1 Etapa I - Downscaling Climático para a Região da Bacia do Prata

Nesta etapa o modelo Eta foi integrado para os períodos de 1960-2005, 2006-2040, 2040-2070, 2070-2099. Essas simulações foram realizadas para avaliar as mudanças climáticas na Bacia do Prata, com base na simulação realizada com o modelo climático regional Eta-10 km usando as condições iniciais e de contorno do modelo Eta-20 km (CHOU et al., 2014a,b) e do modelo HadGEM2-ES (UK Met Office Hadley Centre Global Environmental Model, versão 2, com as componentes do sistema terrestre (ES - Earth System)), com o cenário de emissão de CO₂ RCP 4.5 (THOMSON et al., 2011).

Uma breve descrição das principais características e configurações do modelo regional e do modelo global utilizado nas condições de contorno, assim como uma explanação sobre o cenário de emissão de CO₂ utilizado, é dada a seguir.

3.1.1 Modelo Eta

O modelo regional Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado (MESINGER et al., 1988) e utilizado operacionalmente no NCEP (BLACK, 1994). Desde 1997 é utilizado no CPTEC para previsão de tempo (Chou, 1996). Tal modelo vem sendo utilizado desde 2002 para simulações climáticas

sazonais, apresentando bons resultados (CHOU et al., 2005). Uma versão do modelo foi desenvolvida para estudos de mudanças climáticas (PESQUERO et al., 2009; CHOU et al., 2011; MARENGO et al., 2011), e em 2010 seus resultados fizeram parte da segunda comunicação nacional (MCT, 2010). Neste trabalho foi utilizada a versão desenvolvida para a terceira comunicação nacional (CHOU et al., 2014 a,b).

O esquema do cálculo de radiação de onda longa baseia-se no modelo de Fels e Schwarzkopf (1975), enquanto a radiação de onda curta segue o modelo de Lacis e Hansen (1974). Os dois esquemas são chamados a cada duas horas de integração. O esquema de convecção cumulus utilizado é o desenvolvido por Betts e Miller (1986). A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Zhao et al. (1997). O esquema de superfície utilizado é o Noah (EK et al., 2003).

A grade horizontal utilizada no modelo Eta é a grade E de Arakawa. A topografia é representada em forma de degraus discretos e a coordenada vertical é a coordenada η (MESINGER, 1984), definida como:

$$\eta = \left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \eta_{sfc}$$

onde, $\eta_{sfc} = \frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T}$, p é a pressão atmosférica e os índices sfc e T

referem-se a superfície e ao topo da atmosfera, respectivamente. O índice ref se refere a pressão em uma atmosfera de referência e Z_{sfc} é a altitude da superfície.

Devido à sua coordenada vertical, o modelo regional Eta é capaz de produzir resultados satisfatórios em regiões com orografia acentuada, como a Cordilheira dos Andes.

3.1.1.1 Configuração da simulação

A grade horizontal do modelo é a grade E de Arakawa, que configurada em uma resolução horizontal é de aproximadamente 10 km. Neste trabalho são utilizados 38 níveis na vertical. As condições iniciais e de contorno provenientes do modelo Eta-20 km variam a cada 6 horas (umidade específica, temperatura, pressão ao nível médio do mar e à superfície e vento horizontal), enquanto as condições provenientes do modelo HadGEM2-ES variam a cada dia (a Temperatura da Superfície do Mar – TSM foi interpolada linearmente, a partir de dados mensais) ou a cada 3 anos (CO₂). As condições de contorno inferiores de albedo são climatológicas. A água no solo segue o esquema Chen et al. (1997) que utiliza 4 camadas de solo, um mapa com 14 tipos de cobertura de superfície e 9 tipos de solo. O calendário do Eta foi alterado com o objetivo de sincronizar com o calendário do Modelo HadGEM2-ES e, conseqüentemente, sincronizar os ciclos sazonais dos modelos.

3.1.1.2 Parametrização de superfície

A cobertura vegetal e a umidade do solo têm grande influência sobre o comportamento da atmosfera nos baixos níveis e as condições físicas da superfície. Os fluxos de calor e energia à superfície são fontes para instabilidade convectiva, portanto, o bom entendimento e uma boa estimativa desses fluxos se fazem necessários para simulação de chuvas intensas.

Os modelos de superfície terrestre (Land Surface Models – LSMs) foram formulados para calcular a transferência de energia, de massa e de momento entre a atmosfera e o sistema solo-vegetação da superfície terrestre e para servirem de condição de contorno para os modelos atmosféricos, que são usados para previsão numérica de tempo ou simulação do clima, uma vez que os modelos requerem a determinação dos fluxos de momento, radiação, vapor de água e calor sensível, abaixo da camada limite da atmosfera.

3.1.1.2.1 Noah LSM

O esquema de superfície utilizado neste trabalho é o Noah (NCEP-OSU-Air Force-Office of Hydrology), que considera o solo dividido em 4 camadas de profundidade 10, 30, 60 cm e 1m. Os parâmetros fornecidos ao modelo são: tipo de vegetação; topografia; tipo de solo; porosidade de cada camada do solo; albedo e fração de vegetação verde. Os dados de entrada são radiação incidente, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa do ar e temperatura do ar a 2m (figura 3.1).

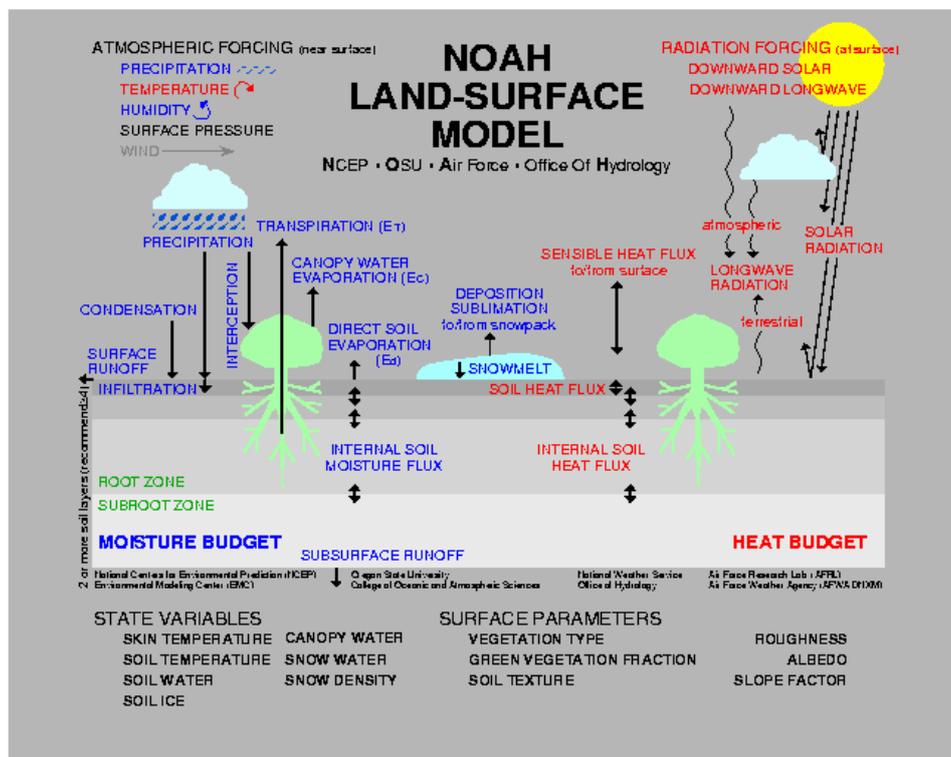


Figura 3.1 - Modelo solo superfície.

Fonte: <ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahlsm>.

As propriedades físicas da vegetação e do solo, e as propriedades morfológicas e fisiológicas da vegetação governam a interceptação da radiação e a transferência de umidade através do sistema solo-planta.

O mapa de vegetação utilizado atualmente no modelo Eta, possui resolução de 1°. Os tipos de cobertura provem do projeto PROVEG (Atualização da Representação da vegetação nos Modelos Numéricos do CPTEC), cujos dados

originam do projeto RADAMBRASIL e do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) (Projeto RADAMBRASIL, 1978; IBGE, 1992), com os tipos de cobertura apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tipos de cobertura de uso do solo.

0	Oceano
1	árvores latifoliadas perenes (floresta tropicais)
2	árvores latifoliadas decíduas
3	árvores latifoliadas/aciculadas (floresta mista)
4	árvores aciculadas (perenes)
5	árvores aciculadas (decíduas)
6	árvores latifoliadas com cobertura arbustiva/herbácea (savana)
7	gramíneas e herbáceas (perene)
8	arbustos latifoliados com cobertura herbácea perene
9	arbustos latifoliados com solo exposto
10	árvores anãs e arbustos com cobertura herbácea (tundra)
11	solo exposto
12	cultivos
13	Gelo
14	Áreas urbanas

Fonte: adaptado de Dorman e Sellers(1989).

Os parâmetros dependentes dos tipos de vegetação são: albedo, comprimento de rugosidade, percentagem de cobertura da vegetação, número de camadas do solo alcançadas por raízes de cima para baixo, resistência estomatal, parâmetro da resistência do dossel associada com a radiação, coeficiente usado no déficit da pressão de vapor e limiar da profundidade de neve por cima da qual a cobertura é 100 %.

De acordo com a resolução horizontal definida para a simulação (neste caso 10 km), o modelo de superfície possui uma rotina que determina o tipo de vegetação dominante em cada caixa de grade do modelo. A figura 3.2 mostra a distribuição espacial, dos tipos de vegetação considerados pelo modelo Eta, na resolução de 10 km, de acordo com a classificação proposta na tabela 3.1. Nessa figura é possível verificar que a savana (tipo 6) é o tipo de vegetação predominante na região do pantanal.

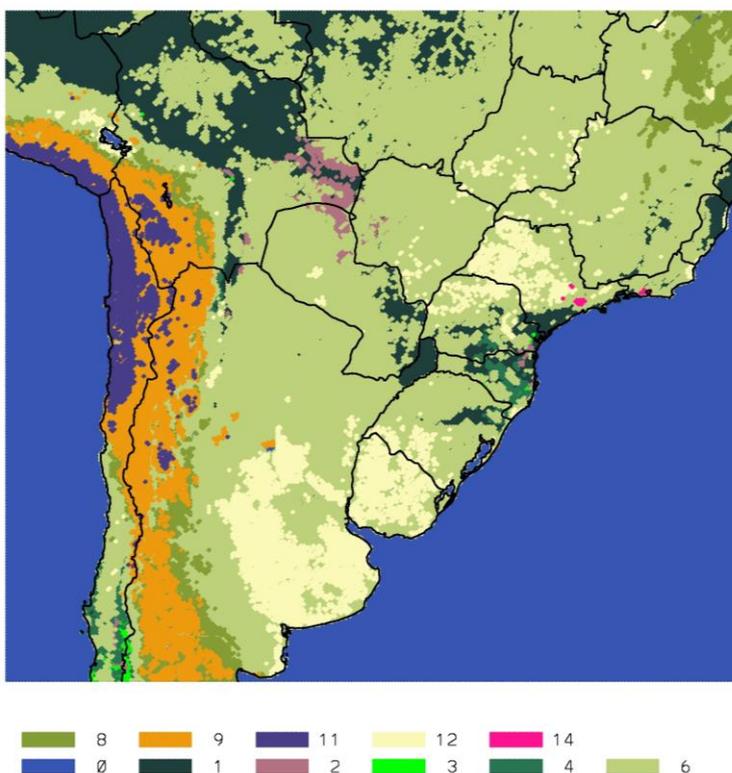


Figura 3.2 - Distribuição dos tipos de vegetação, na grade de 10 km do modelo Eta, para todo o domínio da simulação, de acordo com a classificação exposta na tabela 3.1.

3.1.2 HadGEM2-ES

O HadGEM2-ES (COLLINS et al., 2011) é composto de um modelo de circulação global da atmosfera (MCGA) com resolução horizontal N96 (aproximadamente 1.875°x1.250° de longitude por latitude) e 38 níveis verticais, e um modelo oceânico com uma resolução horizontal de 1 grau (aumentando para 1/3 de grau no equador) e 40 níveis verticais.

As componentes do sistema terrestre incluem ciclo do carbono terrestre e oceânico, e química da troposfera. A vegetação e o ciclo do carbono terrestre são representados pelo modelo de vegetação dinâmica global, TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics; COX, 2001).

A biologia e química do oceano são representadas pelo modelo Diat-HadOCC. A química da troposfera é representada pelo modelo UKCA (*United Kingdom Chemistry and Aerosol model*) e também inclui novas espécies de aerossóis (carbono orgânico e poeira).

O HadGEM2-ES utiliza-se de um calendário hipotético, no qual, cada ano possui 12 meses com 30 dias cada mês, ou seja, um calendário de 360 dias/ano. As variáveis utilizadas como condição inicial e de contorno para o modelo Eta-20 km são umidade específica, temperatura, pressão ao nível médio do mar e à superfície e vento horizontal.

3.1.3 Cenários de emissão de gases efeito estufa

As emissões futuras de gases de efeito estufa (GEE) são o produto de sistemas dinâmicos complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudança tecnológica. Cenários de emissão representam vários caminhos de desenvolvimento de como o futuro poderá se desdobrar. Esses cenários auxiliam nas análises de mudanças climáticas, incluindo modelagem do clima e avaliação de impactos, adaptação e mitigação. De acordo com o AR5 (IPCC, 2013), em relatórios anteriores (TAR e AR4), os cenários de emissões do SRES (*“Special Report on Emission Scenarios”* – IPCC, 2000) foram usados como a principal forma de explorar a incerteza da contribuição antropica no clima futuro. No entanto, pesquisas recentes têm feito uso de RCP's (*“Representative Concentration Pathways”* - RCP) (VAN VUUREN et al., 2011). RCP's são novos cenários que especificam concentrações e emissões correspondentes, mas não estão diretamente baseados na evolução sócio-econômica, como os cenários SRES. Os cenários de RCP são baseados em uma abordagem diferente e incluem gases de vida curta mais consistentes e mudanças de uso do solo. Eles não são, necessariamente, mais capazes de representar a evolução futura do que os cenários SRES.

Os quatro cenários RCP's são identificados pelo pico ou estabilização, no século 21, do valor da forçante radiativa (RF – *“Radiative Forcing”*). O cenário intermediário RCP 4.5 (THOMSON et al., 2011), assim definido devido a um pico da RF de 4.5 W m^{-2} em torno de 2100, quando então se estabiliza, foi o cenário de emissão escolhido neste trabalho. O modelo utiliza as concentrações de CO₂-equivalente do cenário RCP 4.5.

3.2 Etapa II – Influência das áreas alagáveis no Balanço Hídrico na LPB

Nesta etapa a influência das áreas alagáveis no balanço hídrico na LPB é analisada, com base em simulações utilizando o Modelo Eta, descrito em seção anterior. Para avaliar o impacto das áreas alagadas no clima da região, buscou-se representar as áreas alagadas e os processos de superfície associados a essas regiões, no modelo de Superfície Noah, que é utilizado no modelo Eta, no cálculo do balanço de energia e umidade através da interação solo-superfície.

3.2.1 Representação das áreas alagáveis

De acordo com Padovani (2010), as áreas inundadas possuem uma variação intra-anual, com seu ciclo iniciando geralmente em outubro, no entanto as áreas começam a ser detectadas somente no início do ano seguinte. Gradualmente as áreas se formam e são distribuídas por todo pantanal.

Com o intuito de representar as áreas alagadas, neste trabalho foi utilizado o mapa de frequência de inundação (figura 3.3) realizado por Padovani (2010), através de métodos de quantificação de água e extração de sazonalidade, aplicados numa série temporal de dez anos (2000 a 2009) das imagens MODIS13Q1.

As áreas com frequência de inundação igual a 100% (figura 3.3) foram inseridas no atual mapa de vegetação do modelo Eta, como um 15º tipo de vegetação chamado de áreas alagadas arborizadas, que foi acrescentado na tabela 3.1. Os parâmetros associados a esse tipo de vegetação foram retirados da tabela utilizada atualmente pela USGS.

Adicionalmente, as demais regiões alagadas (frequência menor que 100% e maior que 1%), foram adicionadas ao mapa de vegetação utilizado pelo Eta, nos períodos de abril a julho, pois foi o período com a maior porcentagem de área alagada, encontrado por Padovani (2010, figura 3.4), no ano de 2006. Embora as regiões alagadas tenham sua distribuição Norte-Sul variando ao longo deste período (Abril-Julho), neste trabalho considerou-se que, durante

esse período, toda a área do pantanal estivesse alagada, apenas para verificar o efeito da inundação no clima da região.

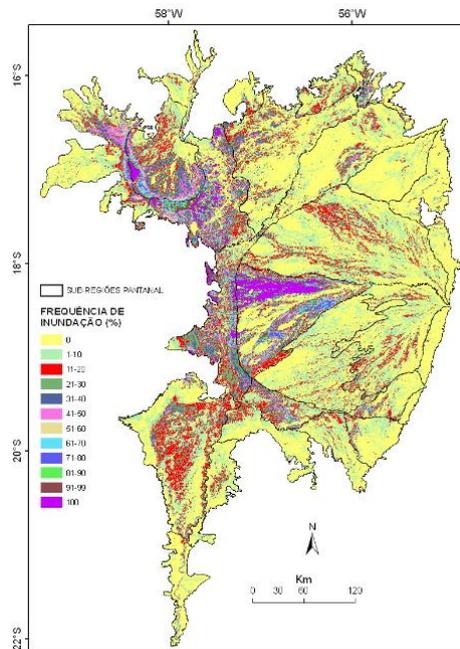


Figura 3.3 - Mapa de frequência de inundação do Pantanal e sub-regiões.
Fonte: Padovani (2010).

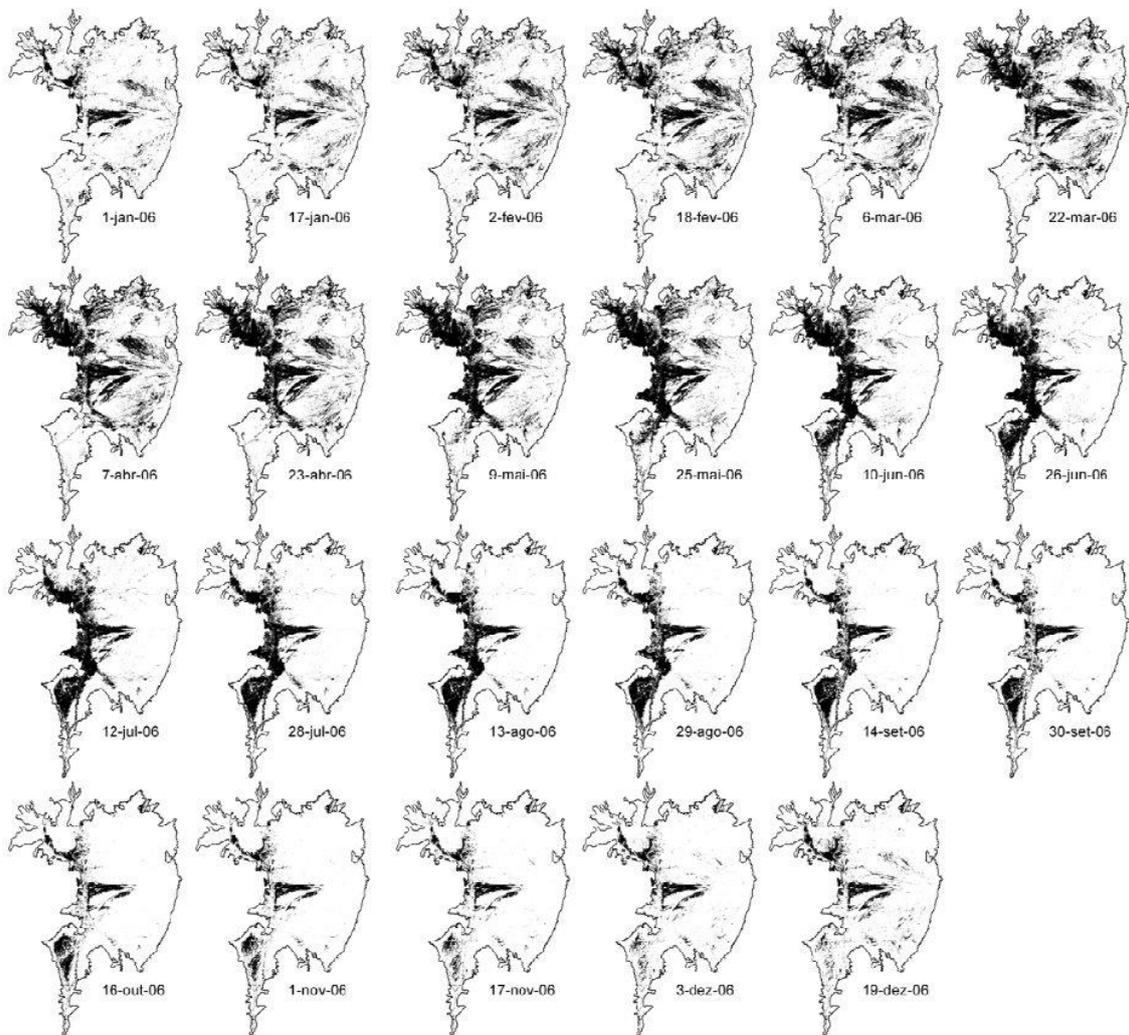


Figura 3.4 - Série temporal do mapeamento das áreas inundadas obtidas a partir do modelo de mistura espectral, para o ano 2006.

Fonte: Padovani (2010).

A figura 3.5 apresenta os mapas de vegetação utilizados neste experimento, com os tipos de vegetação agrupados para a grade de 10 km do modelo. Durante o período de agosto a março, nota-se uma pequena área com vegetação do tipo 15 (áreas alagadas arborizadas) e durante o período de abril a julho o modelo considera que praticamente toda a região do pantanal esteja alagada.

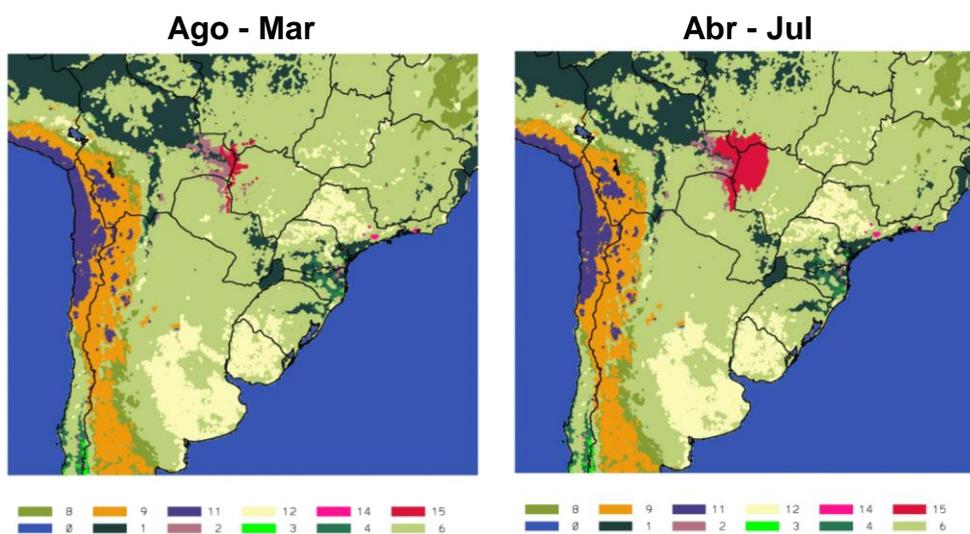


Figura 3.5 - Mapa de vegetação utilizados pelo modelo Eta, agrupados para a grade de 10 km. A figura da esquerda representa o período de agosto a março e a da direita o período de abril a julho.

Uma vez definido o período e a localização das áreas consideradas alagadas, os parâmetros apresentados na tabela 3.2 foram escolhidos para representar essa superfície, de acordo com a tabela utilizada atualmente pela USGS.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados pelo modelo Eta, para a classificação do tipo de vegetação número 15.

Fonte:USGS

Tipo de superfície	NROOT	RSM	RGL	HSTBL	SNUP	Z0	LAI
15 - áreas alagadas arborizadas	2	100	30	51.93	0.20	0.4	4

NROOT – número de camadas do solo ocupadas por raízes;

RSM – resistência estomatal;

RGL – valor limite da radiação de onda curta, utilizado na função de resistência do dossel;

HSTBL - parâmetro utilizado na função de resistência da pressão de vapor;

SNUP – profundidade da neve;

Z0 – rugosidade;

LAI – índice de área foliar.

3.2.2 Estudo do balanço hídrico

O fluxo e o balanço médio de umidade foram calculados para todas as simulações realizadas, com o objetivo de analisar a influência das áreas alagáveis na representação do clima na LPB.

Cálculo do fluxo médio de umidade integrada na vertical

O cálculo do transporte de umidade foi realizado utilizando a metodologia utilizada por Saulo et al. (2000):

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{pt}^{po} qvdp \quad (3.1)$$

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{pt}^{po} qudp \quad (3.2)$$

$$|Q_t| = \frac{1}{g} \int_{pt}^{po} qVdp \quad (3.3)$$

Onde na equação 3.1, Q_v é o fluxo de umidade meridional e v é a componente meridional do vento horizontal; na equação 3.2, Q_u é o fluxo de umidade zonal e u é a componente zonal do vento horizontal; na equação 3.3, Q_t é o fluxo de umidade total e V é a magnitude do vento horizontal. Nas três fórmulas acima g é a força gravitacional, q é a umidade específica e pt e po representam a pressão em 100 hPa e na superfície, respectivamente. A unidade obtida nas três fórmulas é $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$.

O fluxo de umidade nas bordas foi calculado a partir das seguintes equações:

$$Q_j = \int_{l_{a1}}^{l_{a0}} Q_i dy \quad (3.4)$$

$$Q_k = \int_{l_{o1}}^{l_{o0}} Q_i dx \quad (3.5)$$

Nas equações acima, a integração é feita fixando-se a latitude ou a longitude e entre os limites das bordas. Na equação 3.4, o índice j , define a longitude para fixar as bordas leste ou oeste (integração na direção y), l_{a1} é o valor da latitude na borda sul e l_{a0} é o valor da latitude na borda norte. Na equação 3.5, o índice k , define a latitude para fixar as bordas norte ou sul (integração na direção x), l_{o1} é o valor da longitude na borda oeste e l_{o0} é o valor da longitude na borda leste. Nas equações 3.4 e 3.5, o índice i define o fluxo de umidade meridional, zonal ou total já integrado verticalmente. A unidade obtida nas duas fórmulas é $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

A convergência do fluxo horizontal de umidade média sobre a área de estudo foi obtida a partir da soma das quatro componentes, entrando ou saindo, sobre cada lado de uma determinada área escolhida.

Cálculo do balanço de umidade médio integrado na vertical

O cálculo do balanço de umidade médio foi realizado de acordo com a metodologia utilizada por Marengo (2005), onde a equação do balanço de umidade é dada por:

$$\frac{ds}{dt} = P - E - R \quad (3.6)$$

Onde s é o total de água estocada no solo e atmosfera, R é o escoamento superficial, P é a precipitação e E é a evaporação. A parte atmosférica do balanço de umidade pode ser expressa por:

$$\frac{dw}{dt} = -P + E + C \quad (3.7)$$

Onde C é a integral vertical da convergência de umidade, o qual pode ser expresso como:

$$C = -\nabla \cdot Q \quad (3.8)$$

Sendo Q o fluxo de vapor de água definido como em Zeng (1999). dW/dt na equação (3.7) representa o termo da mudança do estoque de água e, em cálculos para o períodos maiores ou iguais a um mês, este termo pode ser desprezado (ZENG, 1999). Isso porque as mudanças na água precipitável atmosférica são muito pequenas em escalas de tempo sazonais (ZENG, 1999). Desta forma a equação fica como $P-E-C=0$.

3.3 Etapa III - Avaliação das implicações das mudanças climáticas na agricultura

A frequência e a magnitude de muitos eventos climáticos extremos têm aumentado nos últimos anos. Os impactos dos eventos extremos são frequentemente grandes localmente e podem afetar significativamente setores específicos e regiões. A agricultura tende a ser mais vulnerável aos extremos hidrológicos e de temperatura, já que este setor depende fortemente dos recursos naturais. O crescimento de culturas e a qualidade da produção podem ser relativamente mais sensíveis a eventos climáticos extremos de curta duração, tais como temperaturas muito elevadas, geadas severas, chuvas de granizo, e seca persistente, situações essas verdadeiramente temidas pelos agricultores.

Registros para o Rio Grande do sul, por exemplo, mostram que os eventos de enchentes e de secas prolongadas neste Estado estão relacionados, respectivamente, aos fenômenos de El Niño e de La Niña. Perdas de safra são observadas durante esses eventos. Pela estatística disponível para as últimas duas décadas, a cada dez safras, quatro foram afetadas por eventos de seca. Mesmo com um sistema de previsão em funcionamento, baseado em monitoramento das águas do Pacífico, grandes prejuízos ainda são observados nas áreas de produção (LIMA e ALVES, 2008).

A dimensão do dano que uma cultura sofre depende do estágio de desenvolvimento da cultura no momento em que se dá o evento extremo. Um

exemplo pode ser dado pela cultura de cereais, onde altas temperaturas imediatamente antes do período de florescimento reduzem o número de grãos formados, resultando em produções reduzidas (LIMA e ALVES, 2008).

Para quantificar o risco de eventos extremos e suas consequências para as culturas, estudos devem considerar atividades de modelagem de culturas. Nos modelos de grande escala os eventos extremos locais costumam ser mascarados, por isso há uma necessidade de se desenvolver modelos de eventos extremos específicos para cada cultura. Como a LPB apresenta uma grande diversidade de culturas, variando de acordo com a variação climática de cada região específica, neste trabalho será realizada apenas uma análise qualitativa das implicações das mudanças climáticas na agricultura, com base na vulnerabilidade aos eventos climáticos extremos.

Para analisar os possíveis impactos das mudanças climáticas na agricultura da LPB, com base nas simulações realizadas com o modelo Eta, será avaliado o comportamento dos eventos extremos em cenários futuros, visto que eventos de seca ou de chuvas intensas são os que mais causam danos a produtividade agrícola.

A análise dos eventos extremos será realizada através dos índices definidos por Frich et al. (2002). Tais índices calculam os extremos baseados em um período de referência. Neste trabalho foi considerado 1961-1990 como período de referência para os cálculos das anomalias (tabelas 3.3 e 3.4).

Tabela 3.3 - Índices de extremos de precipitação.

Índice	Descrição	Definição	Unidade
PRCPTOT	Precipitação total anual	Precipitação total anual nos dias onde $RR \geq 1$ mm	mm/dia
CDD	No. de dias consecutivos secos	Número máximo de dias consecutivos com $RR < 1$ mm	dias
CWD	No. de dias consecutivos úmidos	Número máximo de dias consecutivos com $RR \geq 1$ mm	dias
R95p	Dias muito úmidos	Precipitação anual total em que $RR >$ percentil 95	mm/dia

Onde RR é o total pluviométrico diário.

Tabela 3.4 - Índices de extremos de temperatura.

ID	Descrição	Definição	Unidade
TN10p	Noites Frias	Porcentagem de dias com Tmin < percentil 10	% de dias
TX90p	Dias Quentes	Porcentagem de dias com Tmax > percentil 90	% de dias
WSDI	Ondas de Calor	Número de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que TX > percentil 90	dias
CSDI	Ondas de Frio	Numero de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que TN < percentil 10	dias

Onde Tmin e TN representam a temperatura mínima diária; Tmax e TX representam a temperatura máxima diária.

A seleção dos índices foi baseada na consideração de que eles representam situações como ondas de calor e frio, assim como chuvas intensas e secas, que têm efeitos importantes sobre a agricultura.

4. RESULTADOS

Neste capítulo encontra-se uma discussão e conclusão dos resultados de cada etapa do trabalho separadamente. A conclusão final que engloba os assuntos abordados em cada uma das etapas é realizada no capítulo seguinte.

4.1 Etapa I - Downscaling Climático para a Região da Bacia do Prata

Os campos de precipitação e temperatura do ar simulados pelo modelo regional Eta são analisados, para os períodos de verão (DJF) e inverno (JJA). A análise do clima presente (1961-1990) será realizada com base no conjunto de dados do CRU, enquanto a análise do clima futuro (2011-2099) será realizada com base na diferença entre o clima futuro e as integrações do clima presente.

4.1.1 Análise do Clima presente (1961-1990)

4.1.1.1 Precipitação

A principal característica do regime de precipitação, na maior parte da América do Sul (AS), é o ciclo anual bem definido, com máximo no verão (DJF) e mínimo durante o inverno (JJA) (RAO e HADA, 1990). Este ciclo está associado à variação anual da circulação atmosférica sobre a AS e adjacências (SATYAMURTY et al. 1998; GRIMM et al., 2004), fortemente relacionada com o aquecimento solar sazonal. Climatologicamente a distribuição espacial e temporal simulada pelo modelo Eta está de acordo com o padrão encontrado na bibliografia e com os dados observados utilizados (Figura 4.1).

Na figura 4.1, nota-se que de forma geral, o modelo Eta captura bem a distribuição espacial da precipitação para o verão (DJF). No entanto, algumas diferenças são observadas entre o modelo e as observações. O modelo subestima a quantidade de chuvas ao longo da posição climatológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Essa imperfeição na representação da banda da ZCAS foi identificada em Solman et al. (2013) e Chou et al. (2014a). Este viés negativo pode estar relacionado à dificuldade de

representar, nos modelos atmosféricos, alguns componentes do ciclo hidrológico (cobertura vegetal, umidade do solo, fluxos de superfície) e a parametrização de convecção.

Apesar de superestimar a precipitação no inverno (JJA), de forma geral, o modelo tem um comportamento muito similar com as observações. Durante este período é possível observar a redução da precipitação sobre o Brasil Central e a permanência das chuvas sobre a região sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e sul do Chile, como resultado da atuação de sistemas frontais característicos desta época (OLIVEIRA, 1986; LEMOS e CALBETE, 1996).

Nos trabalhos de Solman et al. (2013) e Chou et al. (2014a) foi encontrado um viés negativo de precipitação, na porção norte da Argentina e sul do Brasil, no entanto, este viés não é encontrado nesta simulação com o Eta-10 km.

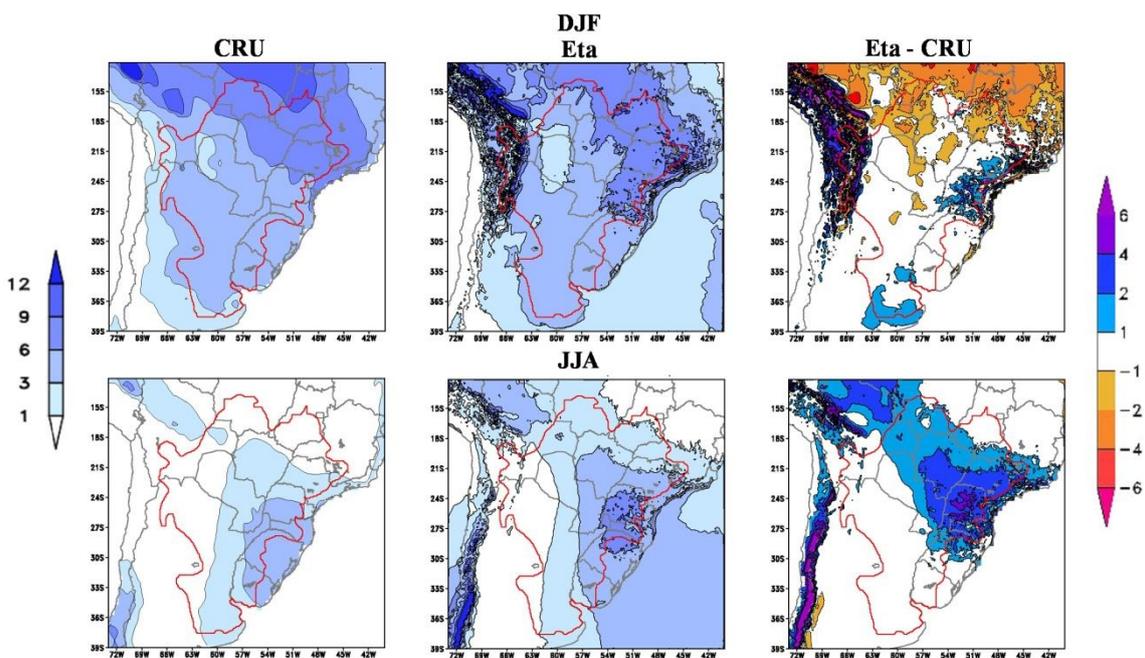


Figura 4.1 - Média sazonal da precipitação (mm/dia) para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (DJF) e inverno (JJA). Dados observados (CRU), simulados pelo modelo Eta e o viés da precipitação (mm/dia) derivado do modelo do Eta em relação aos dados do CRU.

A figura 4.2 mostra que há uma subestimativa da precipitação na LPB de até 1,5 mm/dia, no verão, enquanto no inverno há uma superestimativa do modelo Eta, de mesma magnitude. Em relação ao CRU nota-se que apesar de

apresentar um ciclo sazonal, com redução da precipitação no inverno, o modelo Eta não apresenta a mesma amplitude sazonal encontrada na observação.

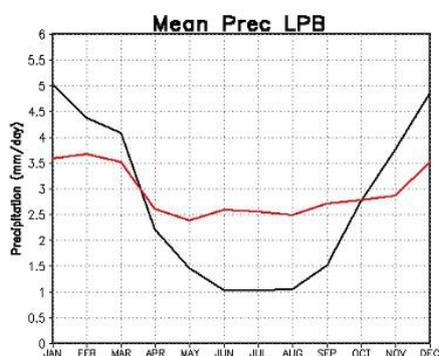


Figura 4.2 - Ciclo anual da precipitação (mm/dia) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). A linha preta representa os dados do CRU e a vermelha representa o modelo Eta-10km.

4.1.1.2 Temperatura

A figura 4.3 mostra os campos médios sazonais de temperatura. Em geral, o modelo representa bem o padrão espacial da temperatura. A temperatura varia sazonalmente de acordo com a incidência solar. Nas figuras dos dados do CRU e no campo simulado pelo modelo é possível observar a variação sazonal da temperatura, com maiores valores no verão (DJF) e temperaturas mais baixas no inverno (JJA). É possível também observar uma incursão de ar mais frio no sul da AS durante o inverno (JJA), que é o período em que a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul) está mais deslocada para norte, possibilitando um aumento na entrada de sistemas frontais nessa região.

Embora, exista uma grande concordância entre a temperatura simulada pelo Eta e o dado observado do CRU, o modelo tende a ter um alto viés negativo na costa oeste do domínio, onde se encontra a Cordilheira dos Andes, em ambas estações. Este resultado foi encontrado por diversos autores. Estes consideram que a avaliação deste viés deve ser estudada com cuidado, devido à escassez dos dados observados em regiões de topografia complexa (URRUTIA e VUILLE, 2009; SOLMAN et al., 2013b; CHOU et al., 2014a).

A superestimativa da temperatura na LPB, principalmente no verão, que é encontrada em Chou et al. (2011), Solman et al. (2013) e Chou et al. (2014a), não é observada nesta simulação, o que indica um ganho na simulação.

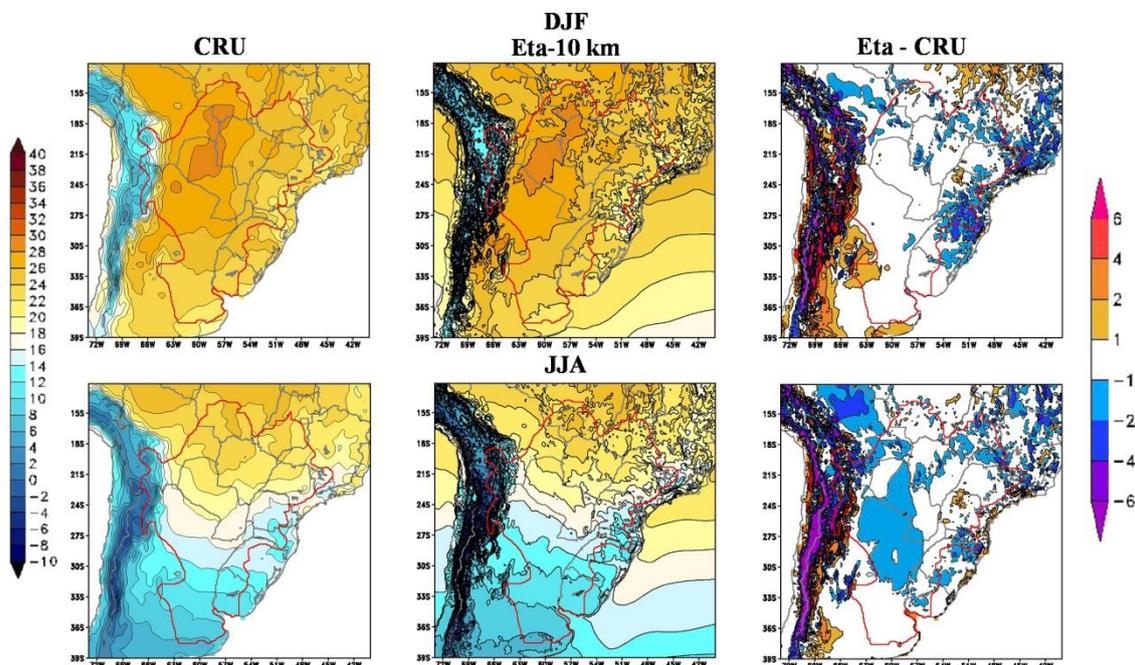


Figura 4.3 - Média sazonal da temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (DJF) e inverno (JJA). Dados observados (CRU), simulados pelo modelo Eta e o viés da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) derivado do modelo do Eta em relação aos dados do CRU.

A comparação do ciclo anual da temperatura simulada com a observada, indica que em média o modelo Eta superestima a temperatura no primeiro semestre do ano e subestima a partir de agosto na Bacia do Prata. De forma geral o modelo representa bem o ciclo anual da temperatura, assim como sua amplitude. A diferença entre a temperatura simulada e observada não ultrapassa 1°C (figura 4.4).

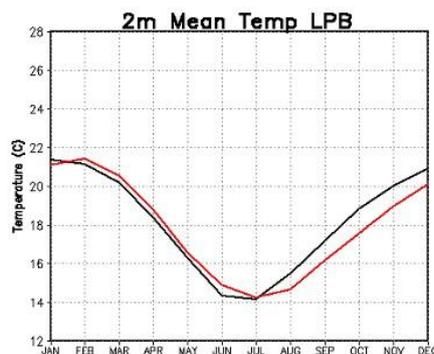


Figura 4.4 - Ciclo anual da Temperatura a 2m (°C) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). A linha preta representa os dados do CRU e a vermelha representa o modelo Eta-10km.

4.1.2 Projeções do clima futuro

4.1.2.1 Precipitação

A Figura 4.5 mostra a média da diferença da precipitação sazonal para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099 em relação ao período de 1961-1990 (esta diferença é chamada aqui de anomalia). Nesta figura, é possível observar que para o período de 2011-2040, há uma tendência de anomalia negativa em boa parte do continente, principalmente durante DJF. Esta anomalia negativa se estende sobre toda a região conhecida como região da ZCAS, desde o Atlântico na costa da Região Sudeste até a Região Centro Oeste, onde termina o domínio analisado. Esta redução da precipitação é observada também em JJA sobre parte da região Sudeste do Brasil, porém com menor magnitude. Para os períodos de 2041-2070 e 2071-2099, a tendência de anomalia negativa na região da ZCAS persiste durante o verão (DJF), no entanto, com menor intensidade. Nos períodos analisados observa-se uma tendência de aumento da precipitação na porção sul do domínio. Este aumento se concentra na Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul em DJF e apenas na Região Sul do Brasil em JJA.

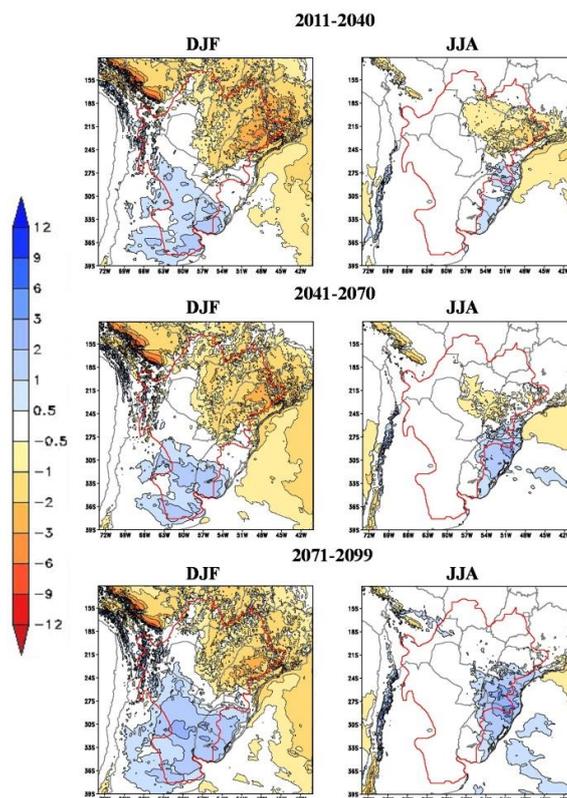


Figura 4.5 - Média sazonal da anomalia de precipitação (mm/dia), para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, em relação ao período de 1961-1990.

A média da precipitação na Bacia, para os três períodos analisados, mostra redução da precipitação, em relação ao clima presente (linha preta), de dezembro a março. No mês de junho a tendência é de aumento da precipitação no período de 2041-2099 (Figura 4.6). Nos demais meses o sinal médio não é muito claro, pois há compensação de áreas com viés negativo por áreas com aumento da precipitação dentro da Bacia.

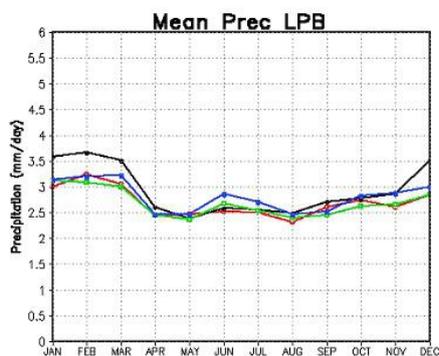


Figura 4.6 - Ciclo anual da precipitação (mm/dia) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). As linhas representam o clima presente (1961-1990 - preta) e os períodos de 2011-2040 (vermelha), 2041-2070 (verde) e 2071-2099 (azul).

4.1.2.2 Temperatura

As diferenças de temperatura para o clima futuro (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao clima presente (1961-1990) são apresentadas na figura 4.7, onde se observa um aumento da temperatura sobre todo o domínio em todas as estações do ano e períodos analisados. Os maiores valores de anomalia se localizam aproximadamente na faixa que vai de 10°S até 23°S de latitude, chegando a um aumento de temperatura da ordem de 3 °C em 2011-2040, 3,5 °C em 2041-2070 e 4 °C em 2071-2099.

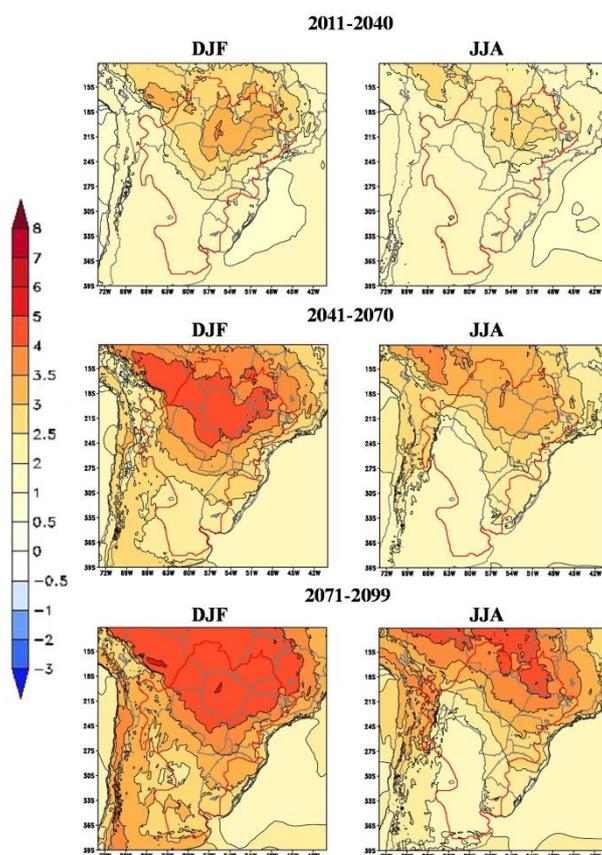


Figura 4.7 - Média sazonal da anomalia de Temperatura (°C), para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, referente ao período de 1961-1990.

A média mensal de temperatura na Bacia do Prata simulada pelo modelo Eta-10km indica a permanência de um ciclo anual bem definido, com temperaturas mais baixas nos meses de inverno. Para o período de 2011-2040 o modelo indica um aumento de até 2°C em relação ao clima presente, em 2041-2070 a tendência é de que haja um aumento de até 3°C, enquanto para 2071-2099 o modelo Eta indica um aumento médio de até 3,5°C (figura 4.8).

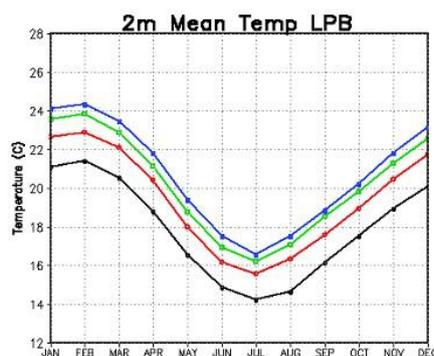


Figura 4.8 - Ciclo anual da temperatura (°C) na bacia do Prata (área verde representada pela figura 1.1). As linhas representam o clima presente (1961-1990 - preta) e os períodos de 2011-2040 (vermelha), 2041-2070 (verde) e 2071-2099 (azul).

4.1.3 Discussões e Conclusões

Nesta etapa foram avaliadas as simulações para o clima presente (1961-1990) e as projeções para o clima futuro (2011-2099), geradas pelo modelo Regional Eta, com resolução horizontal de 10km . As condições iniciais e de contorno utilizadas foram do Eta-20km e do Modelo Global HadGEM2-ES, com o cenário de emissão de CO₂ RCP 4.5.

Os resultados mostram que, climatologicamente, o modelo regional consegue representar o padrão espacial e temporal da precipitação e temperatura, para o período de 1961-1990. Todavia, regionalmente, há erros sistemáticos. O viés positivo de temperatura e negativo de precipitação, identificados em diversas simulações para a região (CHOU et al., 2011; CHOU et al., 2014a; SOLMAN et al., 2013 e LANGE et al., 2015), foram substancialmente reduzidos nesta simulação para a LPB. O domínio e a configuração escolhidos obtiveram resultados melhores, que aqueles encontrados com o Eta-20 km em Chou et al. (2014a), que foi utilizado como condição de contorno neste trabalho. Portanto, considera-se que a configuração utilizada é adequada para estudos de avaliação das mudanças climáticas na LPB

Na análise do clima futuro, as simulações mostram algumas mudanças, em relação ao clima presente, na intensidade de determinados sistemas meteorológicos. Uma tendência de anomalia negativa de precipitação foi detectada sobre a região da ZCAS, principalmente durante o período chuvoso,

o que indica o enfraquecimento da ZCAS. A partir de 2041 foi observada uma tendência de aumento da precipitação na Região Sul do Brasil e norte da Argentina.

Em relação à temperatura, a projeção do clima futuro se apresentou mais quente sobre todo domínio, com a diferença chegando a 3 °C em 2011-2040, 3,5 °C em 2041-2070 e 4 °C em 2071-2099, na faixa de aproximadamente 10-23°S de latitude.

Uma boa representação do clima presente e projeções climáticas detalhadas, com uma resolução espacial aumentando constantemente, podem fornecer informações úteis para estudos de impacto em vários setores socioeconômicos. Como a economia da LPB é fortemente baseada na produção agrícola, na seção 4.3 será realizada uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura na região.

4.2 Etapa II – Influência das áreas alagáveis no Balanço Hídrico na LPB

Nesta seção as simulações realizadas com o modelo Eta, são analisadas para o período de 1961-1990, com o objetivo de avaliar a influência das áreas alagáveis no balanço hídrico da Bacia do Prata. Nesta análise os campos gerados pela simulação com o modelo Eta, apresentada na seção anterior (chamada de simulação controle) serão utilizados para comparação com a simulação que inclui a representação das áreas alagadas (chamada de experimento).

O impacto do experimento é avaliado através dos fluxos e balanço de umidade, assim como dos fluxos de calor latente e sensível e através dos campos de temperatura e precipitação. A análise dessas variáveis é realizada para toda a LPB e para as quatro sub-regiões ilustradas na figura 4.9. A primeira abrange a sub-bacia do Paraguai, a segunda e terceira abrangem a sub-bacia do Paraná (Alto e Baixo Paraná) e a quarta corresponde a uma parte da sub-bacia do Uruguai.

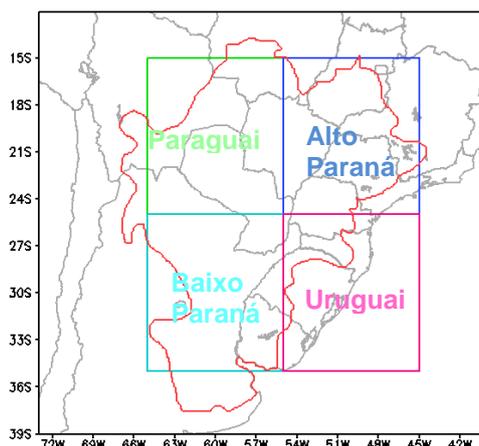


Figura 4.9 - Representação da LPB e das quatro regiões escolhidas para análise.

4.2.1 Análise do Fluxo de umidade

De acordo com Nicolini et al. (2004) o grande transporte de umidade dos trópicos para extratropicais modula a precipitação sobre a Bacia do Prata durante as primaveras e verões. A figura 4.10 representa o fluxo de umidade integrado na vertical (até 500hPa) da simulação controle, para os períodos de DJF, MAM, JJA e SON. Nessa figura é possível notar um saldo positivo entre os fluxos zonais e meridionais, na região representada pela sub-bacia do Paraguai, em todas as estações, sendo este saldo maior na primavera ($0,23\text{kg/ms}^{-1}$) e verão ($0,40\text{kg/ms}^{-1}$). Em todas as estações a maior contribuição de umidade que entra na região do Paraguai deriva da parte superior da caixa, que corresponde a umidade proveniente de latitudes tropicais. Este resultado está de acordo com Marengo et al. (2004), onde conclui-se que o transporte de umidade dos trópicos para os subtropicais é maior no verão, quando há grande disponibilidade de umidade na bacia Amazônica. O transporte dessa umidade para os subtropicais se dá principalmente pelo JBN (Jato de Baixos Níveis).

Grande parte da umidade do Paraguai é transportada para a sub-bacia do Paraná, sendo o Alto Paraná geralmente mais favorecido pelo fluxo zonal de oeste. Essa região também recebe durante o verão e outono fluxos de umidade provenientes da parede norte e leste da caixa. A componente zonal de umidade de leste, no verão chega a $0,83\text{kg/ms}^{-1}$ provavelmente favorecida pela

presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), cujo centro está posicionado em latitudes mais altas neste período. O saldo de umidade no Alto Paraná chega a $1,96\text{kg/ms}^{-1}$ no verão, que está relacionado aos maiores acumulados de precipitação devido a atuação da ZCAS (KODAMA, 1993).

A região correspondente ao Baixo Paraná recebe contribuição de umidade durante todo ano, da Bacia do Paraguai. O fluxo meridional, vindo de norte chega ao valor máximo de $1,18\text{kg/ms}^{-1}$ durante o verão, no entanto, nesse mesmo período há uma perda de 1kg/ms^{-1} de fluxo de umidade zonal, para a região oeste, o que gera um saldo negativo de umidade nesta área de $0,99\text{kg/ms}^{-1}$. No inverno o saldo negativo de umidade de $0,37\text{kg/ms}^{-1}$ está relacionado a perda de umidade para a Bacia do Uruguai, que é de $1,16\text{kg/ms}^{-1}$ neste período. No outono e primavera, o balanço de umidade nesta região é positivo ($0,31$ e $0,34\text{kg/ms}^{-1}$ respectivamente), pois a soma do fluxo de umidade de norte, proveniente da sub-bacia do Paraguai e o fluxo zonal de oeste é maior que a perda de umidade para a região ao Sul e a leste da caixa.

A caixa representativa de grande parte da sub-bacia do Uruguai possui um saldo negativo de umidade no verão e outono ($0,42$ e $0,10\text{kg/ms}^{-1}$, respectivamente). Apesar do fluxo zonal para leste da caixa e o meridional para sul serem relativamente baixos, essa região recebe pouca umidade da sub-bacia do Paraná nesses períodos. Em JJA o fluxo meridional de umidade proveniente do Alto Paraná e o fluxo zonal do Baixo Paraná aumentam, gerando um balanço positivo de $0,33\text{kg/ms}^{-1}$ de umidade, que está relacionado ao aumento da precipitação na região, associada a maior atuação de sistemas frontais, característicos deste período (OLIVEIRA, 1986; LEMOS e CALBETE, 1996).

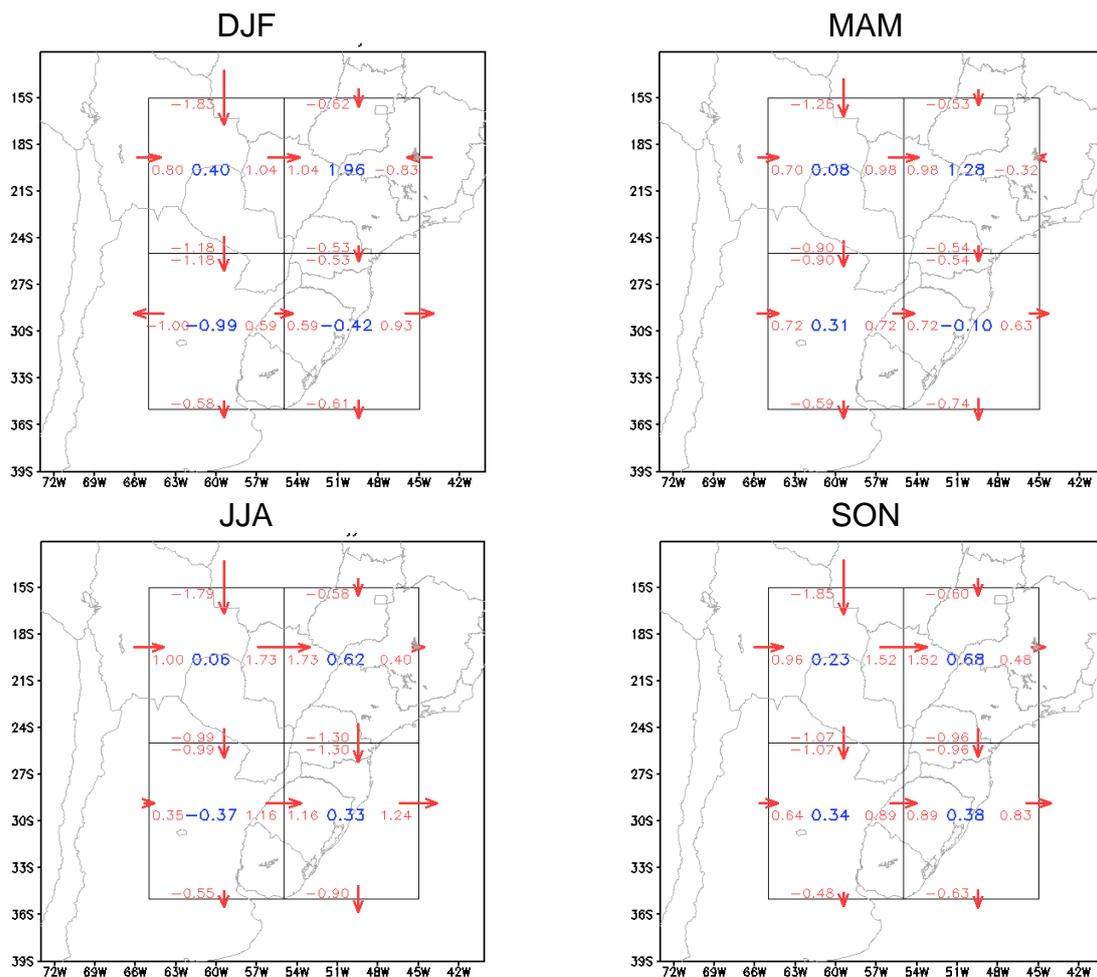


Figura 4.10 - Fluxos zonal e meridional de umidade (em vermelho) e saldo de umidade (em azul), média para os períodos de DJF, MAM, JJA e SON, da simulação controle (kg/ms^{-1}), para cada região representada na figura 4.9.

Os fluxos de umidade do experimento com a inclusão das áreas alagadas estão representados na figura 4.11. Nesta figura é possível verificar que houve uma redução dos fluxos e saldo de umidade, em relação a simulação controle, em praticamente todas as regiões e períodos.

Na região do Paraguai, que compreende a região do pantanal, onde as áreas alagadas foram incluídas no experimento, nota-se que houve uma redução do saldo de umidade, principalmente no verão onde o saldo de umidade que era de $0,40\text{kg/ms}^{-1}$ na simulação controle, passou a ser de $0,24\text{ kg/ms}^{-1}$ no experimento. Essa redução está fortemente relacionada ao fluxo meridional de umidade, pois no experimento o fluxo recebido na parede norte desta caixa diminuiu $0,17\text{ kg/ms}^{-1}$ em relação a simulação controle, ao passo que o

transporte de umidade para o Baixo Paraná aumentou de $1,18\text{kg/ms}^{-1}$ para $1,24\text{ kg/ms}^{-1}$ (figura 4.11).

Na região correspondente a sub-bacia do Uruguai o balanço das componentes zonal e meridional do fluxo de umidade é bem próximo ao encontrado na simulação controle, no entanto, nota-se que apesar de pequena, a influência dos processos de superfície na região do pantanal, também geraram impacto nesta região.

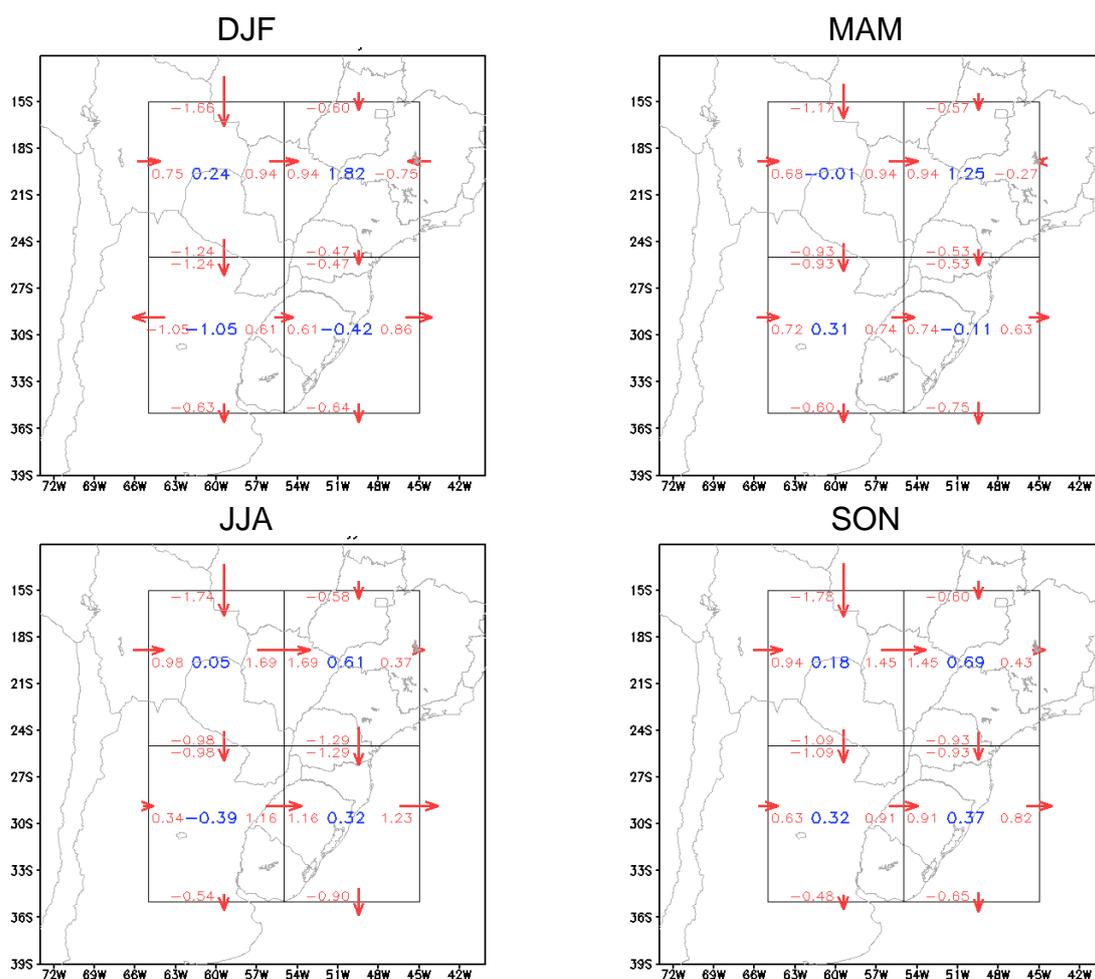


Figura 4.11 - Fluxos zonal e meridional de umidade (em vermelho) e saldo de umidade (em azul), média para os períodos de DJF, MAM, JJA e SON, do experimento com a inclusão das áreas alagadas (kg/ms^{-1}), para cada região representada na figura 4.9.

4.2.2 Análise do Balanço de umidade

Os termos do balanço de umidade simulados pelo modelo, em geral foram reduzidos na simulação com a inclusão das áreas alagadas, nas quatro regiões

analisadas (figura 4.12). A redução da precipitação, evaporação e convergência de umidade contribuíram para a redução do termo de não balanço (P-E-C).

De acordo com a figura 4.12, os maiores valores de precipitação simulado pelo modelo Eta, estão concentrados no verão (DJF), na região do Alto Paraná (6,29 mm/dia - experimento e 7,07mm/dia – simulação controle), o que está relacionado ao período chuvoso da região, devido a maior atuação da ZCAS. Conseqüentemente, nessa região encontram-se os maiores valores de evaporação e convergência de umidade. Nesse período foi identificada uma redução do termo P-E-C de -2,17mm/dia para -1,96mm/dia, no experimento com a inclusão das áreas.

Em JJA na sub-bacia do Paraguai o termo de convergência de umidade simulado pelo modelo é maior que nos demais períodos. O baixo índice pluviométrico, característico desse período, somado ao grande volume do termo de convergência de umidade contribui para o elevado valor do termo P-E-C, encontrado nessa região. Em contrapartida, na região da sub-bacia do Uruguai são encontrados altos valores de precipitação, relacionados à maior frequência de sistemas frontais, que influenciam o acumulado de precipitação da região.

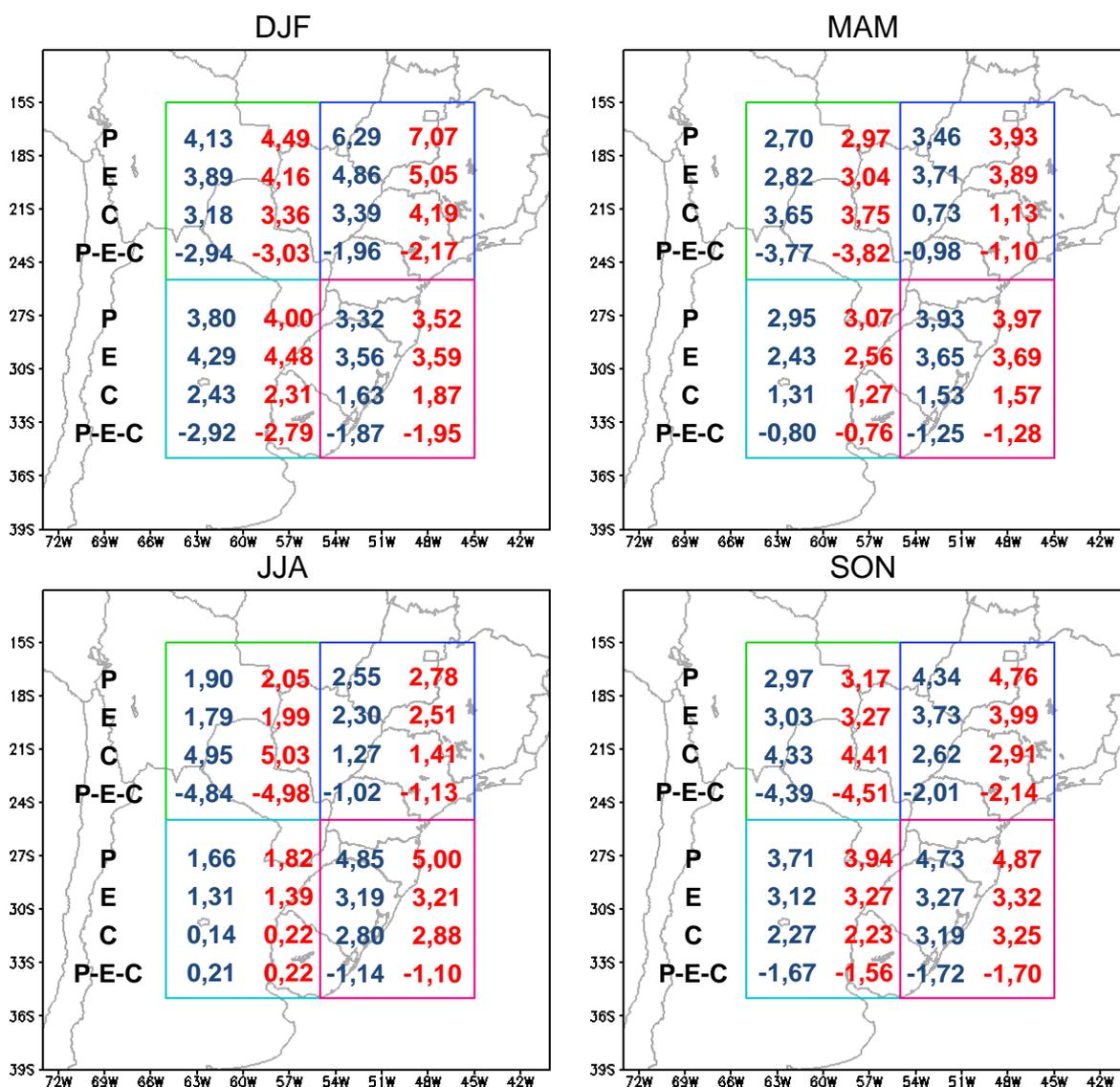


Figura 4.12 - Balanço médio de umidade (mm/dia) para o período de 1961-1990, simulado pelo modelo Eta. Em vermelho a simulação controle e em azul o experimento com as áreas alagadas.

4.2.3 Análise da Precipitação

A figura 4.13 mostra uma redução da precipitação em relação à simulação controle, principalmente durante o período chuvoso. A diferença encontrada nesse campo não se limita a área do pantanal, o que significa que a perturbação realizada no esquema de superfície, possui influência sobre o regime de precipitação de todo domínio.

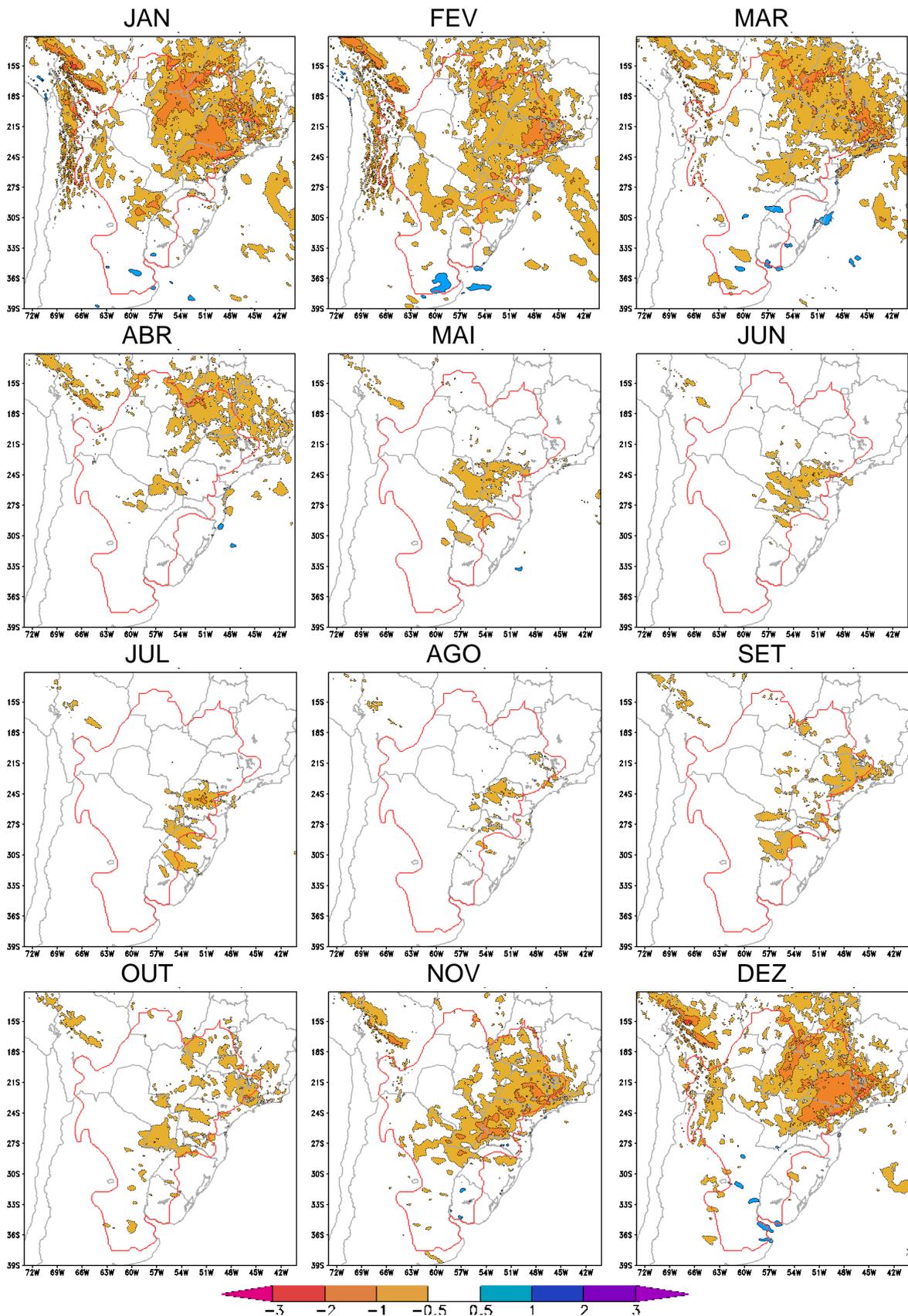


Figura 4.13 - Diferença da média mensal da precipitação (mm/dia) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.

Ciclo anual

A análise do ciclo anual da precipitação média nas quatro áreas representativas (figura 4.14) indica maiores valores de precipitação nos meses de verão, na região definida como Alto Paraná, além disso, a amplitude da chuva nesta região é maior. Enquanto na região do Uruguai, a chuva é menor e distribuída ao longo do ano. Esse padrão é encontrado nos dados do CRU e em ambas as simulações com o modelo Eta.

Em relação às diferenças encontradas entre a simulação controle e o experimento, pode-se notar uma redução da precipitação em todas as regiões, em praticamente todos os meses da simulação realizada com a inclusão das áreas alagadas. Essa redução foi maior nos meses de verão, na região do alto Paraná. Em comparação com os dados do CRU, a redução da chuva no período de verão significa um aumento no viés do experimento em relação à simulação controle, onde o viés possui um sinal negativo nos meses de maior precipitação, no entanto, a redução da precipitação no inverno, torna o experimento ligeiramente melhor que a simulação controle (que superestima a precipitação durante o inverno).

Em média, a diferença entre as simulações não chega a 1mm/dia por mês, no entanto, essas figuras mostram que apesar da mudança ter sido realizada somente na área representada pela sub-bacia do Paraguai, os efeitos na precipitação foram encontrados em todas as regiões analisadas.

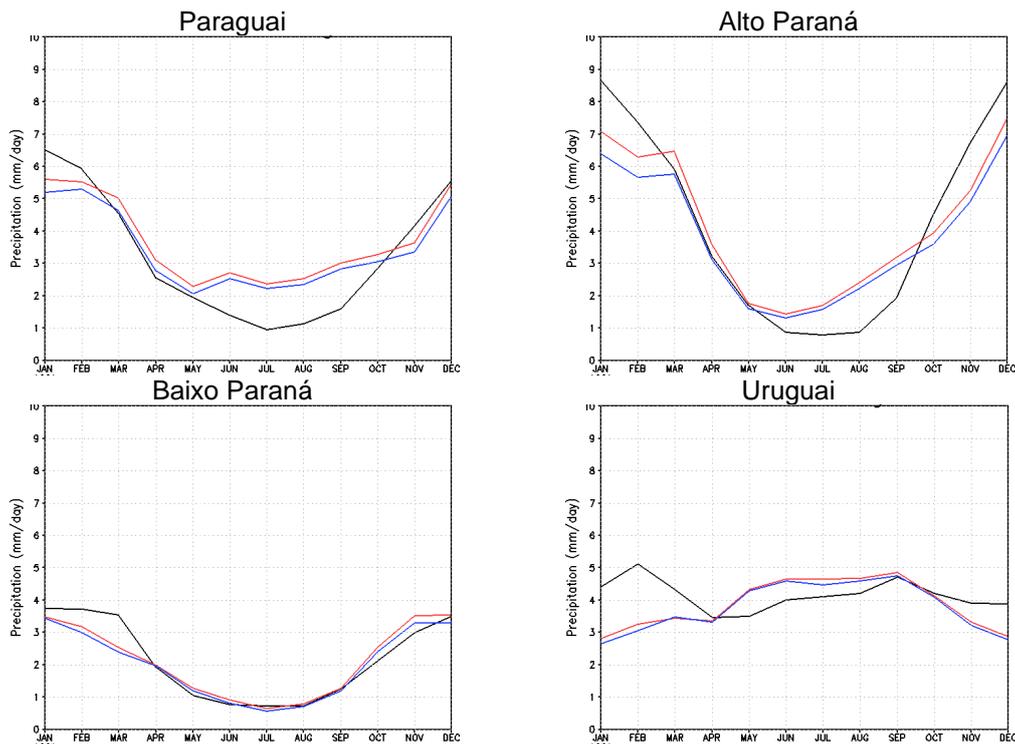


Figura 4.14 - Ciclo anual de precipitação, média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.

Evolução temporal

A figura 4.15 apresenta a média da precipitação nos períodos de verão e inverno, para 30 anos de simulação (1961-1990). Nessa figura, nota-se a variação sazonal da precipitação, com maiores valores no verão e menores no inverno, nas regiões do Paraguai, Alto e Baixo Paraná, enquanto no Uruguai a precipitação média praticamente não varia entre as duas estações.

Em relação às simulações, o modelo Eta apresenta uma boa correlação com os dados do CRU na região do Baixo Paraná. Para as demais regiões predomina uma subestimativa da precipitação no verão e superestimativa no inverno. As diferenças entre as simulações ultrapassa 1 mm/dia em alguns anos, sendo maiores no verão nas regiões do Paraguai e Alto Paraná. Em média o experimento possui valores menores de precipitação em todas as regiões e estações, em relação à simulação controle. No entanto, em todas as regiões é observado um aumento da precipitação do experimento em relação à

simulação controle, nas duas estações analisadas em todas as regiões no final do período de 30 anos.

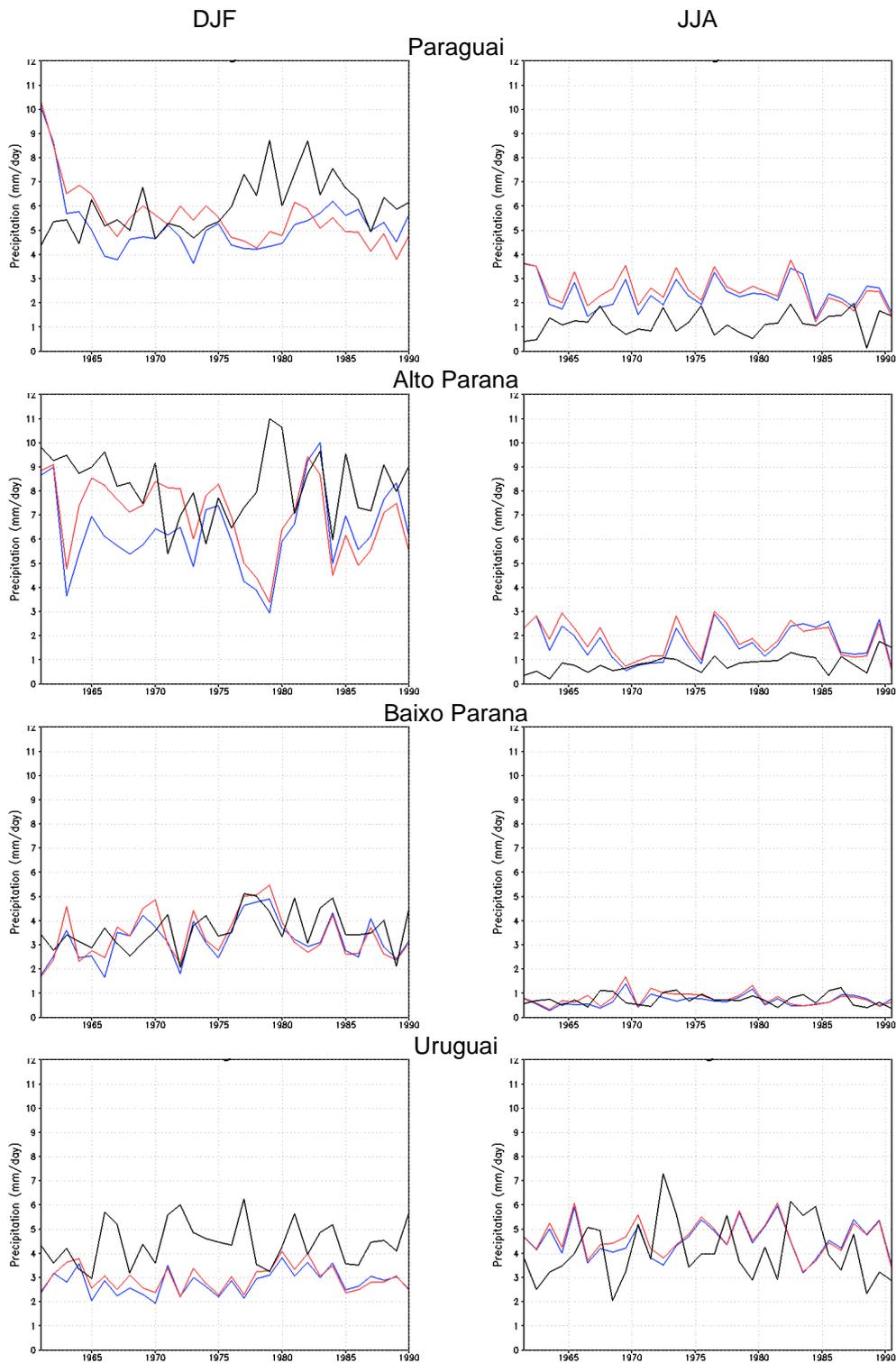


Figura 4.15 - Evolução temporal da precipitação média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.

4.2.4 Análise da Temperatura

A figura 4.16 mostra que embora em pequena magnitude, a diferença de temperatura mais significativa (em torno de 1°C) ocorre na região representada neste trabalho pelas áreas alagadas. Em relação à simulação controle o experimento apresenta temperaturas ligeiramente mais altas, no Mato Grosso do Sul, Goiás, oeste de São Paulo e parte do Paraguai, nos meses de novembro a março. Esse aumento, em menor magnitude também é encontrado nos meses de abril a outubro, estando limitado a região onde as áreas alagadas foram representadas.

Apesar das diferenças entre experimento e simulação controle serem mais evidentes nas regiões próximas ao pantanal, nesse experimento foi possível encontrar efeitos na temperatura na costa leste do Chile, que se encontra mais fria em relação à simulação controle, em todos os meses analisados. Esta redução da temperatura também foi encontrada em boa parte da Argentina nos meses de inverno (JJA), no entanto, a redução não ultrapassa 0,5°C.

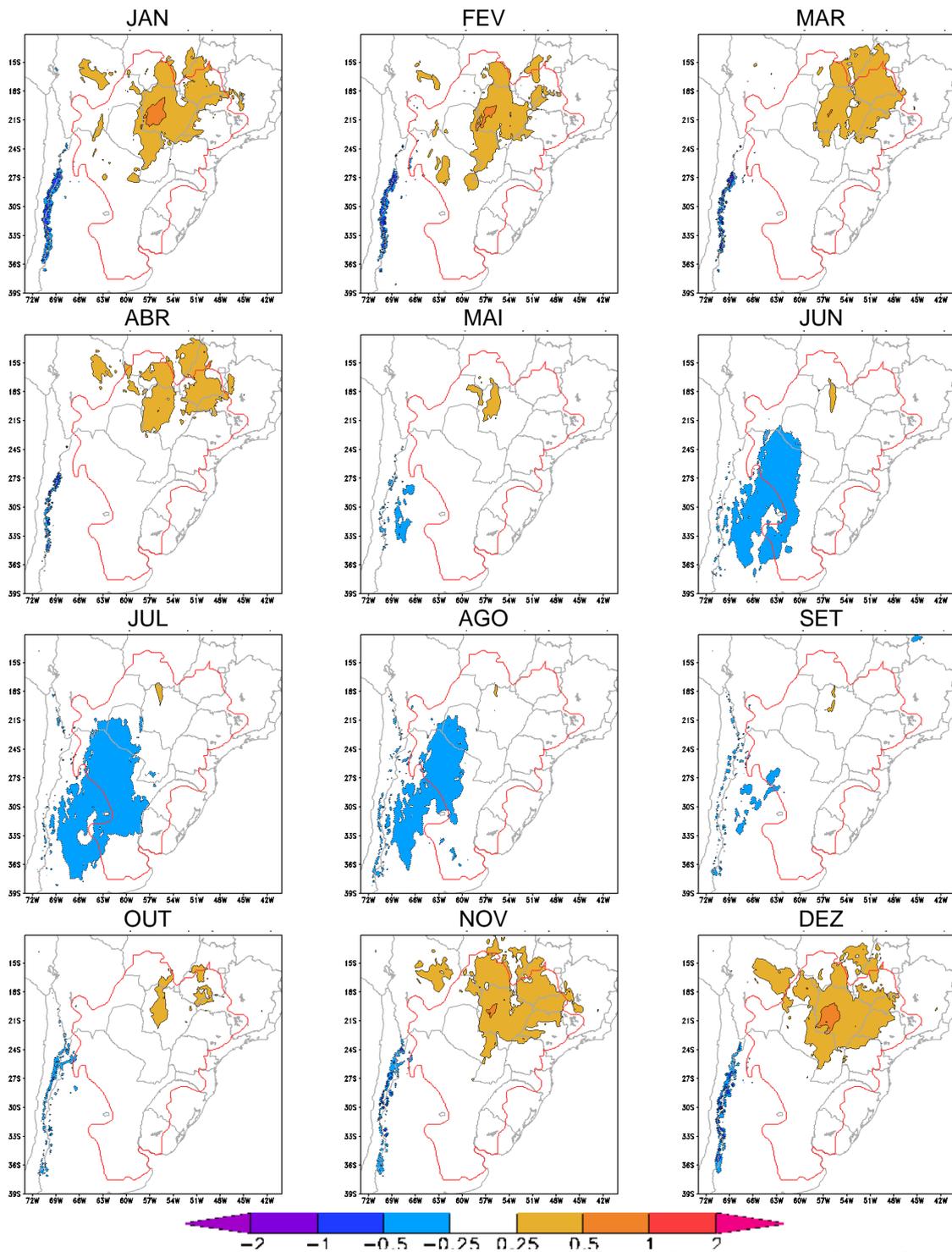


Figura 4.16 - Diferença da média mensal da temperatura próxima a superfície (°C) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.

Ciclo anual

A média mensal da temperatura, para as regiões escolhidas, mostra que os valores médios mensais simulados no experimento são semelhantes às

temperaturas da simulação controle, inclusive com uma boa representação do ciclo anual de temperatura para as quatro regiões (figura 4.17).

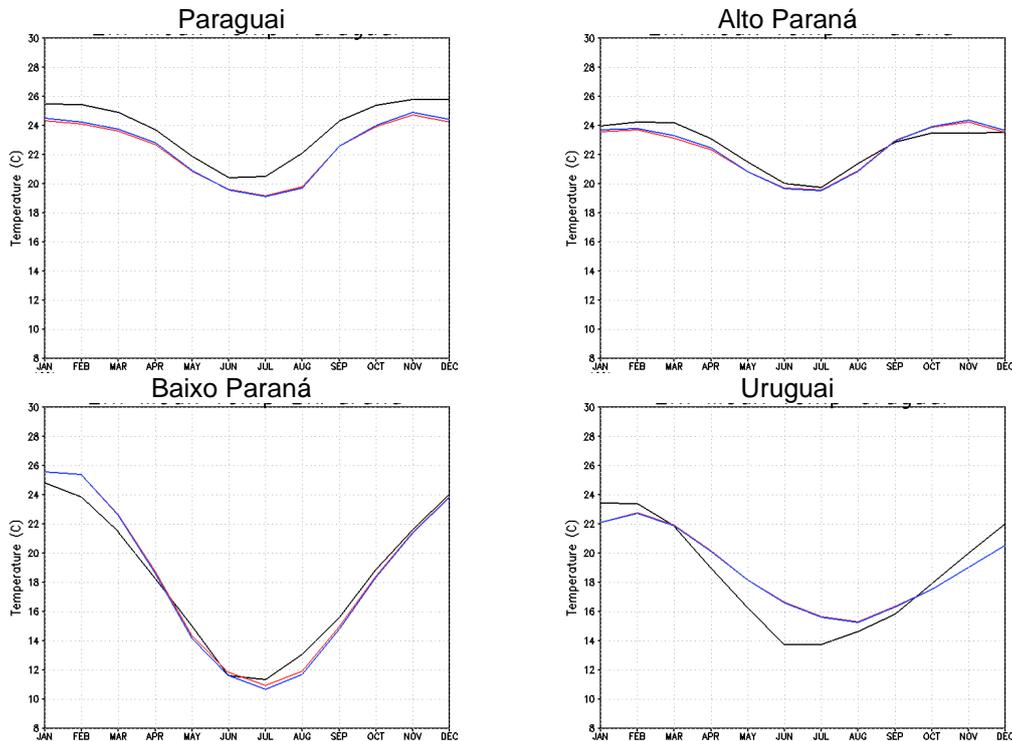


Figura 4.17 - Ciclo anual de temperatura próximo a superfície, média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.

Evolução temporal

Na média sazonal para cada ano desde 1961 (figura 4.18) é possível notar pequenas diferenças entre a temperatura do experimento e da simulação controle. Especialmente no verão, nas regiões do Paraguai e Alto Paraná, as diferenças são ligeiramente maiores. Nessas regiões nota-se um aumento da temperatura do experimento, nos meses de verão até o início da década de 80, quando a temperatura do experimento passa a ser um pouco mais fria que a simulação controle.

No Baixo Paraná, a diferença mais clara está no inverno, onde o experimento tende a ser mais frio que a simulação controle em grande parte do período. Nos últimos anos do período analisado, o sinal se inverte novamente e o experimento passa a ser mais quente que a simulação controle.

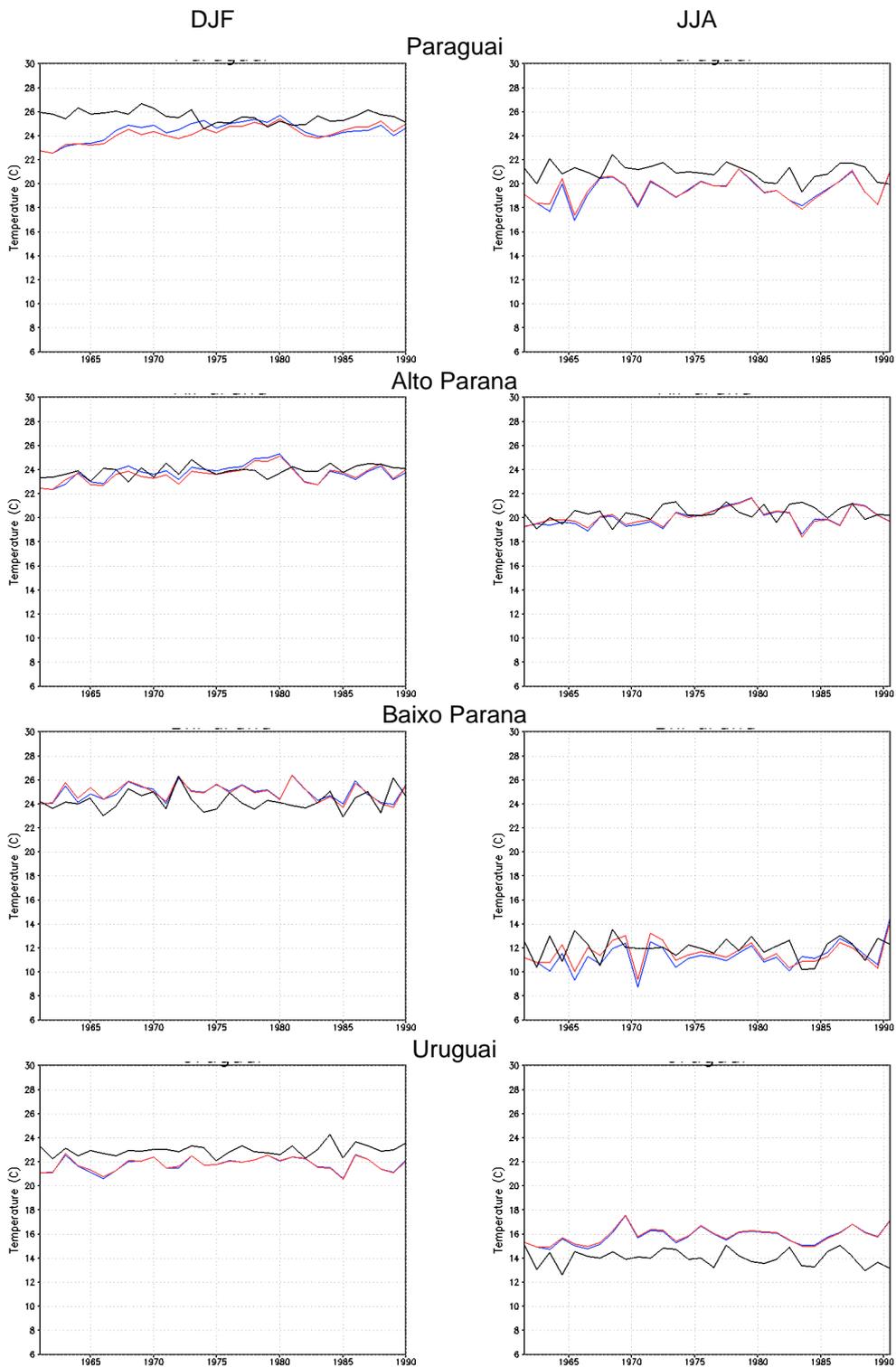


Figura 4.18 - Evolução temporal da temperatura próxima à superfície, média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha preta representa os dados do CRU, a azul o experimento e a vermelha a simulação controle.

4.2.5 Análise dos Fluxos de Calor Latente e Sensível

O fluxo de calor latente do experimento com a inclusão das áreas alagadas é menor, em relação à simulação controle (figura 4.19). De abril a julho, as maiores diferenças estão concentradas no pantanal.

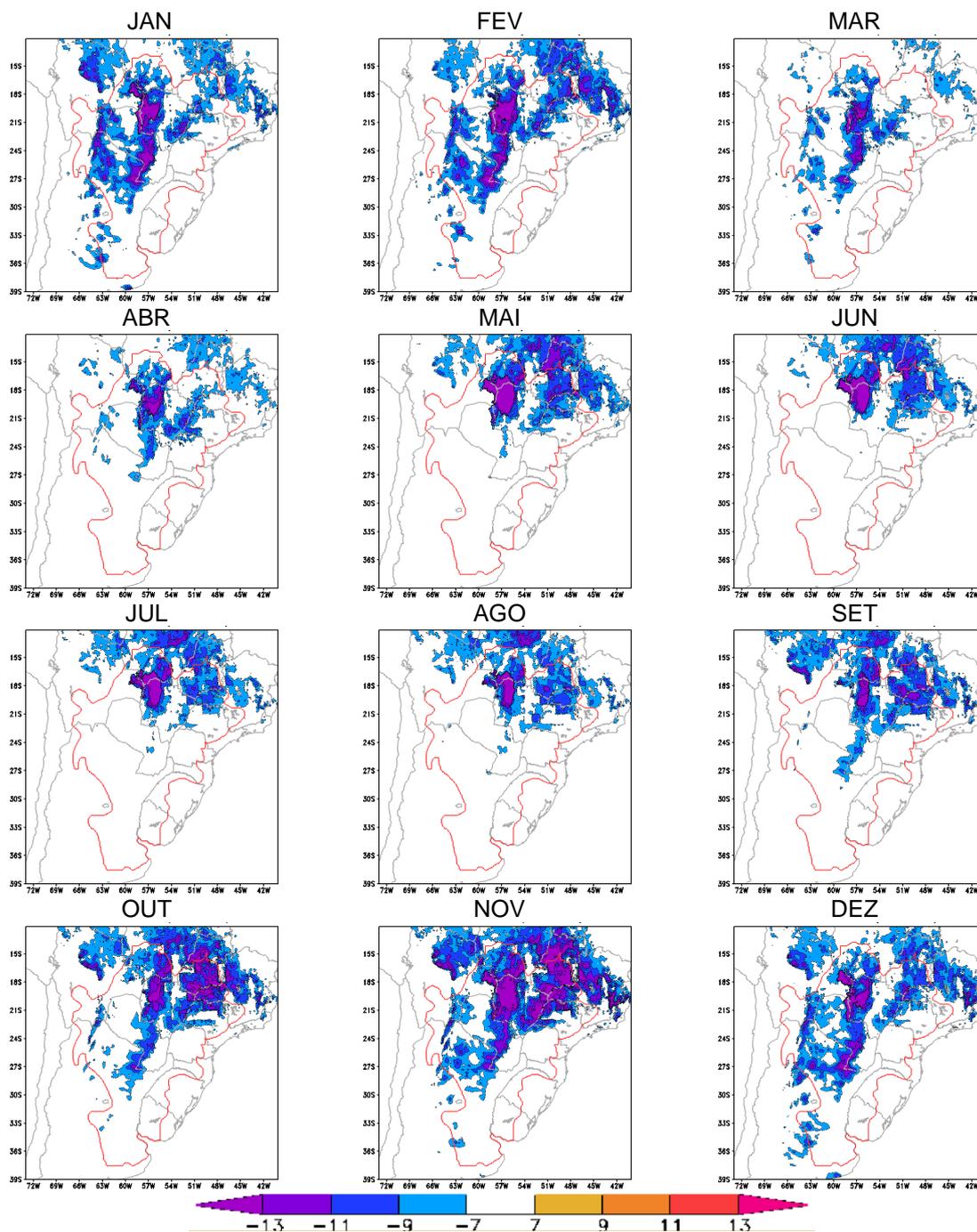


Figura 4.19 - Diferença da média mensal do fluxo de calor latente (W/m^2) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.

O fluxo de calor sensível se apresenta maior no experimento com a inclusão das áreas alagadas, do que o fluxo da simulação controle (figura 4.20). Conforme a área alagada aumenta no experimento (a partir de abril) as regiões com diferença entre as simulações aumentam. As maiores diferenças encontradas nessa variável estão concentradas na região do pantanal.

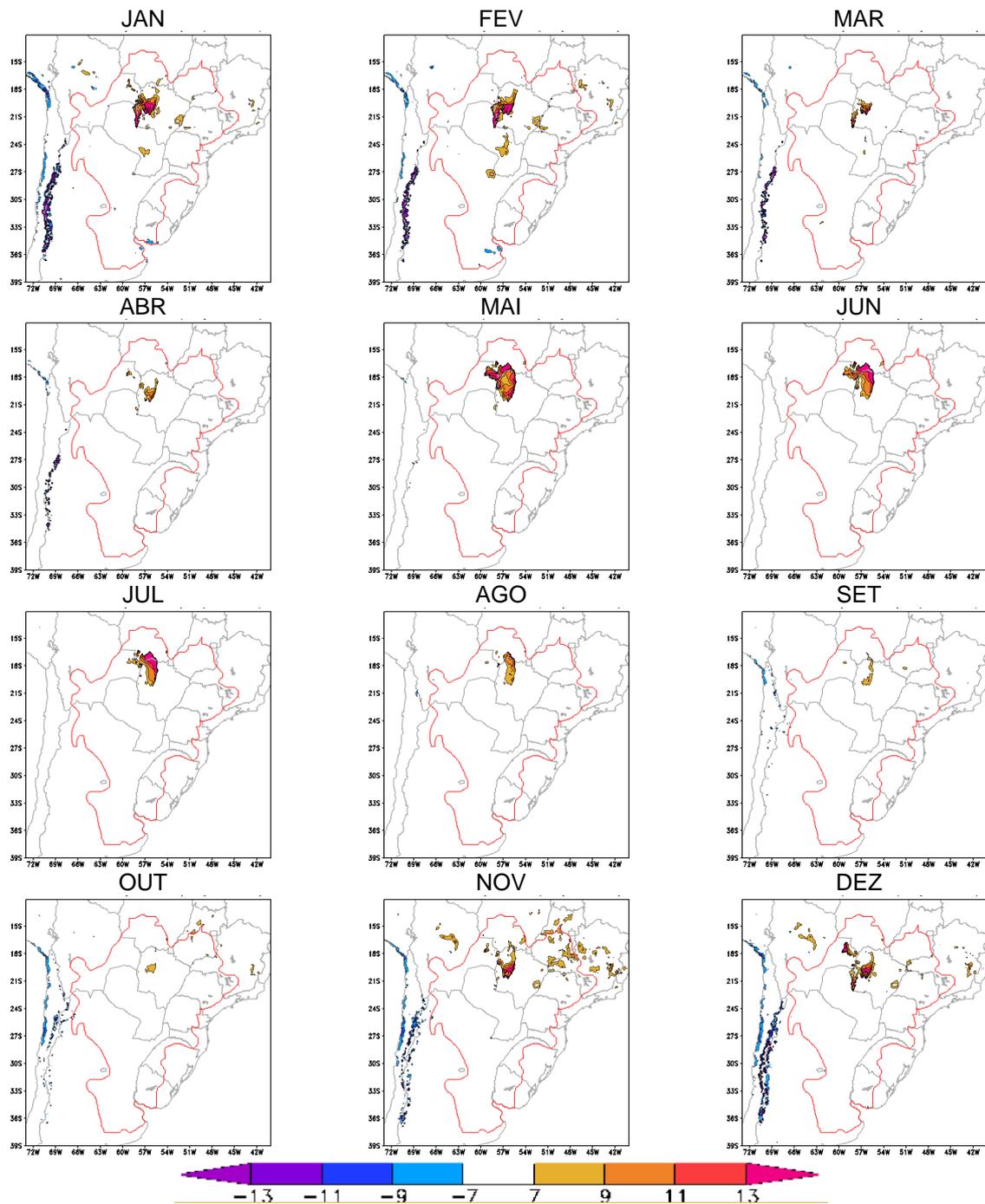


Figura 4.20 - Diferença da média mensal do fluxo de calor sensível (W/m^2) do experimento em relação à simulação controle, para o período de 1961-1990.

Ciclo anual

A figura 4.21 mostra o ciclo anual dos fluxos de calor latente e sensível simulados pelo modelo Eta, durante o período de 1961-1990. Nesta figura é possível notar que a magnitude do fluxo de calor sensível é praticamente a mesma entre as duas simulações. As maiores diferenças encontradas, nas regiões analisadas, se encontram nas regiões do Paraguai e Alto Paraná, onde o fluxo de calor latente do experimento se mostra inferior ao da simulação controle, em torno de 10 W/m^2 .

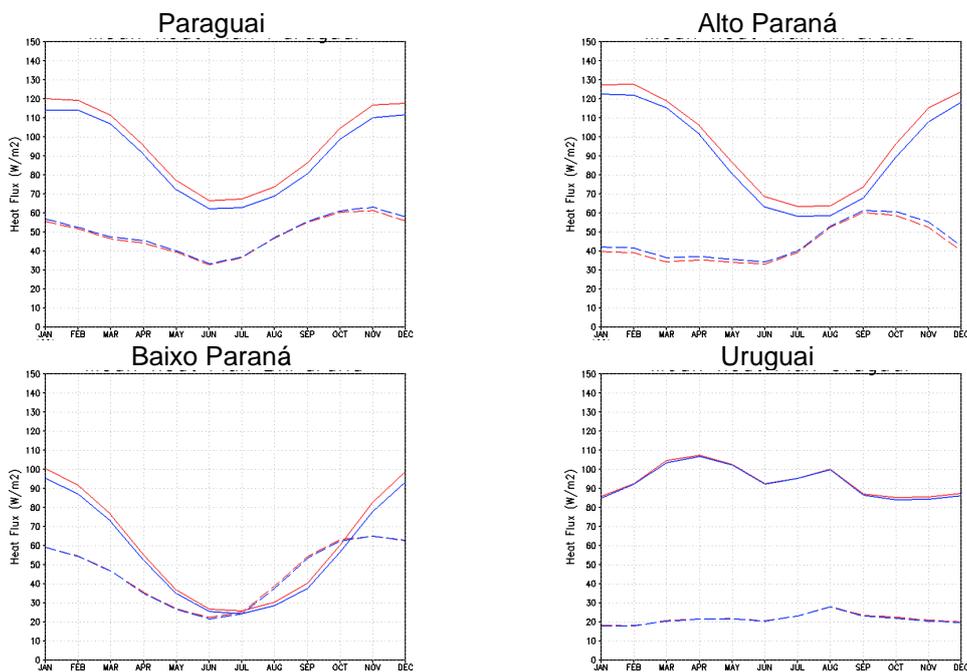


Figura 4.21 - Ciclo anual dos fluxos de calor latente (linha cheia) e sensível (linha pontilhada), média para o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha azul representa o experimento e a vermelha a simulação controle.

Evolução temporal

A figura 4.22 mostra a evolução temporal dos fluxos de calor latente e sensível para o verão e inverno, das duas simulações analisadas. Nesta figura é possível observar diferenças superiores a 10 W/m^2 em alguns anos. Em geral nota-se que há uma redução do fluxo de calor latente na simulação com a inclusão das áreas alagadas, porém nos últimos anos da análise este sinal se inverte e o experimento passa a apresentar um fluxo de calor latente maior que

a simulação controle. O mesmo ocorre em relação ao fluxo de calor sensível do experimento, que passa a ser menor que o fluxo da simulação controle ao final do período de 30 anos.

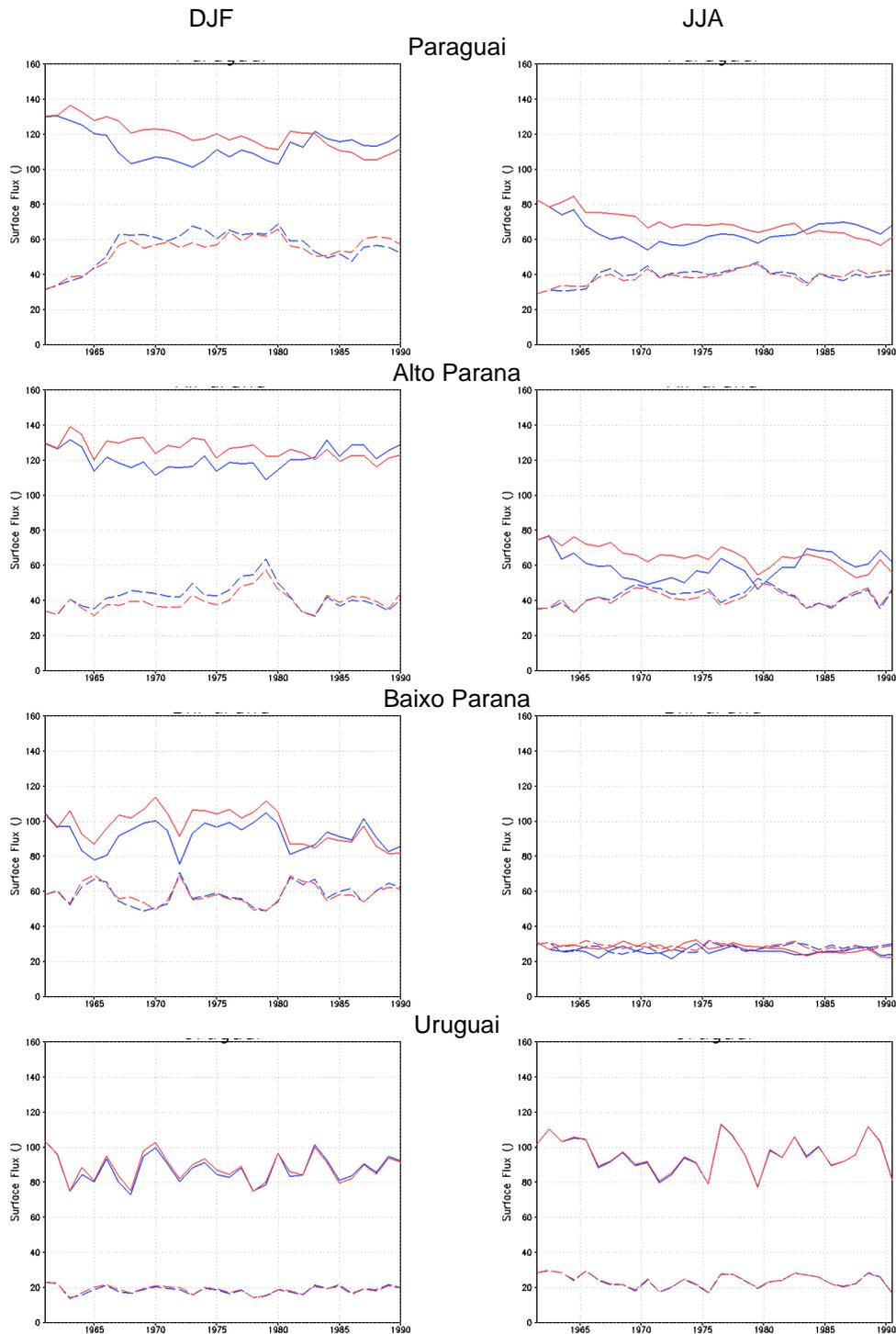


Figura 4.22 - Evolução temporal dos fluxos de calor latente(linha cheia) e sensível(linha pontilhada), média para DJF e JJA, durante o período de 1961-1990, nas quatro regiões representadas na figura 4.9. A linha azul representa o experimento e a vermelha a simulação controle.

4.2.6 Discussões e conclusões

Oliveira et al. (2006) encontraram que o fluxo de calor latente em determinados dias, onde o solo encontrava-se coberto por uma lâmina de água, se apresentava maior, devido a maior disponibilidade de água para evaporação. Esse resultado difere do resultado encontrado neste trabalho, pois apesar de representar as regiões com áreas alagadas, no experimento proposto, nenhuma alteração foi realizada na umidade inicial do solo. Portanto, apesar dos parâmetros utilizados no experimento favorecerem a maior evaporação, o fato do solo não estar saturado na região do pantanal impediu o aumento da evaporação e a conseqüente elevação do fluxo de calor latente, com isso, a energia disponível foi utilizada para aumentar a temperatura da região, aumentando assim o fluxo de calor sensível do experimento.

Embora os resultados encontrados no experimento não sigam o padrão encontrado por Oliveira et al. (2006), foi possível notar que a mudança realizada no esquema de superfície gerou diferenças significativas nas variáveis analisadas. Apesar da área modificada ser pequena em relação à LPB, o balanço de umidade de toda a Bacia foi alterado, o que mostra que o pantanal possui grande influência no balanço hídrico da LPB.

4.3 Etapa III - Avaliação das implicações das mudanças climáticas na agricultura

Nesta seção, os possíveis impactos das mudanças climáticas na agricultura são avaliados, a partir das simulações descritas nas seções anteriores e com base nos índices de extremos climáticos. Portanto, a seguir é apresentada uma análise de alguns índices de temperatura e precipitação para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

4.3.1 Análise dos índices extremos

Nesta seção os índices de extremos de precipitação PRCPTOT, CDD, CWD e R95p, assim como os de temperatura TN10p, TX90p, WSDI e CSDI são analisados para o período de 1961-1990, da simulação controle e do

experimento. Posteriormente são mostradas as diferenças destes índices, em relação ao clima presente, para cada um dos períodos das projeções com o modelo Eta (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099), identificando as regiões com tendência de aumento ou redução de extremos climáticos.

Precipitação

Na figura 4.23 o índice PRCPTOT (mm/ano) indica a média anual de precipitação, para o período de 1961-1990, referente aos dias onde a precipitação diária foi maior que 1mm, na simulação controle. De acordo com esse índice é possível identificar a região correspondente aos estados de Santa Catarina, Paraná e noroeste do Rio Grande do Sul, como a área com maiores índices pluviométricos da Bacia do Prata. Este padrão também pode ser observado na simulação com a inclusão das áreas alagadas (figura 4.24).

O índice R95p (figuras 4.23 e 4.24) representa a média do total anual da precipitação, nos dias em que a chuva foi maior que o percentil 95. Esse índice está associado a eventos extremos de precipitação. Através desse índice é possível notar que boa parte da precipitação, representada pelo índice PRCPTOT, no estado do Paraná, oeste de Santa Catarina e noroeste do Rio Grande do Sul, está associada a eventos de precipitação intensa.

O índice CDD indica o número máximo de dias consecutivos em que a chuva diária não ultrapassa 1 mm, ou seja, número máximo de dias secos consecutivos. Nas figuras 4.23 e 4.24 o índice CDD representa a região nordeste da Bacia, assim como o noroeste da Argentina e oeste do Paraguai, como regiões que possuem as maiores quantidades de dias consecutivos sem chuva significativa. Por outro lado, uma faixa de noroeste a sudeste da LPB é indicada como uma região com poucos dias consecutivos sem chuva (menos de 20 dias). O centro-sul do Paraná, Santa Catarina e noroeste do Rio Grande do Sul possuem no máximo 14 dias consecutivos sem chuva. É possível notar que o CDD do experimento (figura 4.24) é ligeiramente maior em determinadas regiões, que o da simulação controle, principalmente no noroeste da LPB, onde são encontrados valores de até 100 dias, na simulação com as áreas alagadas.

O número máximo de dias consecutivos com chuva diária acima de 1 mm, representado pelo índice CWD nas figuras 4.23 e 4.24 mostra a região nordeste da LPB, como a que possui mais dias consecutivos úmidos (20 a 30 dias), ou seja, essa região apresenta grande variação sazonal, apesar de ter longos períodos de seca (conforme verificado através do índice CDD), em outro momento ela apresenta também longos períodos com chuva. Esse resultado está de acordo com amplitude do regime pluviométrico da região, que possui grandes acumulados de precipitação durante o verão e baixos acumulados no inverno (figura 4.14). Apesar de possuir elevados acumulados de precipitação (PRCPTOT), a região do Paraná, Santa Catarina e oeste do Rio Grande do Sul, possui entre 9 e 15 dias consecutivos úmidos, portanto, conclui-se que há um grande volume de chuva distribuído em poucos dias, conforme verificado através do índice R95p, que mostra que essa região possui elevados extremos pluviométricos.

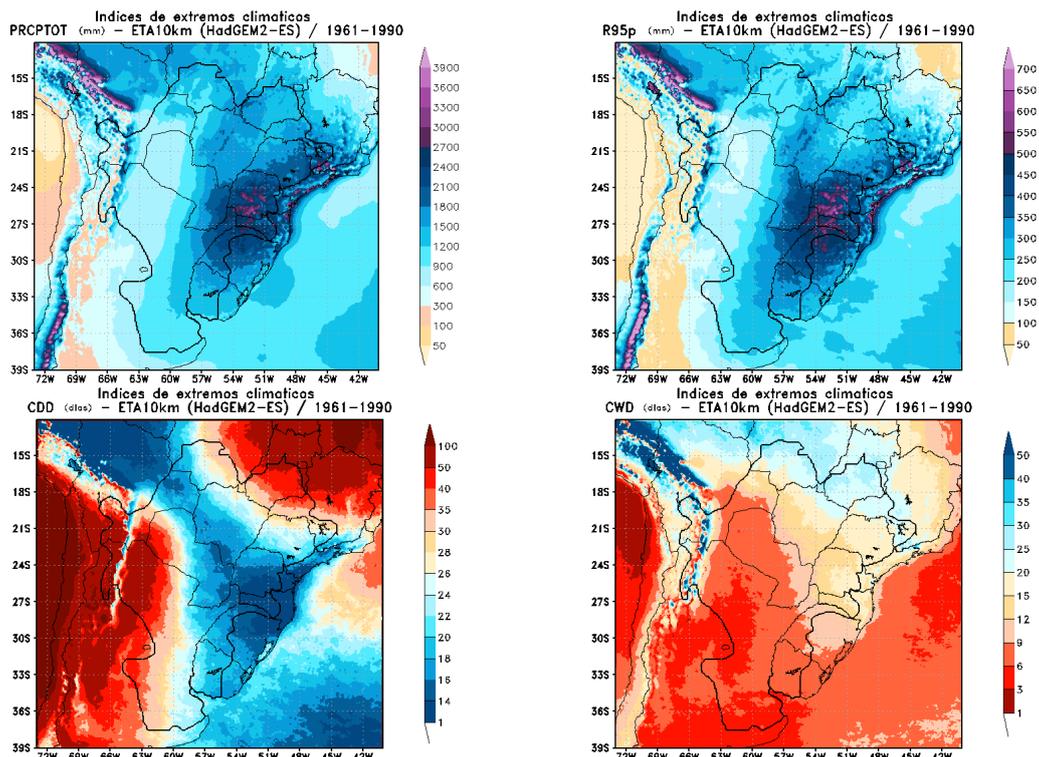


Figura 4.23 – Índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para o período de 1961-1990: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.

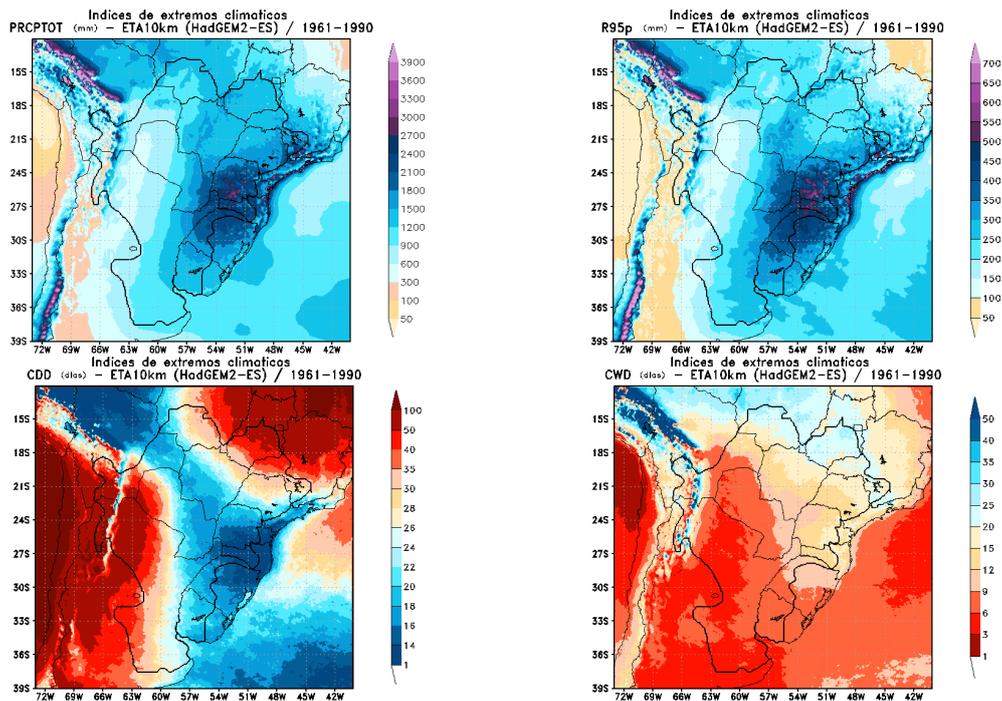


Figura 4.24 – Índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para o período de 1961-1990: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.

Projeções

As figuras 4.25 e 4.26 indicam uma tendência de aumento dos acumulados (PRCPTOT), assim como dos eventos extremos de precipitação diária (R95p), na Argentina, principalmente no período de 2071-2099.

Na porção sul e leste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, ambas as simulações (figuras 4.25 e 4.26), mostram uma tendência de aumento nos acumulados diários, que já se encontravam altos no clima presente, assim como uma elevação dos máximos diários (R95p).

Para a região norte da LPB (que inclui sul de Mato Grosso e Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, norte/oeste do Paraná e Paraguai) há uma diferença de intensidade/sinal entre as simulações. A simulação controle mostra redução do acumulado de precipitação e dos máximos diários, para todos os períodos, sendo a redução maior no período de 2011-2040, enquanto nos períodos seguintes a intensidade da redução dos acumulados é menor, e no período de 2071-2099, a tendência de aumento de eventos extremos de precipitação diária predomina em praticamente toda a LPB. No experimento com a inclusão das

áreas alagadas a redução do acumulado de precipitação no período de 2011-2040 não é tão intensa quanto a encontrada na simulação controle, e a partir de 2041 as regiões com redução do acumulado de precipitação são menores e no período de 2071-2099 praticamente toda LPB possui tendência de aumento da precipitação acumulada e em alguns pontos há uma tendência de aumento de precipitação diária com altos acumulados.

O índice CDD que indica o número de dias consecutivos secos mostra uma pequena tendência de aumento, principalmente no sul de Goiás, São Paulo, Mato Grosso do Sul e noroeste da Argentina (figura 4.25). Em relação à simulação controle o experimento apresenta valores menores de CDD, no entanto, a região com tendência de aumento dos dias secos é a mesma que é identificada na simulação controle (figura 4.26).

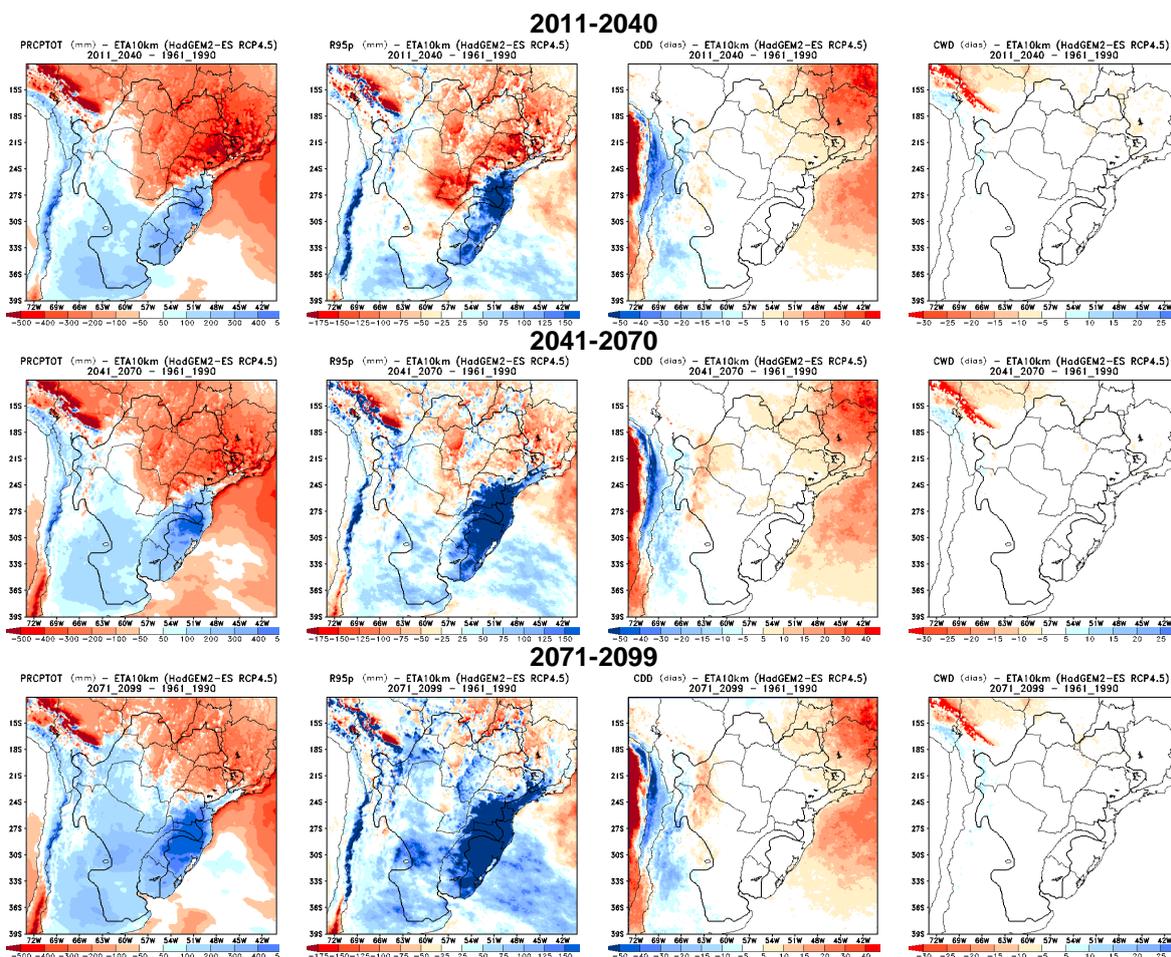


Figura 4.25 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.

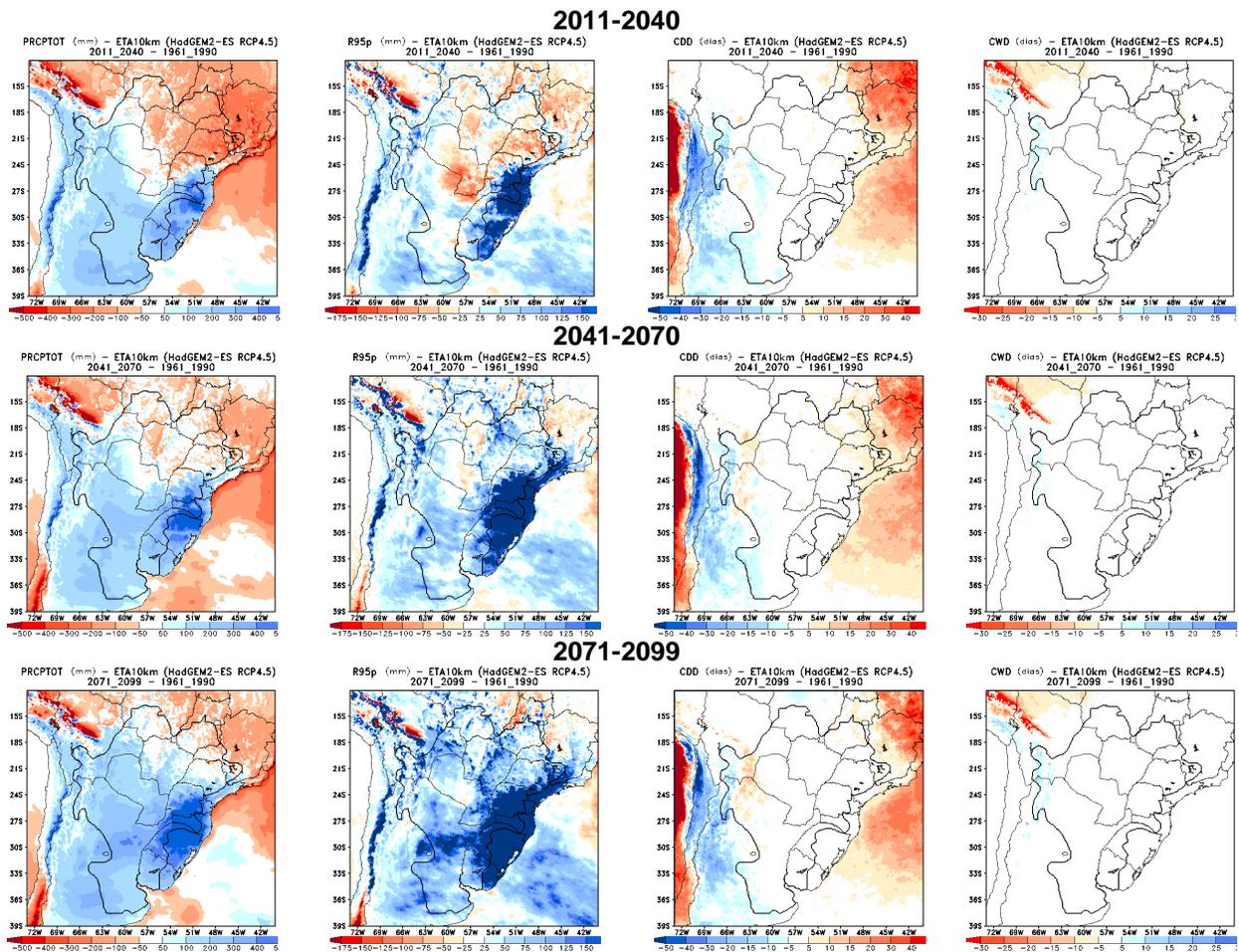


Figura 4.26 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de precipitação, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: PRCPTOT, R95p, CDD e CWD.

Temperatura

O índice TN10p mostra a porcentagem de dias em que a temperatura mínima diária foi inferior ao percentil 10 (porcentagem de noites frias), enquanto o índice TX90p mostra a porcentagem de dias em que a temperatura máxima ultrapassou o percentil 90 (porcentagem de dias quentes). As figuras 4.27 e 4.28 mostram que a porcentagem de noites frias e dias quentes não ultrapassam 11%. Em relação aos dias quentes, destaca-se a região norte da LPB, que possui o maior índice de dias quentes, sendo essa região um pouco maior no experimento com a inclusão das áreas alagadas.

Em relação às ondas de frio e calor, os índices CSDI e WSDI indicam a região nordeste da LPB (figuras 4.27 e 4.28), como a que possui o maior contraste

entre os extremos de temperatura mínima e máxima, pois essa região apresenta o maior número de dias consecutivos com a temperatura máxima acima do percentil 90 (WSDI), assim como aparece também como a região com o maior número de dias consecutivos com a temperatura mínima abaixo do percentil 10, em ambas as simulações com o modelo Eta. Na simulação com a inclusão das áreas alagadas a região com ondas de calor é um pouco maior que a apresentada na simulação controle.

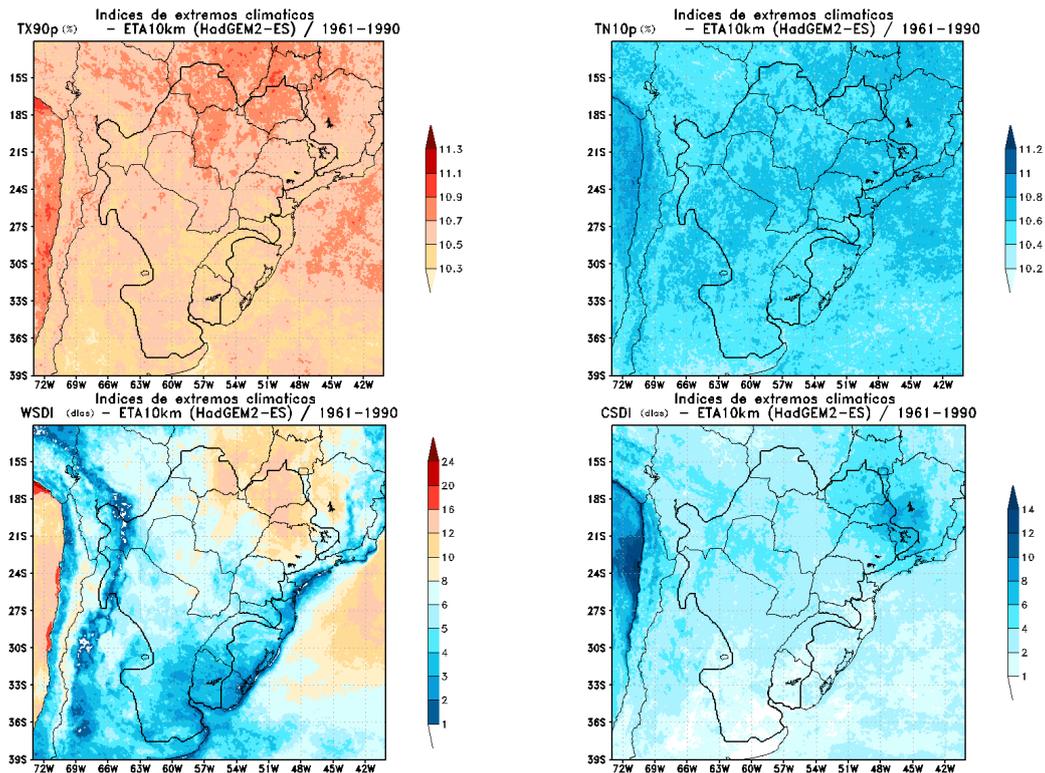


Figura 4.27 – Índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para o período de 1961-1990: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.

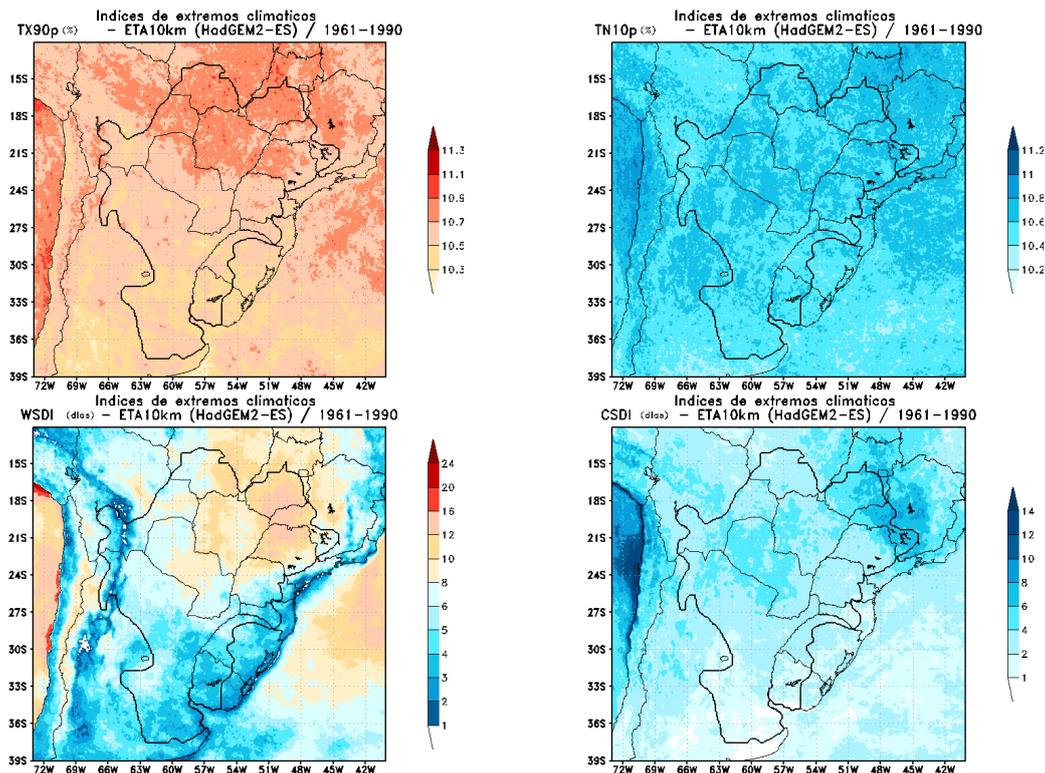


Figura 4.28 – Índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para o período de 1961-1990: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.

Projeções

As figuras 4.29 e 4.30 mostram a tendência dos índices de temperaturas extremas discutidos anteriormente, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, das duas simulações com o modelo Eta. Em geral há pouca diferença entre as simulações, pois as duas mostram a mesma tendência de aumento dos dias quentes e das ondas de calor e redução das noites frias e ondas de frio. As diferenças entre os índices do experimento e da simulação controle estão na intensidade da diferença em relação ao clima presente. A simulação controle apresenta uma diferença maior entre as projeções do clima futuro em relação ao clima presente, no entanto, as duas simulações indicam a região nordeste da LPB, como a que terá o maior número de dias com temperaturas extremas.

Em relação à temperatura mínima, as simulações mostram uma redução significativa dos índices TN10p e CSDI (figuras 4.29 e 4.30), que já se

apresentavam baixos no clima presente. Essa redução indica que há uma tendência de aumento da temperatura mínima média em toda LPB.

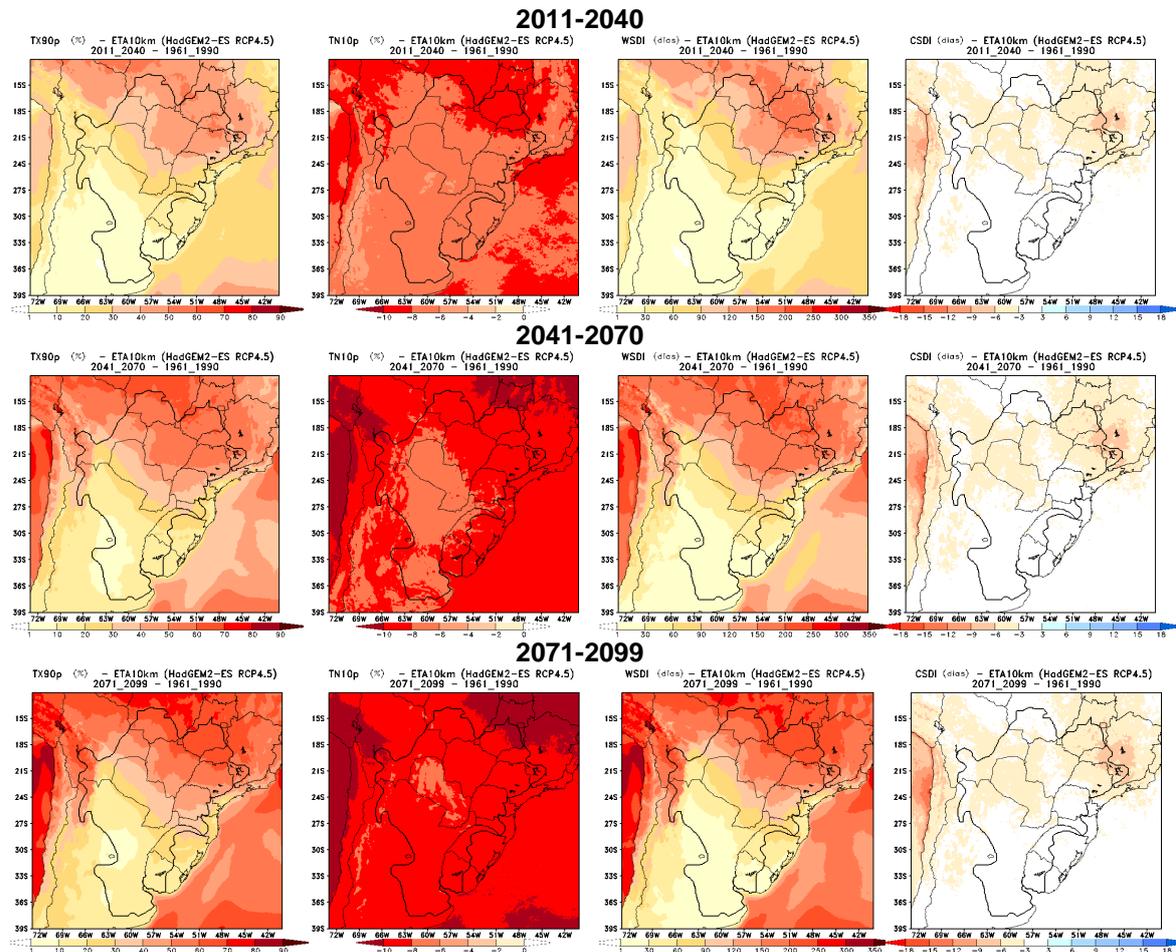


Figura 4.29 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a configuração controle, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.

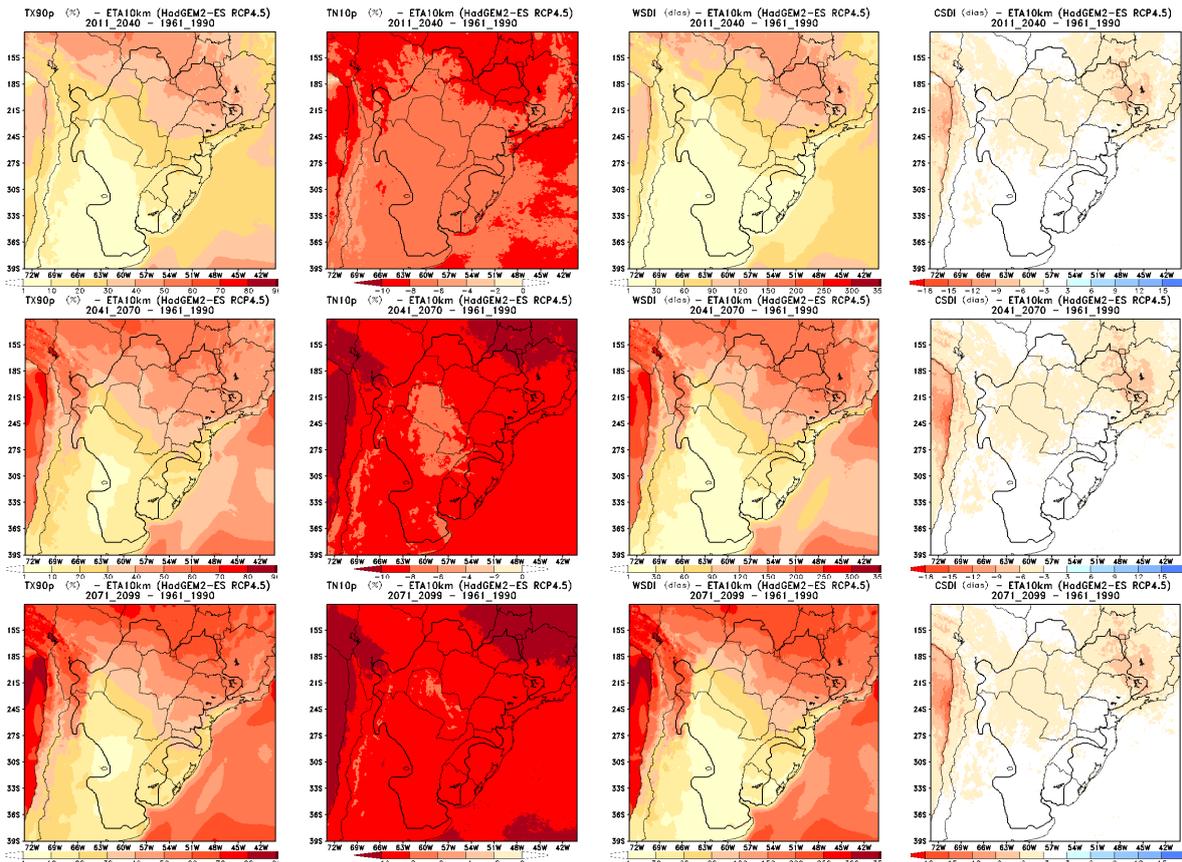


Figura 4.30 – Diferença em relação ao clima presente (1961-1990), dos índices extremos de temperatura, simulados pelo modelo Eta, com a inclusão das áreas alagadas, para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099: TX90p, TN10p, WSDI e CSDI.

4.3.2 Análise das implicações na agricultura

De acordo com a análise realizada na seção anterior, a parte brasileira da LPB é a mais afetada pelos índices climáticos extremos. A região nordeste da LPB, que abrange alguns estados brasileiros (sul de Mato Grosso e Goiás, São Paulo, Mato Grosso do Sul, parte de Minas Gerais e noroeste do Paraná) é a região apontada como a que terá maior impacto em relação aos eventos extremos de temperatura e precipitação. E embora haja uma tendência de aumento no total da precipitação, a Região Sul do Brasil também merece destaque, pois é representada como a região com maior tendência ao aumento de eventos extremos de precipitação, que podem representar perda de safra, devido aos estragos causados por temporais, que muitas vezes são acompanhados de ventos fortes e granizo.

De acordo com Schlindwein et al. (2011), a única maneira de compensar o aumento da temperatura seria aumentar significativamente a precipitação. Nesse sentido, a Região Sul do Brasil pode não ser totalmente afetada pelas mudanças climáticas, pois apesar da tendência de aumento da temperatura, essa região também é apontada com tendência de aumento no volume de precipitação.

A região nordeste da LPB aparece como a mais preocupante, pois além de ser a região identificada com maior aumento de temperatura, essa região também apresenta uma tendência de redução no volume de precipitação e um aumento dos dias consecutivos secos, que de acordo com Schlindwein et al. (2011) é o evento climático mais importante que afeta a agricultura.

De acordo com Vasconcelos et al. (2014) as principais culturas encontradas na parte brasileira da LPB são café, soja, milho, cana-de-açúcar e trigo. O café é classificado como cultura permanente, pois necessita de longos ciclos. A cana-de-açúcar aparece como cultura semi-permanente. Com relação às culturas classificadas como temporárias, que apresentam curta ou média duração, está o trigo que é cultivado no inverno, seguido pela soja e/ou milho na primavera e verão.

Café

A faixa de temperatura ideal para o cultivo do café arábica fica entre 18 e 22°C. Temperaturas mais altas promovem formação de botões florais e estimulam o crescimento dos frutos irregularmente. Entretanto, estimulam também, a proliferação de pragas e aumenta o risco de infecções que podem comprometer a qualidade da bebida. O cafeeiro é também muito suscetível à geada, sendo que temperaturas abaixo de 10°C já inibem o crescimento da planta. O cafeeiro reage positivamente a um período de seca que, entretanto, não deve durar mais do que 3 meses. A quantidade de chuva ideal para o desenvolvimento da cultura fica na faixa de 1500 a 1800 mm por ano, bem distribuídos. Uma distribuição muito irregular de chuva causa floração desuniforme e maturação desigual dos frutos (MEIRELES et al., 2009).

O café é cultivado em grande quantidade em Minas Gerais, São Paulo e Paraná, portanto, a redução da precipitação simulada pelo modelo Eta para o clima futuro nesta região, somada a tendência de aumento da temperatura, que pode estimular a proliferação de pragas, podem significar uma redução de safra para esta região.

Cana-de-açúcar

A cana é um cultivo de longa duração e, portanto convive com todas as estações, chuvosa, inverno e verão durante seu ciclo de vida. Os principais componentes climáticos que controlam o crescimento, a produção e qualidade da cana são temperatura, luz e umidade disponível. A planta vive melhor em áreas ensolaradas quentes e tropicais. Um total de chuva entre 1100 e 1500 mm é adequado se a distribuição for certa, abundante nos meses de crescimento vegetativo seguido por um período de amadurecimento. Durante o período de crescimento ativo, a chuva motiva um crescimento de cana rápido, alongamento da cana e formação de entrenós. Porém durante o período de amadurecimento, muita chuva não é desejável porque isso leva a qualidade de suco pobre, motiva o crescimento vegetativo, formação de shoots de água e aumento da umidade do tecido. Isto também prejudica a safra e operações de transporte. O crescimento da cana está intimamente ligado à temperatura. A temperatura ideal para brotação de cortes no caule é entre 32°C e 38°C (Fonte: <http://www.sugarcane crops.com/p/climate/>).

De acordo com esta característica de ser cultivada em altas temperaturas, a tendência de aumento prevista pelo modelo Eta pode ser favorável a produtividade da cana-de-açúcar. Atualmente a cana é amplamente cultivada nos estados do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil e em algumas regiões do Paraná e Santa Catarina. Portanto, estas regiões permanecem com baixo risco de perda de produtividade, em relação às mudanças climáticas, porém podem depender mais de sistemas de irrigação complementar, devido à tendência de redução da precipitação. Além disso, esse tipo de cultivo pode se estender por regiões de latitudes mais altas, que atualmente possuem restrições por

possuírem baixas temperaturas e riscos de geada, porém possuem tendência de aumento da temperatura para as próximas décadas.

Soja

A soja se adapta melhor às regiões onde as temperaturas do ar oscilam entre 20°C e 30°C sendo que a temperatura ideal para seu desenvolvimento está em torno de 30°C. A faixa de temperatura do solo adequada para a semeadura varia entre 20°C a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme.

A disponibilidade de água é importante, principalmente em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação emergência e floração-enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso como a falta de água é prejudicial ao estabelecimento da cultura e à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas, sendo o excesso hídrico mais prejudicial do que o déficit. A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração - enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período (Embrapa Soja, 2008).

De acordo com Assad e Pinto (2008) essa é a cultura que mais deve sofrer com as mudanças climáticas, caso as condições de plantio se mantenham como as atuais e nenhuma modificação genética seja feita, o que os autores consideram improvável, visto que algumas variantes já estão sendo estudadas.

Atualmente a soja é produzida nos oito Estados Brasileiros, pertencentes à Bacia do Prata (PR, RS, MS, GO, MT, MG, SP, SC), sendo o Paraná o maior produtor seguido do Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Goiás (VASCONCELOS et al., 2014). O aumento da temperatura do ar, acompanhado de deficiência hídrica, devido à maior evaporação, tende a reduzir a área com baixo risco deste cultivo, que é um dos principais produtos de exportação do Brasil. De acordo com Assad e Pinto (2008), a redução da produção de soja no Brasil pode afetar não somente a exportação deste

produto, como também a pecuária, que é alimentada com soja e milho, causando grandes impactos no setor de agronegócio. Segundo os autores o aumento das áreas de risco está relacionado ao aumento de risco de secas.

De acordo com os índices apresentados anteriormente, a região nordeste da LPB seria uma região com alto risco de quebra de safra para este tipo de cultura, visto que apresenta uma tendência de aumento de temperatura e redução da precipitação. No entanto, a região Sul do Brasil poderia compensar o aumento da temperatura, com o aumento da precipitação, desde que esse aumento não fosse devido ao aumento de eventos extremos diários, como foi identificado através do índice R95p. Portanto, o aumento do risco da soja pode estar relacionado não somente ao aumento de eventos de seca, mas também ao aumento de eventos extremos de precipitação, nas regiões atualmente produtoras de soja.

Milho

Em relação ao clima, embora o milho responda à interação dos diversos fatores climáticos, os de maior influência sobre a cultura são a radiação solar, a precipitação e a temperatura. Estes fatores atuam eficientemente nas atividades fisiológicas interferindo diretamente na produção de grãos e de matéria seca. A temperatura possui uma relação complexa com o desempenho da cultura, uma vez que a condição ótima varia com os diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento da planta. A temperatura ideal para o desenvolvimento do milho, da emergência à floração, está compreendida entre 24°C e 30°C. Verões com temperatura média diária inferior a 19°C e noites com temperatura média inferior a 12,8°C não são recomendados para a produção de milho. O milho é uma cultura muito exigente em água. Entretanto, pode ser cultivado em regiões onde as precipitações vão desde 250 mm até 5000 mm anuais, sendo que a quantidade de água consumida pela planta, durante seu ciclo, está em torno de 600 mm.

Esta cultura pode ser plantada em praticamente todo Brasil. Mas ocorrem variações no rendimento de grãos de um ano para o outro e entre as regiões

em virtude de deficiência hídrica que pode ocorrer entre o final da primavera e o início de verão, afetando o bom desenvolvimento da planta.

De acordo com Assad e Pinto (2008), o milho será a terceira cultura mais prejudicada do País, com a tendência de aquecimento. Porém a maior redução na área de baixo risco ocorre no Nordeste Brasileiro, que atualmente já possui altas temperaturas e déficit hídrico. Embora a redução da precipitação e aumento de temperatura, esperados para a LPB, possam afetar o ciclo das plantas, há uma grande variedade desta cultura atualmente sendo cultivadas em regiões com grandes variações climáticas.

Trigo

A temperatura ideal para o crescimento do trigo, durante a primeira parte do ciclo é relativamente baixa. A temperatura do ar em torno de 19°C antes da colheita é considerada ideal para obter uma qualidade satisfatória do grão. Em relação à precipitação, o trigo não necessita de grande quantidade de água para o desenvolvimento. Em geral, as zonas de alta produção de trigo são regiões de baixa precipitação, como por exemplo, no inverno no Paraná.

A tendência de aumento da precipitação na Região Sul do Brasil torna essa região de alto risco para esse cultivo, visto que o excesso de água causa o encharcamento do solo e longos períodos de molhamento foliar, que pode promover doenças. Por outro lado, apesar da tendência de redução da precipitação na região nordeste da LPB, a tendência de elevação de temperatura, nesta região que já possui altas temperaturas, torna essa região inapropriada para esse tipo de cultura.

Nas demais regiões da LPB onde os eventos extremos tendem a ter pouca variação em relação ao clima presente, entende-se que as culturas utilizadas atualmente possuem baixo risco de perda de produção, em relação às variações climáticas. As culturas devem variar anualmente de acordo com fatores econômicos, técnicas de rotação, para melhor utilização do solo, entre outros fatores.

4.3.3 Discussões e conclusões

Nesta etapa, foi realizada uma avaliação dos possíveis impactos na agricultura da LPB, em relação aos cenários futuros de mudanças climáticas, projetados pelo modelo Eta 10 km. Tal análise foi baseada nos índices climáticos de eventos extremos de temperatura e precipitação.

Os índices extremos de temperatura mostram que o nordeste da LPB é a região com a maior variação de temperatura, pois ao mesmo tempo em que apresenta dias de onda de calor, também indica uma maior proporção de ondas de frio. Além disso, essa região é a mais afetada com o aumento de dias quentes e ondas de calor, assim como a redução das noites frias e ondas de frio, que poderão afetar toda LPB, de acordo com as projeções com o modelo Eta.

Em relação à precipitação, os maiores índices pluviométricos e eventos com grande volume de chuva diária se encontram atualmente na Região Sul do Brasil, com tendência de aumento para 2011-2099. As Regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil apresentam a maior variação sazonal, pois são as que possuem mais dias consecutivos secos e úmidos, o que significa uma tendência de aumento no contraste entre as estações. Contudo, em média, as projeções para essa região apresentam tendência de redução da precipitação e aumento dos dias secos.

Com base na análise dos eventos extremos, a região Brasileira da LPB seria a mais afetada pelos eventos extremos, por este motivo, a análise dos possíveis impactos na agricultura foi enfatizada para essa área.

Dentre as principais culturas analisadas a cana-de-açúcar seria a cultura menos afetada com as mudanças climáticas, pois suporta temperaturas mais altas. Com a tendência de aumento da temperatura em toda a LPB, a cana poderia expandir para regiões de latitudes mais altas, onde atualmente há riscos de geadas, assim como pode permanecer nas regiões onde é cultivada

atualmente, apesar da tendência de redução da precipitação, que pode ser suportada fazendo uso de sistemas de irrigação.

A soja, que é o principal produto de exportação do Brasil, pode ser a cultura mais afetada com a tendência de aumento da temperatura na LPB. A redução da produção de soja além de afetar a exportação deste produto, também pode afetar a pecuária, que se alimenta de soja.

5. CONCLUSÃO

Para reduzir a vulnerabilidade social dos recursos hídricos impulsionada pela mudança climática (inundações e secas), é necessária a ação de uma ampla gama de profissionais de diversos setores, incluindo os administradores municipais, organizações comunitárias, planejadores, setores agrícolas e de saúde e gestores de desastres, bem como representantes e instituições do setor da água. Ademais um elemento muito importante neste processo de medidas de adaptação é informação sobre o clima.

Neste trabalho foi utilizado o modelo Regional Eta, para analisar o balanço de umidade na Bacia do Prata e as implicações das mudanças climáticas na agricultura da LPB.

Inicialmente foi realizado o downscaling climático com o modelo Eta, a fim de escolher a melhor configuração desse modelo, na representação do clima presente (1961-1990). Na análise do clima presente, a configuração escolhida foi capaz de representar bem a distribuição e evolução temporal de temperatura e precipitação da LPB. Apesar do viés encontrado, essa simulação obteve um ganho em relação a outros trabalhos realizados com o mesmo modelo, em termos da magnitude dos erros de temperatura e precipitação.

Ao incluir a representação das áreas alagadas no modelo Eta, foram encontradas algumas diferenças significativas na temperatura e precipitação da Bacia do Prata e, conseqüentemente, no balanço de umidade dessa região. O sinal da mudança em média não foi o esperado, pois houve um aumento da temperatura e redução da precipitação na LPB. Contudo, o experimento proposto mostrou que apesar de pequena em relação a área total da LPB, a região do Pantanal possui grande importância no balanço de umidade dessa região, indicando que, pequenas modificações no ciclo de inundação do pantanal, podem afetar a umidade em toda a Bacia.

As simulações realizadas com o modelo Eta neste trabalho forneceram subsídio para o estudo dos possíveis impactos das mudanças do clima na

agricultura dessa região. Nessa análise verificou-se que algumas culturas como a cana-de-açúcar, além de não sofrerem risco climático com as tendências de aumento da temperatura, poderiam se expandir pela LPB, passando a ser cultivadas em regiões atualmente inaptas. Já a soja poderia sofrer fortes impactos com a tendência de aumento da temperatura e redução da precipitação em algumas regiões, porém se espera que essa entre outras culturas possam se expandir para outras regiões atualmente inaptas, e/ou se adaptem as variações climáticas da LPB.

Este trabalho buscou melhorar o entendimento dos impactos das mudanças climáticas na agricultura da Bacia do Prata e, ao mesmo tempo, aprimorar o modelo regional Eta para simulações de cenários futuros.

Com os resultados desta pesquisa espera-se que subsídios sejam fornecidos, para a formulação de estratégias adaptativas para atividades relacionadas ao uso da terra, à geração de energia hidroelétrica, transporte fluvial e preservação de ecossistemas ecológicos em terras inundáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÂMOLI, J. A dinâmica das inundações no Pantanal. In: SIMPÓSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIO ECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1984, Corumbá. **Anais ...** Brasília: EMBRAPA-DDT; Corumbá: UFMS: EMBRAPA Pantanal, 1986. P. 51-61 (EMBRAPA Pantanal. Documentos, 5).

ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; SÁ, L. D. A.; VITTAL MURTY, K. P. R.; GIELOW, R.; ARLINO, P. A. R.; ALVALÁ, P. C.; LIMA, I. T. D.; MARQUES FILHO, E. P.; SAMBATTI, S. B. M.; VON RANDOW, C.; SOUZA, A.; KASSAR, E.; MALHY, Y. S.; KRUIJT, B.; MEIRELLES, M.L. Projeto Interdisciplinar do Pantanal – Fase úmida (IPE-1). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, Brasília, 1998. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. Seção de Comunicação Técnico-Científicas.

ASSAD, E.; PINTO, H. S. **Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira.** São Paulo: EMBRAPA/UNICAMP, 2008.

BARROS, V. 2004: El Cambio Climático Global. Ed. Libros del Zorzal. Buenos Aires, 172 pp.

BARROS V, DOYLE M, CAMILLONI I (2005) Potential impacts of climate change in the Plata basin. Regional hydrological impacts of climate change: impact assessment and decision making. IAHS, China, 360 pp

BERBERY, E. H., COLLINI, E. A. Springtime precipitation and water vapor flux over southeastern South America. **Mon. Wea. Rev.**, v. 128, p. 1328–1346, 2000.

BERBERY, E. H. BARROS, V. R. The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. **J. Hydrometeor.**, v. 3, p. 630–645, 2002.

BERBERY, E. H. et. al. La Plata Basin (LPB) Continental Scale Experiment Implementation Plan, 2005.

BETTS, A. K.; MILLER, M.J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX and arctic air-mass data sets. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v.112, p. 693-709, 1986. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49711247308>.

BLACK, T. L. NMC Notes, 1994: the new NMC mesoscale Eta model: description and forecast samples. **Weather Forecasting**, v. 9, p. 256-278, 1994.

CABRÉ, M.F.; SOLMAN, S.; NUÑEZ, M.N. Creating regional climate change scenarios over Southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern caling technique: validity and limitations. **Climatic Change**, v.98, p. 449-469, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-009-9737-5>

CAMILLONI, I.; V. BARROS. The Paraná River response to El Niño 1982–83 and 1997–98 events. **J. Hydrometeor.**, v. 1, p. 412–430, 2000.

CAMILLONI, I. A.; V. R. BARROS Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. **J. Hydrol.**, v. 278, p. 94–106, 2003.

CEDEPLAR/UFMG/FIOCRUZ . Mudanças Climáticas, Migrações e Saúde: Cenários para o Nordeste Brasileiro, 2000-2050. Belo Horizonte: CEDEPLAR/FICRUZ, 2008. Relatório de Pesquisa

CHAMORRO, L. The main services and problems of water resources. In: BARROS, V.; CLARKE, C.; DIAS, P. S.; (Orgs.). **Climate change in the La Plata Basin**. 1 ed. Buenos Aires, Argentina: CIMA-CONACET - UBA, 2006. v. 1, p. 104-116.

CHEN, F.; JANJIC, Z. I.; E MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface-layer parametrization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Boundary layer Meteorology**, v. 85, p. 391-421, 1997..

CHOU, S.C. Modelo Regional Eta. **Climanálise**. Vol. 1, Especial Edition, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CHOU, S.C.; TANAJURA, C.A.S.; XUE, Y.; NOBRE, C.A. Validation of the coupled Eta/SsiB model over South America. **J. Geophys. Res.**, v. 107, n. D20, p. art. 8088, Oct. 2002. (INPE-9969-PRE/5529). doi:10.1029/2000JD000270.

CHOU, S.C.; FONSECA, J.F.B; GOMES, J.L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005. (INPE-13506-PRE/8719).

CHOU SC, MARENGO JA, LYRA A, SUEIRO G, PESQUERO J, ALVES LM, KAY G, BETTS R, CHAGAS D, GOMES JL, BUSTAMANTE J, TAVARES P (2011) Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635 - 653, Feb. 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8>.

CHOU, S.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2011a.. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>.

CHOU, S.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, 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, 2014b. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>.

CHRISTENSEN, J. H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.; CHEN, A.; GAO, X.; HELD, I.; JONES, R.; KOLLI, R. K.; KWON, W-T.; LAPRISE, R.; MAGAÑA RUEDA, V.; MEARN, L.; MENÉNDEZ, C. G.; RÄISÄNEN, J.; RINKE, A.; SARR, A.; WHETTON P. Regional climate projections. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds). **Climate change, 2007: The Physical Science Basis**. Chapter 11, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: University Press, United Kingdom and New York, 2007.

CHRISTENSEN, J.H.; KRISHNA, K.; KUMAR, E; ALDRIAN, S.-I; CAVALCANTI, I.F.A.; CASTRO, M. DE; DONG, W.; GOSWAMI, P.; HALL, A.; KANYANGA, J.K.; KITO, A.; KOSSIN, J.; LAU, N.-C.; RENWICK, J.; STEPHENSON, D.B.; XIE, S.-P.; ZHOU, T.. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In: **Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1217–1308, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.028>.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 1051-1075, 2011. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.

CORONEL, G.; MENÉNDEZ, Á. Physiography and hydrology. In: BARROS, V.; CLARKE, R.; DIAS, P. S. (Org.). **Climate change in the La Plata Basin**. 1 ed. Buenos Aires, Argentina: CIMA-CONACET - UBA, 2006. v. 1, p. 104-116.

COX, P. M. Description of the TRIFFID dynamic global vegetation model. Bracknell, Berks: Hadley Centre Technical Note 24, Met Office, UK, 2001.

DA SILVA, C.J. Influência da variação do nível d'água sobre a estrutura e funcionamento de uma área alagável do Pantanal Matogrossense (Pantanal de Barão de Melgaço, município de Santo Antônio de Leverger e Barão de Melgaço, MT) 1990. 215p. il. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). UFSCAR, São Carlos (SP), 1990.

De LIMA M.A. 2001: Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira, Pág.9.

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F.; BATES, G. T. A regional climate model for the western United States. **Clim Change**, v. 15, p. 383-422, 1998.

EK, M. B.; MITCHELL, M.K.; LIU, Y.; ROGERS, E.; GRUNMAN, P.; KOREN, V.; GAYANO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of Noah Land Model advances in the NCEP operational Eta Model. **JGR.**, v. 108, n. (D22), p. 8851-8867, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. **Tecnologias de produção de soja** – região central do Brasil – 2009 e 2010. Londrina: EMBRAPA-CNPSo: EMBRAPA-CPAC: EMBRAPA-CPAO, 2008. 261p. (Sistemas de produção / Embrapa-CNPSo, 13).

FELS, S. B.; SCHAWARZTKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. **J Atmos Sci**, v. 32, p. 1475–1488, 1975.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Clim Res**, v. 19, p.193–212, 2002.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **J. Climate**, v. 17, p. 47–66, 2004.

GARREAUD, R. D.; FALVEY, M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 4, p. 543–554, 2009.

GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **J. Climate**, v 3, p. 941- 963, 1990.

GIORGI, F.; MEARNS, L.O. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. **Rev. Geophys.**, v. 29, p. 191-216, 1991.

GRIMM, A. M.; BARROS, V.; DOYLE, M. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. **J. Climate**, v.13, p. 35–58, 2000.

GRIMM, A. M.; VERA, C. S.; MECHOSO, C. R. The South American Monsoon System. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MONSOONS, 2004. Hangzhou, China. **Proceedings...** Hangzhou: World Meteorological Organization, 2004. p. 111-129.

HALL, A. J.; REBELLA, C. M.; GHERSA, C. M.; CULOT, J. P. Field-crop systems of the Pampas. In: PEARSON, C. J. (ed). **Field crop ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1992. p. 413-450.

HAMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Arch. Hydrobiol.**, v. 137, p.1–23, 1996.

Instituto Brasileiro de Geografia Estatística Manual técnico de vegetação brasileira, Rio de Janeiro, 1992. 92 p

IPCC. Summary for policymakers. In: **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC . **IPCC special report on emissions scenarios**. Prepared by Working Group III of the Inter-governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp 570.

JONES, R.; NOGUER, M.; HASSELL, D.; HUDSON, D.; WILSON, S.; JENKINS, G.; MITCHELL, J. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004. 40 p.

KODAMA, Y. M. Large-scale common features of the subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. **J. Meteor. Soc. Japan**, v. 71, p. 581–610, 1993.

KUBOTA, P, Y.; MANZI, A. O.; SILVA DIAS, M. A. F. Simulação numérica da Camada limite do Pantanal Mato- Grossense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2002. p. 2764- 2772.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, v. 31, p. 118-133, 1974.

LAING, A. G.; FRITSCH, J. M. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. **Mon. Wea. Rev.**, V. 128, P. 2756–2776, 2000.

LEMOS, C.F.; CALBET, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil (período 1987-95). **Climanálise Especial** – Edição Comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC, 1996. cap. 14.

LIMA, M. A.; ALVES B. J. R. Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas. **Parcerias Estratégicas**, n.27, Brasília, 2008.

MAGALHÃES, N. **Conheça o pantanal**. 1. ed. São Paulo - BR: Terragraph, 1992. 390p

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: characteristics and temporal variability. **J. Climate**, V. 17, P. 2261–2280, 2004.

MARENGO, J. A., (2005). The characteristics and variability of rainfall across the Amazon basin: Spatial and temporal variability. *Climate Dynamics*, v. 24, p.11- 22.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; M. ALVES, L.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; FERRAZ, S. E. T.; TORRES, R.R.; SANTOS, D. C. future change of climate in South America in the late XXI Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 6 Special Supplement, p. 1089 - 1113, 0930-7575 2010. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6.

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v.15, p. 2241-2255, 2009b.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C; KAY G.; ALVES, L.; PESQUERO, J. F SOARES, W.R; SANTOS, D.C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. *Climate Dynamics*, 38, 1829-1848, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; 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. CCAFS Working Paper no. 73. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Co-penhagen, Denmark. Available online at: www.ccafs.cgiar.org.

MARQUES FILHO, E. Alguns aspectos teóricos e experimentais da Camada Limite Superficial acima do Pantanal Matogrossense. 1999. 155 p. (INPE-7501-TDI/716). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, 1999. Disponível

em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2000/07.19.10.58>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

MEIRELES E.J.L. et al. Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005. Embrapa Café, Documentos, 2. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. P.43.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F.; JANJIC, Z.; I., NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493-1518, 1988.

MEYER, W. B.; TURNER, B. L. Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge England: Cambridge University Press, 1994.

NICOLINI, M.; SALIO, P.; ULKE, G.; MARENGO, J. A.; DOUGLAS, M.; PAEGLE, J.; ZIPSER, E. South American low level jet diurnal cycle and three dimensional structure. *Clivar Exchanges*, v. 9, n. 29, p. on line, mar 2004.

NUÑEZ, M.; CIAPESSONI, H.; ROLLA, A.; KALNAY, E.; CAI, M. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. **J. Geophys. Res.**, v. 113, n. D06111, 2008. doi:10.1029/2007JD008638.

NUÑEZ, M.; SOLMAN, S. A.; CABRE, M. F. Regional climate change experiments over southern South America. II: climate change scenarios in the late twenty-first century. **Climate Dynamics**, v. 32, n. 7-8, p. 1081–1095, 2009.

OLIVEIRA, A. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia. 1986. 134p. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1986. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HetLL>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

OLIVEIRA, M. B. L.; RANDOW, C.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; SÁ, L. D. A.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; SOUZA, A. Fluxos turbulentos de energia sobre o Pantanal Sul Mato- Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 159- 165, 2006. (INPE-14700-PRE/9673). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/03.14.12.31>>. Acesso em: 07 dez. 2011.

PADOVANI, C. R. **Dinâmica espaço-temporal das inundações do pantanal**. 2010. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) -, Universidade de São Paulo, Ecologia de Agroecossistemas, Piracicaba, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-14022011-170515/>>. Acesso em: 2011-12-07.

PESQUERO, J.F.; CHOU, S.C.; NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A. Climate Downscaling over South America for 1961-1970 Using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, January 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-009-0123-z> .

PINTO, H. S. ; ZULLO JR, J. ; ASSAD, E. D. El calentamiento global y la agricultura brasileña. In: DIRVEN, M.; RODRIGUEZ, A. (Org.). **La agricultura otra victima del cambio climatico**. 1 ed. Santiago, Chile: Le Monde Diplomatic, Cepal. 2008. v. 1, p. 63-74.

POR, F. D. **The Pantanal of Mato Grosso (Brazil)**. Dordrecht: K. A. Publishers, 1995. 122 p.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**, v.1-26. Rio de Janeiro: DNPM, 1974-1986.

RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with southern oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, P. 81-91, 1990.

RESCK, D. V. S. Perspectivas do uso e manejo dos solos no Cerrado. In: ARAÚJO, Q. R. (ed.). **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus, BA: Editus, 2002. p. 219-237.

RODWELL, M. J.; HOSKINS, B. J. Subtropical anticyclones and summer monsoons. **J. Climate**, v.14, p.3192–3211, 2001.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño– Southern Oscillation. **Mon. Wea. Rev.**, v.115, p. 1606–1626, 2001.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A.R.C.; BERBERY H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R.P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 2193-2212, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-014-2466-0>.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; DIAS, P. L. S. SOUTH AMERICA. In: KAROLY, D. J.; VINCENT, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston: American Meteorology Society, 1998. Cap. 3, p. 243-282.

SAULO, A. C.; NICOLINI, M.; CHOU, S. C. Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-1998 spring-summer season. **Climate Dynamics**, v. 16, n. 10-11, p. 867 - 881, oct. 2000.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F.; DE SOUZA, R. R.; BORBA, B. M.; COSTA, I.; PEREIRA JÚNIOR, A.; DA CUNHA, S. H. F. **Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2008.

SCHLINDWEIN, S. L.; SIEBER, S.; BONATTI, M.; DAGOSTINI, L. R.; FANTINI, A.; VASCONCELOS, A. C. F. **CLARIS LPB WP8**: land use change, agriculture and socio-economic implications. **Exchanges - CLIVAR** (Hamburg. Print), v. 57, n. 16-3, p. 28-31, 2011. ISSN 1026-0471.

SILVA, V. B. S.; BERBERY, E. H. Intense rainfall events affecting the La Plata Basin. **Journal of Hydrometeorology**, v.7, p. 769–787, 2006.

SOLDANO, F.A. **Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina**. Part I, Buenos Aires: Cimera, 1947.

SOLMAN, S. A.; NUÑEZ, M. N.; CABRÉ, M. F. Regional climate change experiments over southern South America, I: present climate. **Clim Dyn**, v. 30, p. 533–552, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-007-0304-3>.

SOLMAN, S. A. Regional climate modeling over South America: a review. **Adv Meteorol.**, v. 2013, n. ID 504357, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/504357>.

SOLMAN, S.A.; SANCHEZ, E.; SAMUELSSON, P. et al. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America Driven by the ERA-Interim Reanalysis: Model Performance and Uncertainties. **Climate Dynamics**, n. 41, p. 1139-1157, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1667-2>.

SORIANO, A.; LEÓN, R. J. C.; SALA, O. E.; LAVADO, R. S.; DEREGIBUS, V. A.; CAUHÉPE, M. A.; SCAGLIA, O. A.; VELÁZQUEZ, C. A.; LEMCOFF, J. H. Rio de la Plata grasslands. In: COUPLAND, R.T. (ed.) Temperate subhumid grasslands. Ecosystems of the World. Vol. 8, Natural Grasslands. A. 367-407. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam.

THOMSON, A. M. et al. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Clim. Change**, v. 109, p. 77–94, 2011.

TOSSINI, L. Sistema hidrográfico y Cuenca del Rio de la Plata. Contribución al estudio de su régimen hidrológico. **Anales de La Sociedad Científica Argentina**, III y IV, Tomo CLXVII, v. 167, p. 41–64, 1959.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Environmental issues in the La Plata Basin. **Water Resour. Dev.**, v. 14, p. 157–174, 1998.

URRUTIA, R.; VUILLE, M. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: temperature and precipitation simulations for

the end of the 21st century. **J Geophys Res**, v. 114, n. D02108, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011021>.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.L.T.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; MATSUI, T.; HURTT, G.; LAMARQUE, J-F.; MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S.; GRAINER, C.; ROSE, S.; HIBBARD, K. A.; NAKICENOVIC, N.; KREY, V.; KRAM, T. The representative concentration pathways: An overview. **Climatic Change**, v. 109, p. 5–31, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

VASCONCELOS, A. C. F.; SCHLINDWEIN, S. L.; LANA, M.A.; FANTINI, A. C.; BONATTI, M.; D'AGOSTINI, L. R.; MARTINS, S. R. Land use dynamics in Brazilian La Plata Basin and anthropogenic climate change. **Clim Chang**. v. 127, n.1, p 73-81, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1081-8>.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **J. Geophys. Res.**, v. 92, n. (D8), p. 9591–9613, 1987.

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P. K.; BERBERY, E. H. Cold season synoptic scale waves over subtropical South America. **Mon. Wea. Rev.**, v.130, p. 684–699, 2002.

VILA DA SILVA, J. S.; ABDON, M. M. Delimitação do pantanal brasileiro e suas subregiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 1703-1711, out. 1998.

VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Mon. Wea. Rev.**, 109, 599–610, 1981.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.

WUEBBLES, D. J.; JAIN, A.; EDMONDS, HARVEY, D.; HAYHOE, K. Global change: the state of the science. **Environmental Pollution**, v.100, P. 57-86, 1999.

ZENG, N. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic Cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 9097-9106, 1999.

ZHAO, Q.; T.L. BLACK; M.E. BALDWIN. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. **Wea. Forecasting**, v. 12, p. 697–712, 1997.

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America? **J. Climate**, v.11, p. 1020–1040, 1998.