



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Projeções Futuras de Mudanças Climáticas na Região do Centro de Lançamento de Alcântara

Bolsista: Pedro Camargo Lorenzon

Orientador(a): Mariane Mendes Coutinho

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2014 a Julho de 2015

### Resumo

O Centro de Lançamento de Alcântara, localizado no nordeste do Brasil representa um marco para o país no setor tecnológico espacial e proporciona certa vantagem, pois a região no qual se encontra possui características favoráveis ao funcionamento de um centro espacial de grande porte para lançamentos. No entanto, para um melhor desempenho no lançamento de foguetes, é importante uma avaliação das condições climáticas sobre a região de influência. O objetivo deste projeto é verificar, a partir de projeções realizadas por modelos, possíveis mudanças em variáveis climáticas como precipitação, temperatura e evaporação para a região do Centro de Lançamento de Alcântara, assim como a extensão da observação, segundo a projeção do modelo, para o comportamento da Zona de Convergência Intertropical. As projeções climáticas analisadas neste projeto foram as do Hadley Centre Global Environmental Model 2 (HadGEM2). Os resultados analisados indicam claramente alterações para o balanço de vapor de água atmosférico sobre a região que envolve o CLA e a precipitação associada à ZCIT. No caso do balanço, o comportamento é variável espacialmente, mas sazonalmente é possível verificar certas tendências. Especificamente para o CLA, pela projeção do cenário mais pessimista, ocorre um aumento de  $P - E$  no futuro em relação ao passado/presente durante o verão e primavera austrais e uma diminuição durante outono e inverno austrais. O modelo reproduz as áreas de precipitação associadas com a ZCIT, porém em algumas regiões os valores foram subestimados, enquanto que em outras foram superestimados. As mudanças mais acentuadas (sob o cenário RCP 8.5) indicam, em geral, um deslocamento da ZCIT em direção ao sul.



## Introdução

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), inaugurado em 1983 foi construído para suprir as necessidades de crescimento para o futuro tecnológico espacial, pois o Centro de Lançamento Barreira do Inferno que era o centro espacial do Brasil apresentava algumas restrições operacionais. O CLA está localizado no estado do Maranhão no nordeste brasileiro a latitude 2°18' sul da linha do equador e longitude 44° 23' oeste. Sua posição geográfica proporciona as características necessárias para um centro de lançamento de grande porte e também vantagens operacionais, como condições climáticas favoráveis, estabilidade geológica, e por estar próximo ao equador, o lançamento de foguetes necessita de menos energia devido ao aproveitamento de velocidade pela rotação da Terra. Sendo assim, surgiu como uma inovação para o lançamento de foguetes no Brasil. Segundo o CLA, sua missão é "Executar as atividades de lançamento e rastreamento de engenhos aeroespaciais e de coleta e processamento de dados de suas cargas úteis, bem como a execução de testes e experimentos de interesse do Comando da Aeronáutica, relacionados com a Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (PNDAE)" (CLA).

Apesar de todas essas vantagens consolidadas, ainda assim para um melhor desempenho e segurança no lançamento de foguetes é imprescindível o estudo sobre condições climáticas bem como possíveis alterações que possam vir a ocorrer no clima da região de influência como, por exemplo, mudanças sobre o balanço de vapor de água atmosférico.

Neste projeto, o estudo dessa região é feito a partir de simulações e projeções de alterações em variáveis climáticas utilizando-se a base de dados do CMIP5 ("Coupled Model Intercomparison Project Phase 5" - Fase 5 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados). Devido a condições anteriores de disponibilidade de dados, um dos modelos participantes do IPCC-AR5, o Hadley Centre Global Environmental Model 2 (HadGEM2) da UK-Met Office com a sua configuração de sistema terrestre é utilizado, tomando-se as saídas dos experimentos de projeções futuras para os diferentes cenários de emissões de gases e aerossóis e uso de terra considerados pelo CMIP5.

Os cenários climáticos são fatores importantes para o estudo de projeções climáticas. Sob diferentes condições é possível se estudar consequências em longo prazo referentes a um determinado cenário, possibilitando que as tomadas de decisões atuais sejam feitas levando em consideração os possíveis resultados.

Os diferentes cenários utilizados nas projeções são os “Representative Concentration Pathways” (RCPs) que foram estabelecidos pelo protocolo do CMIP5 e consideram três importantes fatores que promovem mudanças climáticas: os gases de efeito estufa, as emissões de poluentes atmosféricos e uso da terra. Esses cenários foram escolhidos de forma a ter uma variação entre eles próximo de  $2,0 \text{ W.m}^{-2}$  em termos da forçante radiativa e são: o RCP 2.6, o RCP 4.5, o RCP 6.0 e o RCP 8.5 sendo que os números de cada um são referentes as forçantes  $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $6,0 \text{ W.m}^{-2}$  e  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ , respectivamente. Essas forçantes radiativas estimadas foram baseadas nas forçantes de agentes como gases do efeito estufa, mas não abrangem impactos diretos do uso da terra (albedo) e forçante de poeira mineral (Van Vuuren et al. 2011).

O projeto visa estudar possíveis mudanças climáticas, que sejam de importância para a região do Centro de Lançamento de Alcântara, incluindo uma área maior relacionada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma vez que esta possui influência direta sobre o regime de precipitação da região de estudo. O tempo presente representado pelo modelo na simulação histórica é tomado como referência para estudar as variações ao longo do século XXI.

É importante destacar que são demonstrados neste relatório os resultados adquiridos após a entrega do relatório parcial, então não são repetidos aqui os resultados apresentados anteriormente.

## **2. Material e métodos**

No início do projeto foi necessário o aprendizado de alguns conceitos e informações, bem como a apresentação ao novo sistema operacional Linux e seus comandos básicos, desde copiar uma pasta ou diretório a transferir arquivos por meio de rede de uma máquina para a outra. O pacote gráfico utilizado para a geração das imagens dessa região a partir dos scripts

foi o Grid Analysis and Display System (GrADS) em sua versão 2.0.1.oga.1. Nesta etapa também foi necessário um estudo sobre o seu funcionamento, desde sua instalação até a geração de imagens. Há de se ressaltar que tanto em relação ao GrADS quanto ao uso do Linux foi um aprendizado contínuo, que continuou a ser incrementado e solidificado mesmo depois da primeira parte, adquirindo novos conhecimentos sobre comandos no Linux e traquejo na utilização do GrADS.

Em relação aos conceitos científicos básicos necessários para o desenvolvimento do projeto, o estudo foi feito através de aulas e leitura de material indicado. Esses conceitos envolveram principalmente as bases físicas do aquecimento global, incluindo o balanço de radiação, espectro eletromagnético, e vibrações e absorção dos gases de efeito estufa. Foi também feito o contato com o material do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e seus relatórios de avaliação (Assessment Report) do AR1 ao AR5, e feita uma pesquisa ênfase no AR4 e suas perguntas mais frequentes (FAQs – IPCC, 2007), para a compreensão de conceitos como o de forçante radiativa. Além disso, foi importante conhecer os fundamentos sobre o comportamento da ZCIT, pela sua importância para a ocorrência de precipitação na região do CLA.

Para desenvolvimento da parte prática do projeto utilizou-se as simulações históricas e as projeções climáticas futuras do modelo Hadley Centre Global Environmental Model 2 (HadGEM2) sob os cenários RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5 e os dados para a rodada do modelo foram obtidos do Earth System Grid Federation (ESGF, 2015).

Em resumo, na etapa anterior que focou nas variáveis precipitação e temperatura para a região de Alcântara, foi realizada uma projeção partindo dos quatro RPC's para três períodos de tempo diferentes durante o século XXI, um no início de novembro de 2014 a outubro de 2035, um em meados do século, de novembro de 2044 a outubro de 2065, e outro período do final do século, que vai de novembro de 2078 a outubro de 2099. Já na fase presente do relatório, foi feita uma análise do balanço de vapor de água na atmosfera para a região de Alcântara, sendo este balanço a subtração da precipitação média (P) menos evaporação média (E), além de também ter sido feita uma análise de simulações para precipitação, estendida com foco na zona de convergência intertropical.

A região levada em conta para análise de Alcântara vai da latitude de 0 a  $-10^{\circ}$  (do equador a  $10^{\circ}$ S) e da longitude de 310 a  $320^{\circ}$  (de  $50^{\circ}$ W a  $40^{\circ}$ W) e a considerada para a Zona de Convergência Intertropical está entre as latitudes  $-12^{\circ}$  a  $10^{\circ}$  ( $12^{\circ}$ S a  $18^{\circ}$ N) e longitudes 260 a  $360^{\circ}$  ( $120^{\circ}$ W a  $0^{\circ}$ ).

Uma indicação do nível de confiabilidade das projeções futuras de modelos climáticos pode ser obtida partindo de uma avaliação das simulações de tais modelos para períodos de tempo do passado. Assim, primeiramente, foram comparados os valores das médias, calculados pelos dados dos membros do ensemble do HadGEM2-ES (rodada histórica do modelo do período de 1979 a 2005) com a base de dados observacionais (também relativa ao mesmo período), composta pelo GPCP - Global Precipitation Climatology Project (Adler et al. 2003) para a precipitação e o ERA Interim (Berg et al. 2011) para a evaporação. Assim foi feita a comparação do balanço (P – E) anual e para quatro trimestres, sendo eles dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), março-abril-maio (MAM), junho-julho-agosto (MJJ) e setembro-outubro-novembro (SON), correspondentes às estações do ano de verão, outono, inverno e primavera, respectivamente (todos austrais). Então posteriormente foi feita a projeção do balanço com os diferentes cenários (RCP) para os mesmo períodos do século XXI, um no início de novembro de 2014 a outubro de 2035, um em meados do século, de novembro de 2044 a outubro de 2065, e outro período do final do século, que vai de novembro de 2078 a outubro de 2099.

Para a precipitação, a zona analisada foi mais ampla para avaliar o comportamento da ZCIT. Assim, também foi feita a diferença (relativa ao mesmo período) da rodada histórica do modelo com a base de dados observacionais GPCP para avaliar a confiabilidade do modelo neste caso. As diferenças de modelo para o observado foram divididas nos mesmos quatro trimestres, dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), março-abril-maio (MAM), junho-julho-agosto (MJJ) e setembro-outubro-novembro (SON), correspondentes às estações do ano de verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Em seguida foi feita a projeção da precipitação com os diferentes cenários (RCP) para o período no final do século, de novembro de 2078 a outubro de 2099.

### 3. Resultados

Em relação ao balanço de vapor de água atmosférica, a comparação da rodada histórica do HadGEM2-ES com os dados observacionais apresentou boa concordância para o nordeste do Brasil. São mostrados aqui apenas os resultados das médias sazonais e anual de  $P - E$  segundo o modelo para o período de dezembro de 1979 a novembro de 2005 (representando o tempo presente) na Figura 1, onde a região englobada é delimitada pelas latitudes  $0^\circ$  a  $10^\circ\text{S}$  e longitudes  $50^\circ\text{W}$  a  $40^\circ\text{W}$ .

Figura 1

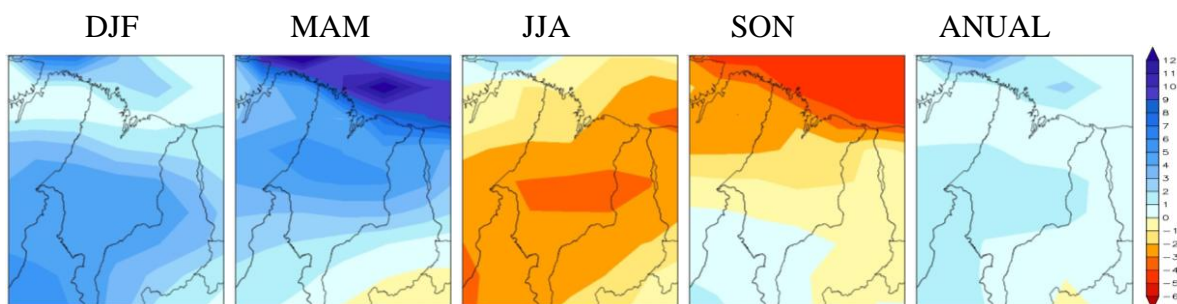
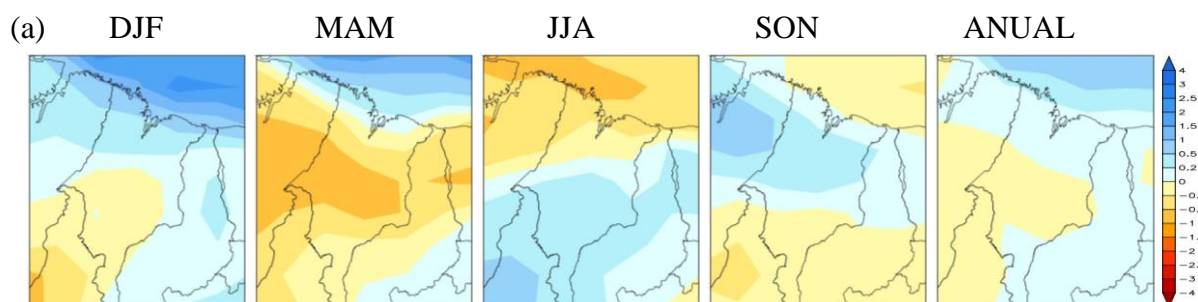


Figura 1 – Balanço de precipitação menos evaporação (mm/dia), nos períodos de Dezembro a Fevereiro (DJF), Março a Maio (MAM), Junho a Agosto (JJA) e Setembro a Novembro (SON), segundo os dados do ensemble de cinco membros da rodada histórica do modelo HadGEM2-ES. Os dados do modelo são do período de Dezembro de 1979 até 2005.

As projeções futuras de  $P - E$  apresentadas são referentes ao final do século (de novembro de 2078 a outubro de 2099), período que apresentou as maiores mudanças. Tais projeções foram feitas utilizando os quatro RCP's e estão ilustradas na Figura 2, onde a região englobada é delimitada pelas latitudes  $0^\circ$  a  $10^\circ\text{S}$  e longitudes  $50^\circ\text{W}$  a  $40^\circ\text{W}$ .

Figura 2



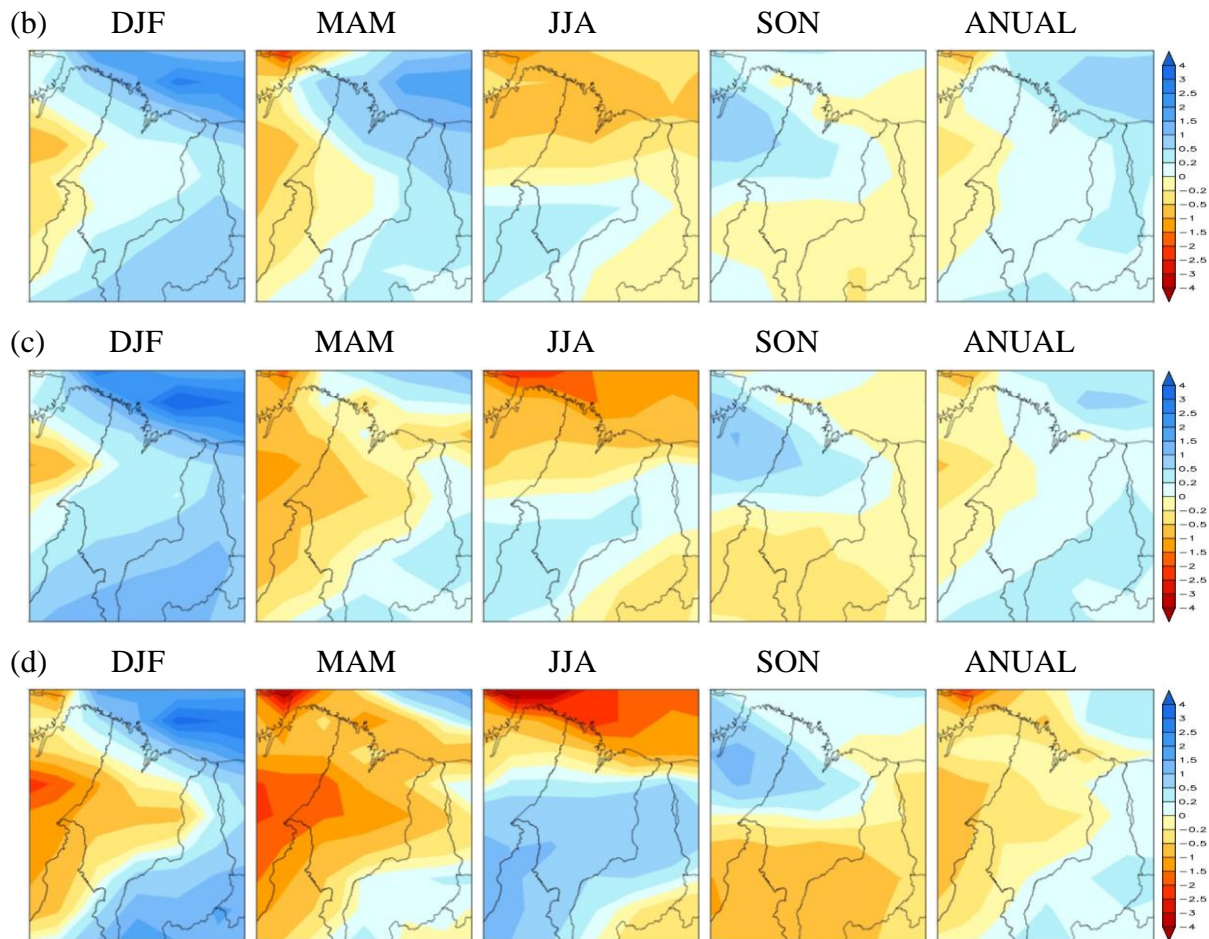


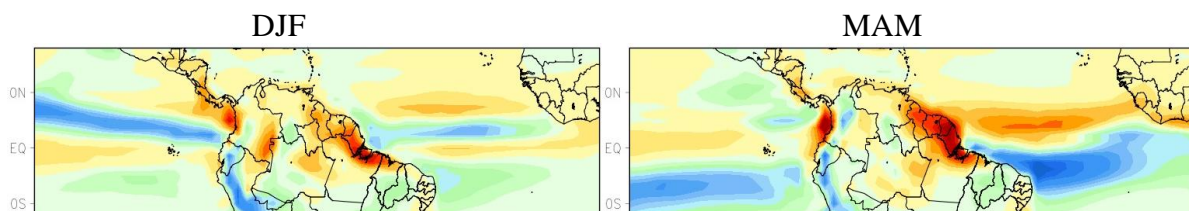
Figura 2 – Projeções futuras da variação do balanço P-E (mm/dia), utilizando a média do ensemble do modelo HadGEM2-ES, para o período de Nov/2078 – Out/2099 em relação a Dez/1984 – Out/2005, sob os cenários: (a)RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0, e (d) RCP 8.5.

Para o primeiro trimestre (DJF) é possível observar uma tendência de valores mais negativos a oeste e positivos a leste, sendo que a tendência positiva para o balanço inclui a região do CLA. O RCP 8.5 mostra as diferenças mais extremas, com até -2,5mm/dia sobre o oeste e até 4mm/dia sobre a região oceânica no nordeste do domínio considerado. Para os meses MAM pode-se notara tendência negativa do balanço sobre a porção oeste da região considerada assim como no primeiro trimestre, porém numa área maior, (incluindo a região do CLA nos RCP's 6.0 e 8.5), com valores de até -3mm/dia sobre o noroeste do domínio apresentado. Sobre o nordeste do domínio a diferença no balanço é positiva, com valores atingindo 2mm/dia sobre o oceano no RCP 4.5. No terceiro trimestre podem-se notar valores mais negativos a norte (incluindo a região do CLA) e positivos ao sul (de até -3mm/dia e até 1mm/dia, respectivamente, ambos para o RCP 8.5). Já no último trimestre a tendência é aproximadamente inversa a do terceiro, apresentando valores mais positivos ao norte

(incluindo o CLA) e mais negativos ao sul (de até 1,5mm/dia e -1mm/dia, respectivamente, os dois para o cenário RCP 8.5). De maneira geral o balanço anual mostra-se similar ao dos dois primeiros trimestres, porém mais brando com aumento de até 1mm/dia segundo os RCP's 2.6 e 4.5 na porção mais leste e uma diminuição na oeste com valores de até -2mm/dia no extremo noroeste pelo RCP 8.5. Na média anual, a região do CLA, somente apresenta diferenças de balanço P-E negativas no cenário mais pessimista, o RCP 8.5.

Com o objetivo de investigar a simulação da precipitação associada à ZCIT, foi feita a comparação entre os dados de precipitação da rodada histórica para o período de dezembro de 1979 a novembro de 2005 do HadGEM2-ES e do GPCP na região delimitada pelas latitudes 12°S a 18°N e longitudes 120°W a 0. Como um sumário dessa comparação, apenas as diferenças entre os dados do modelo e do GPCP são mostrados aqui (Fig. 3). Essa comparação mostrou que o modelo, em geral, reproduz as áreas de precipitação associadas com a ZCIT, porém com alguns erros em intensidade e posição. Em geral os valores são superestimados na região do Oceano Pacífico. Em MAM, o modelo apresenta o fenômeno conhecido como “ZCIT dupla” (Sierra et al. 2015) sobre o Oceano Pacífico. Em MAM sobre o Oceano Atlântico, o modelo apresenta a área de precipitação associada à ZCIT deslocada para sul. Em geral a precipitação associada à ZCIT sobre o Oceano Atlântico é superestimada pelo modelo. Sobre o continente há áreas de subestimativa, como a América Central em todas as estações e as vizinhanças do Amapá em DJF e MAM, por exemplo; e áreas em que o modelo superestima a precipitação, como a faixa costeira próxima à ZCIT do Oceano Pacífico.

Figura 3





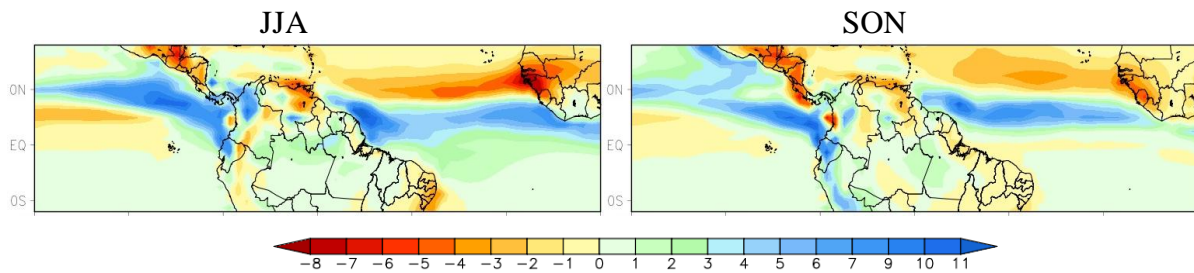
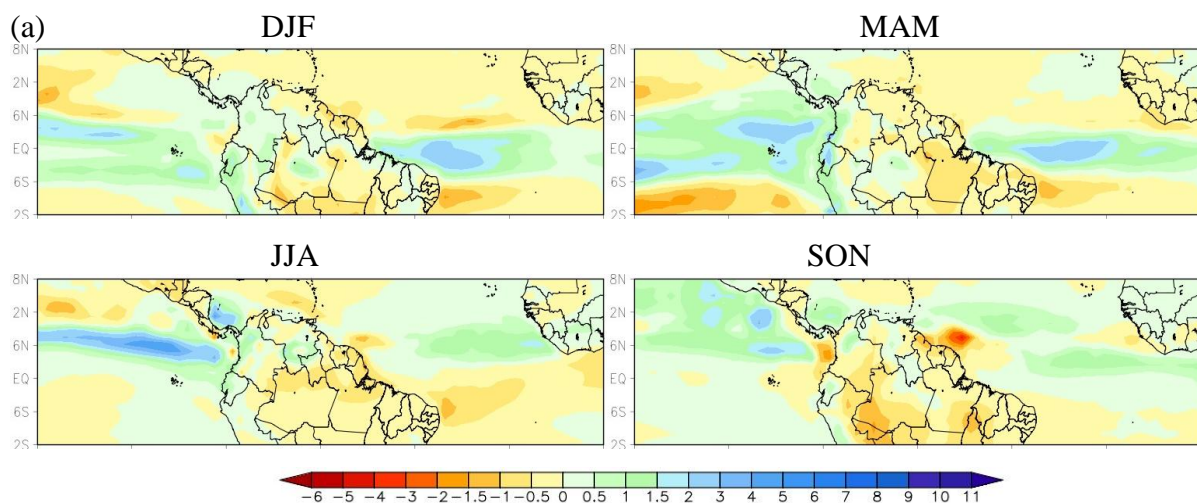


Figura 3 - Diferença da precipitação média (mm/dia), nos períodos de Dezembro a Fevereiro (DJF), Março a Maio (MAM), Junho a Agosto (JJA) e Setembro a Novembro (SON), e anual, entre os dados do ensemble de cinco membros da rodada histórica do modelo HadGEM2-ES e os da base de dados observacionais GPCP. Os dados utilizados são do período de Dezembro de 1979 até 2005.

As projeções futuras para a precipitação associada à ZCIT para o final do século XXI (de novembro de 2078 a outubro de 2099) em relação ao final da rodada histórica (de dezembro de 1984 a outubro de 2005), sob os quatro RCP's utilizados, estão apresentadas na Figura 4, onde a região englobada é a mesma da Fig. 3. Como seria esperado, por ser um cenário mais pessimista (maiores emissões de gases de efeito estufa resultando em um maior aquecimento como mostrado no relatório parcial deste projeto), o cenário RCP 8.5 indica as maiores mudanças em relação à precipitação associada à ZCIT. Na região do Oceano Pacífico, as maiores alterações indicadas para o futuro em relação ao presente/passado são para o trimestre de inverno austral (JJA), enquanto que na região do Oceano Atlântico as maiores alterações são para o verão austral (DJF). Essas alterações indicam, em geral, um deslocamento da ZCIT em direção ao sul.

Figura 4



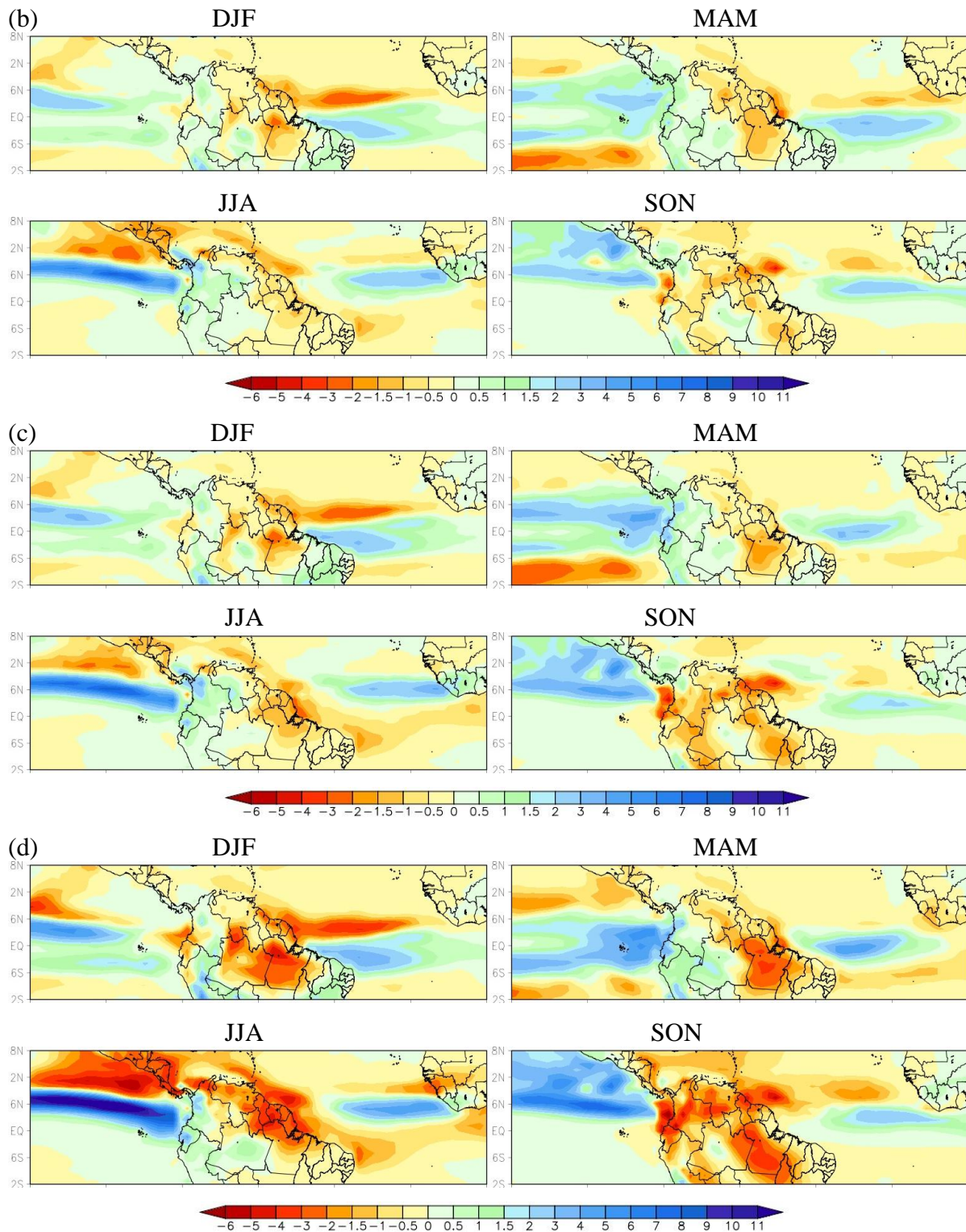


Figura 4 – Projeções futuras da variação da precipitação (mm/dia), utilizando a média do ensemble do modelo HadGEM2-ES, para o período de Nov/2078 – Out/2099 em relação a Dec/1984 – Out/2005, sob os cenários: (a)RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0, e (d) RCP 8.5.

#### 4. Conclusões

Os resultados analisados indicam claramente alterações para o balanço de vapor de água atmosférico sobre a região que envolve o CLA e a precipitação associada à ZCIT. No caso do balanço  $P - E$ , o comportamento é variável espacialmente, mas sazonalmente é possível verificar certas tendências de valores mais negativos a oeste da região estudada e mais positivos sobre a parcela leste para os dois primeiros trimestres (verão e outono austrais), sendo o segundo mais intensificado em relação ao primeiro. Há também tendências de valores mais negativos a norte e positivos ao sul para o inverno austral (JJA) e de maneira aproximadamente inversa em relação a esse, a primavera austral apresenta no geral, padrão de diferença de balanço positiva ao norte e negativa a sul da região estudada. Em específico para o local do CLA, segundo a projeção do cenário mais pessimista (o RCP 8.5), ocorre um aumento de  $P - E$  no futuro em relação ao passado/presente durante o verão e primavera austrais e uma diminuição durante outono e inverno austrais e também para o total anual. Isso indica um aumento do excesso da precipitação sobre a evaporação nos trimestres em que esse excesso já ocorre no presente (DJF e MAM, vide Fig. 1) e um aumento do excesso da evaporação sobre a precipitação quando já há déficit de precipitação (JJA e SON, vide Fig.1).

No caso da simulação histórica da precipitação associada à ZCIT, o comportamento é variável espacialmente. Pela comparação entre os dados do modelo e do GPCP foi notado que o modelo, em geral, reproduz as áreas de precipitação associadas com a ZCIT, mas houve algumas regiões em que os valores foram subestimados, principalmente sobre o continente, enquanto que em outras foram superestimados, principalmente em suas porções oceânicas. Além disso, o modelo apresenta deslocamentos da posição da ZCIT em relação ao GPCP, com uma tendência a um deslocamento geral para o sul sobre o Atlântico e uma ZCIT dupla sobre o Pacífico em MAM.

As projeções futuras para a precipitação associada à ZCIT para o final do século XXI em relação ao final da rodada histórica, sob os quatro RCP's utilizados, indicam que é sob o RCP 8.5 que ocorrem as maiores mudanças em relação à precipitação associada à ZCIT. As mudanças mais acentuadas indicam, em geral, um deslocamento da ZCIT em direção ao sul.

É importante ressaltar que esses resultados consideraram apenas um modelo. Devido a problemas técnicos, que provavelmente estão associados ao proxy do IAE, não foi possível a obtenção de novos dados para analisar projeções futuras de outros modelos climáticos do CMIP5, como era planejado inicialmente.

## Referências

Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4,1147-1167.

Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kállberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828

CLA - CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA – DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL . Disponível em: <http://www.cla.aer.mil.br/index.php/>. Acesso em: 2 de fev. 2015.

ESGF - Earth System Grid Federation - Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, Califórnia. Disponível em: <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>.

IPCC, 2007. *Climate change 2007: The physical Science basis. Contribution of working group I to the assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.



SANTOS, J. G. M. Introdução ao Grid Analysis and Display System (GrADS). São José dos Campos: INPE, 2014. 126 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.17.39-PUD). Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LD6B>. Acesso em: 3 de out. 2014.

Sierra, J. P., P. A. Arias, S. C. Vieira. Precipitation over Northern South America and Its Seasonal Variability as Simulated by the CMIP5 Models. *Advances in Meteorology*, Medellín, v. 2015. Disponível em < <http://www.hindawi.com/journals/amete/2015/634720/>>. Acesso em: 6 jul. 2015

VAN VUUREN, D. P. ET AL. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109. p.5-31, 2011.