

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

**DECKER GUZMÁN ZABALAGA**

**Clima presente e tendências climáticas usando o modelo regional RegCM4  
sobre regiões de topografia complexa dos Andes**

São Paulo

2019

**DECKER GUZMÁN ZABALAGA**

**Clima presente e tendências climáticas usando o modelo regional RegCM4  
sobre regiões de topografia complexa dos Andes**

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

**Versão corrigida. A original encontra-se disponível na unidade.**

Orientadora: Profa. Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha

São Paulo

2019

“Seja qual for o conteúdo do momento presente, aceite-o como se você o tivesse escolhido. Sempre trabalhe com ele, não contra ele. Torne-o seu amigo e aliado, não seu inimigo. Isso vai milagrosamente transformar toda a sua vida.”

Eckhart Tolle

## RESUMO

GUZMÁN, Z. D. **Clima presente e tendências climáticas usando o modelo regional RegCM4 sobre regiões de topografia complexa dos Andes.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Este estudo utilizou três simulações do RegCM4 forçado por três diferentes modelos globais (GFDL, HadGEM2 e MPI) do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) para avaliar o clima presente (1981-2005) e o cenário futuro RCP8.5 (2006-2096) sobre regiões de topografia complexa dos Andes. A avaliação do desempenho do modelo na cordilheira dos Andes (CA) foi feita através de comparações com dados de estações meteorológicas e dados interpolados (CRU - *Climate Research Unit*, CHIRPS - *Climate Hazard Group InfraRed Precipitation* e CPC-*Climate Prediction Center*) em quatro sub-regiões representativas, obtidas por análise de cluster. No clima presente, as três simulações do RegCM4 superestimam a precipitação em regiões situadas em alturas entre 3000 e 4200 m. Em geral, nas montanhas dos Andes, as amplitudes dos ciclos anuais de precipitação são maiores no RegCM4 do que nas observações. Indica que o RegCM4 simula grande disponibilidade de vapor de água na atmosfera, resultando em maiores taxas de precipitação, principalmente quando ocorre o período úmido (Dezembro, Janeiro e Fevereiro). Em termos de circulação, no clima presente os ventos em 850 hPa, através do Jato de Baixos Níveis (JBN), indicam forte convergência de massa sobre os Andes favorecendo movimentos ascendentes intensos que estaria contribuindo o aumento de precipitação nos modelos e um deslocamento para oeste da AB comparado com a reanálise (ERA-Interim). Estes fatores contribuem para explicar a superestimativa de chuva na região nas simulações. As simulações representam a variabilidade interanual de temperatura e precipitação, mas em geral, nota-se uma intensificação desse sinal em comparação com as observações. As projeções climáticas futuras em função da latitude foram analisadas em um período de 30 anos (2030-2060) e mostram predominância de tendência de aquecimento em todas as latitudes e de redução da chuva no futuro, exceto na simulação do RegCM4 forçado pelo MPI. Para a temperatura do ar, as funções densidade de probabilidade de (PDF) mostram um deslocamento para a direita no clima futuro (2030–2060), com consequente aumento de eventos extremos o que pode afetar o ciclo hidrológico na CA.

**Palavras-chave:** Região Andina, RegCM4, análise estatística, tendências climáticas



Dedico este trabalho aos meus pais Zulema e Jhonny, aos meus irmãos Abner e Edwin, a minha namorada Leslie, pilares fundamentais da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora Rosmeri Porfírio da Rocha pelos conselhos, compreensão, paciência, especialmente pelos valores como profissional e como pessoa, também pela sua disponibilidade e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Programa de Meteorologia de Pós-graduação do IAG e ao conselho Nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos recebida.

Á minha família e minha namorada pelo apoio para culminar esta etapa da minha formação.

A meus verdadeiros amigos que tornaram meus dias mais alegres, especialmente para aqueles que deixaram de lado a competitividade e compartilharam seus conhecimentos.

## ABSTRACT

GUZMÁN, Z. D. Present climate and climate trends using the regional model RegCM4 over regions of complex topography of the Andes. 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

This study used three simulations of RegCM4 forced by three different global models (GFDL, HadGEM2 and MPI) of CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) to evaluate the present climate (1981-2005) and future scenario RCP8.5 (2006-2096) over regions of complex topography like the Andes. The evaluation of the performance of the model in over Andes (CA) was made through comparisons with data from meteorological stations and interpolated data (CHIRPS) in four sub-regions, obtained by cluster analysis. In the present climate, the three RegCM4 simulations overestimate the precipitation in regions located at heights between 3000 and 4200 m. In general, in the Andes mountains, the amplitudes of annual precipitation cycles are higher in RegCM4 than in observations. It indicates that RegCM4 simulates high availability of water vapor in the atmosphere, resulting in higher precipitation rates, especially when the wet period occurs (December, January and February). In terms of circulation, in the present climate the 850 hPa winds through the Low Level Jet (JBN) indicate a strong mass convergence on the Andes favoring intense upward movements that would be contributing to the increase of precipitation in the models and a displacement towards the west compared to the reanalysis (ERA-Interim). These factors contribute to explain the overestimation of rainfall in the region in the simulations. The simulations represent the interannual variability of temperature and precipitation, but in general, an intensification of this signal is observed in comparison with the observations. Future latitudinal projections were analyzed over a 30-year period (2030-2060) and show a predominance of warming trend at all latitudes and rainfall reduction in the future, except for the simulation of RegCM4 forced by MPI. For air temperature, the probability density functions of (PDF) show a shift to the right in the future climate (2030-2060), with consequent increase of extreme events which can affect the hydrological cycle in the CA.

**Key Words: Andean Region, RegCM4, statistical analysis, climate trends**

# Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1.	Objetivos .....	15
1.2.	Revisão Bibliográfica.....	16
<b>2.</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
2.1.	Descrições dos dados .....	25
2.1.1.	CPC .....	25
2.1.2.	CRU.....	25
2.1.3.	CHIRPS .....	26
2.1.4.	ERA-Interim.....	26
2.1.5.	Dados de estações meteorológicas .....	26
2.2.	Metodologia.....	28
2.2.1.	Análise de cluster .....	28
2.2.2.	Descrição do modelo RegCM4 e simulações Climáticas .....	30
2.2.2.3.	Condição inicial /contorno GFDL.....	31
2.2.2.4.	Condição inicial /contorno HadGEM2.....	31
2.2.2.5.	Condição inicial /contorno MPI .....	31
2.2.3.	Análises.....	32
2.2.4.	Diagrama de Taylor .....	32
2.2.5.	Variabilidade interanual e efeitos de El Niño-Oscilação sul.....	34
2.2.6.	Tendências futuras de temperatura e precipitação.....	34
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
3.1.	Topografia do modelo versus topografia de estações meteorológicas .....	35
3.2.	Perfil Vertical .....	37
3.3.	Clima Presente.....	42
3.3.1.	Padrão sazonal da temperatura média .....	42
3.3.2.	Padrão Sazonal da Precipitação e Circulação.....	45
3.4.	Ciclo anual .....	53
3.4.1.	Ciclo anual da temperatura média.....	55
3.4.2.	Análise do ciclo anual da precipitação acumulada.....	59
3.5.	Variabilidade Climática: 1981-2005 .....	66
3.5.1.	Temperatura.....	66

3.5.2.	Precipitação .....	72
3.6.1.	Densidade de probabilidade de temperatura: clima presente e futuro .....	81
3.7.	Tendências futuras de precipitação: 2030-2060 .....	84
3.8.	Tendências da variabilidade interanual de temperatura: 2006-2096.....	87
3.9.	Tendências da variabilidade interanual de precipitação: 2006-2096 .....	89
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>92</b>
<b>5.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>REFÊRENCIAS.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>.....</b>	<b>101</b>
APÊNDICE A: .....	.....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Topografia (sombreado, m) e localização dos países Bolívia e Peru na e das regiões mencionadas no texto: ZSE-P (Zona Selva- Peru), ZC-P (Zona Central-Peru), Bol-Per (Boliviano-Peruano), ZPA-B (Zona Pando-Bolívia), ZA-B (Zona Altiplano-Bolívia, ZSC-B (Zona Santa Cruz -Bolívia).	17
Figura 2 Representação da maior resolução da grade horizontal e vertical de um MCR. Fonte: <a href="https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/climate-model">https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/climate-model</a> .....	21
Figura 2.1. Localização das estações meteorológicas. Círculos vermelhos indicam as estações com apenas observações de temperatura e triângulos celestes representam estações com apenas precipitação.....	29
Figura 2.2 Processo de análise de cluster aplicada para as estações meteorológicas.....	30
Figura 2.4 Concentração de forçamento radiativo para distintos cenários. Fonte: (IPCC, 2013).....	32
Figura 2.5 Diagrama de Taylor, c constante (linha verde), $\cos(\alpha)$ constante (linha azul) e a constante (linha preta). Adaptado de <a href="http://www.lamma.ufrj.br/sites/spo/atlasul/scripts/taylor/diagrama.php">http://www.lamma.ufrj.br/sites/spo/atlasul/scripts/taylor/diagrama.php</a> .....	34
Figura 3.1 Comparação entre altitude representada pelo modelo RegCM4 e altitude das estações meteorológicas.....	35
Figura 3.2 Temperatura (em °C) média anual (1981-2005) versus elevação para: (a) dados das estações meteorológicas, (b) RegGFDL, (c) RegHadGEM2 e (d) RegMPI.....	36
Figura 3.3 Localização de corte vertical na zona Andina de Bolívia e Peru.....	38
Figura 3.4 – Seção vertical da climatologia (1981-2005) sazonal de umidade especifica (g/kg) para a reanálise Era-Interim (a) e as simulações RegGFDL (c), RegHadGEM2 (e), RegMPI (g) no verão, e para a reanálise Era-Interim (b) e as simulações RegGFDL (d), RegHadGEM2 (f), RegMPI (h) no inverno.....	40
Figura 3.5 Diagrama Hovmoller para o ciclo anual de precipitação no período (1981-2005). (a) Era-Interim, (b) RegGFDL, (c) RegHadGEM2 e (d) RegMPI.....	41
Figura 3.6 Climatologia (1981-2005) sazonal de temperatura (°C) para DJF, CRU (a) modelos RegGFDL(b), RegHadGEM2(c), RegMPI(d), e diferença entre temperatura do ar observada CRU e as simulações(e), (f) e (g).....	43
Figura 3.7 Climatologia (1981-2005) sazonal de temperatura (°C) para JJA, CRU (a) modelos RegGFDL(b), RegHadGEM2(c), RegMPI(d), e diferença entre temperatura do ar observada CRU e as simulações(e), (f) e (g).....	44
Figura 3.8 Climatologia (1981-2005) de verão (DJF) do vento em 200 hPa e precipitação (mm/mês) para observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.....	49
Figura 3.9 Climatologia (1981-2005) de inverno (JJA) do vento em 200 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.....	50

Figura 3.10 Climatologia (1981-2005) de verão (DJF) para o vento em 850 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.....	51
Figura 3.11 Climatologia (1981-2005) de inverno (JJA) para o vento em 850 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.....	52
Figura 3.12 Diferença (bias) entre ensemble climatológico (1981-2005) de precipitação (mm/mês) simulado simulações (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) e observados (CRU, CHIRPS, CPC) para DJF (a) e para JJA (b). ....	53
Figura 3.13 Resultado da análise de cluster. Os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as cores identificam os 4 clusters (zonas) analisadas para temperatura média.....	54
Figura 3.14 Ciclo anual climatológico (período 1981-2005) da temperatura média mensal e respectivo diagrama de Taylor observado (Estações e CRU) e simulado (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) para os: cluster 1 (a, b), cluster 2 (c, d), cluster 3 (e, f), cluster 4 (g, h).....	58
Figura 3.15 Resultado da análise de cluster. (a) Dendograma, (b) Boxplot da precipitação média anual e em (c) os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as cores identificam os 4 clusters (zonas) identificados para precipitação.....	60
Figura 3.16 Ciclo anual climatológico (período 1981-2005) da chuva média mensal (mm) e respectivo diagrama de Taylor observado (Estações, CHIRPS, CPC e CRU) e simulado (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) para os: cluster 1 (a, b), cluster 2 (c, d), cluster 3 (e, f), cluster 4(g, h).....	62
Figura 3.17 Anomalia interanual o clima presente (1981-2005) de temperatura média mensal para as estações meteorológicas e para cada cluster. As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño e La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.....	66
Figura 3.18 Anomalias interanuais de temperatura para as estações meteorológicas (linha preta) e CRU (linha azul) para o cluster 1 (título vermelho), cluster 2(título azul), Cluster 3(título preto), cluster 4(título verde). As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño ou La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.....	68
Figura 3.19 Anomalias interanuais de temperatura para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI. Cada figura corresponde a cluster 1, cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4.....	70
Figura 3.20 Limiares superiores, percentil de 75%(vermelho), e inferiores, percentil de 25%(azul), das anomalias interanuais de temperatura para as estações, simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) e CRU para: cluster 1 (a), cluster 2 (b), cluster 3 (c) e cluster 4 (d).....	71
Figura 3.21 Anomalia interanual no clima presente (1981-2005) de precipitação mensal para as estações meteorológicas para cada cluster. As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño e La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.....	72

Figura 3.22 - Anomalias interanuais de precipitação acumulada para as estações meteorológicas (linha preta), CRU (linha vermelha), CHIRPS (linha amarela), CPC (linha laranja) obtidas no: cluster 1 (título vermelho), cluster 2 (título azul), cluster 3 (título preto), cluster 4 (título verde). As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño ou La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.....	73
Figura 3.23 Anomalias interanuais de precipitação acumulada para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI nos clusters 1, 2, 3, 4.....	75
Figura 3.24 Limiares superiores dos percentis superiores 75% (vermelho) e inferiores 25% (azul) das anomalias interanuais para estações, CRU, CHIRPS, CPC e simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) para: cluster 1(a), cluster 2(b), cluster 3(c) e cluster 4(d).....	77
Figura 3.25 Variação meridional da tendência de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegGFDL. (a) Barras indicam a tendência de temperatura (°C) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.....	78
Figura 3.26 Variação meridional da tendência de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegHadGEM2. (a) Barras indicam a tendência de temperatura (°C) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.....	79
Figura 3.27 Variação meridional da tendência anual de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegMPI. (a) Barras indicam tendências de temperatura em função à latitude de cada estação meteorológica para 4 cluster ou regiões. (b) Localização das estações meteorológico.....	80
Figura 3.28 PDF para temperatura média anual dos modelos RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI no clima presente (1981-2005; linhas contínuas) e futuro (2030-2060; linhas tracejadas). (a) Cluster 1, (b) Cluster 2, (c) Cluster 3 e (d) Cluster 4.....	81
Figura 3.29 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegGFDL. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.....	85
Figura 3.30 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegHadGEM2. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.....	86
Figura 3.31 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegMPI. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.....	86
Figura 3.32 Anomalia interanual futura (2006-2096) de temperatura média mensal para as simulações (a) RegGFDL, (b) RegHadGEM2 e (c) RegMPI. Cada painel inclui o cluster 1, Cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4. A linha pontilhada é a regressão linear da média dos 4 clusters.....	88
Figura 3.33 Anomalias interanuais futuras (2006-2096) de precipitação para as simulações (a) RegGFDL, (b) RegHadGEM2 e (c) RegMPI. Cada figura corresponde a cluster 1, Cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4. A linha	



pontilhada é a regressão linear da média dos 4 cluster.....90

Figura A1 Bias de precipitação presente (1981-2005) no verão entre (a) RegGFDL-CRU, (d) RegHadGEM2-CRU, (g) RegMPI-CRU, (b) RegGFDL-CHIRPS, (e) RegHadGEM2-CHIRPS, (j) RegMPI-CHIRPS, (c) RegMPI-CPC, (f) RegGFDL-CPC, (j) RegHadGEM2-CPC.....101

Figura A2 Bias de precipitação presente (1981-2005) no verão entre (a) RegGFDL-CRU, (d) RegHadGEM2-CRU, (g) RegMPI-CRU, (b) RegGFDL-CHIRPS, (e) RegHadGEM2-CHIRPS, (j) RegMPI-CHIRPS, (c) RegMPI-CPC, (f) RegGFDL-CPC, (j) RegHadGEM2-CPC.....102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.2.1 Biases (ou erros médios) de temperatura (°C) média anual e sazonal para o cluster 1 calculados em relação às estações meteorológicas e ao CRU. ....	55
Tabela 3.2.2 - Similar a Tabela 3.2.1, mas para o cluster 2.....	56
Tabela 3.2.3 - Similar a Tabela 3.2.1, mas para o cluster 3.....	57
Tabela 3.2.4 - Similar à Tabela 3.2.1, mas para o cluster 4.....	57
Tabela 3.2.5 Bias de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 1.....	60
Tabela 3.2.6 Bias de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 2.....	63
Tabela 3.2.7 Idem à Tabela 3.2.5, mas o cluster 3.....	64
Tabela 3.2.8 Bias de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 4.....	65
Tabela 3.8.1 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para o cluster 1.....	82
Tabela 3.8.2 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para o cluster 2.....	83
Tabela 3.8,3 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para cluster 3.....	83
Tabela 3.8.4 Temperatura media anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para o cluster 4.....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

AB: Alta da Bolívia

AS: América do Sul

APS: Anticiclone do Pacífico Sul

CA: Cordilheira dos Andes

CHIRPS: Climate Hazards infrared precipitation with stations

CRU: Climate Research Unit

CPC: Climate Prediction Center

DECADE: Data on climate and Extreme weather for the central Andes

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather forecast

ENOS: El Niño-Oscilação Sul

JBN: Jato de Baixos Níveis

LFA: Laboratório de Física de la Atmósfera

LT: Lago Titicaca

MCR: Modelo de Circulação Regional

MS: Monção da América do Sul

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

PRECIS: Providing Regional Climates for Impacts Studies

PDF: Probability Density Function

Regional Climate Model versão 4: RegCM4

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos climáticos estão em constante desenvolvimento e regiões como os Andes ainda há erros tanto em simulações de tempo e clima. Hoje, com computadores mais potentes é possível utilizar “caixas” muito menores, ou seja, já existe experimentos numéricos de modelos globais com resolução de poucos quilômetros (4 km; Sotah et al, 2014). No entanto, é necessário entender que ao aumentar a resolução significa colocar quadradinhos menores (mais pontos de grade) e que exige mais recursos computacionais, o que normalmente é realizado por processamento paralelo (supercomputador). O importante é saber que os métodos numéricos de solução das equações, tanto para grades latitude-longitude quanto espectral, devem ser rápidos o suficiente porque a previsão do tempo tem que estar pronta antes de acontecer (tem que rodar rápido), e supercomputadores para simulações com grades mais refinadas para poucos centros de previsão do mundo.

Uma solução para utilizar altas resoluções para aplicações climáticas é a utilização de modelos climáticos regionais (MCRs) em que a ideia nasceu de um modelo de previsão, conforme proposto na década de 80 por Giorgi et al. (1990) e Dickinson et al. (1989). Durante as últimas décadas, muitas pesquisas mostraram que MCR é uma metodologia prática para fazer estudos e projeções do clima, utilizando a técnica de regionalização, e desta forma fornecer informação climática em uma escala apropriada (Marengo et al. 2010). O processo de avaliação e validação de simulações climáticas regionais sobre a América do Sul (AS) é necessário para entender a qualidade das mesmas no clima presente (Reboita et al., 2014; Llopart et al., 2014) e assim avaliar a habilidade de projeções futuras para simular possíveis mudanças regionais no clima, como normalmente é feito em várias regiões do globo. (Giorgi et al., 2009)

A AS, e especificamente a Bolívia e Peru, estão enfrentando na atualidade diferentes ameaças relacionadas às secas e inundações associadas aos eventos El Niño-Oscilação do Sul (ENSO) afetam milhares de pessoas e levam às perdas econômicas na região. Na parte dos Andes, as geleiras estão

derretendo rapidamente e afetam o abastecimento de água potável e a produção agrícola (Davila, 2016). Além disso, há evidências da retração das geleiras e mudanças nos padrões sazonais nos Andes (Andrade et al., 2018; Davila, 2016). A Bolívia é considerada extremamente vulnerável às mudanças do clima (Seiler et al., 2013). A intensidade da chuva gera impactos econômicos muito fortes nas populações da região andina (Bazo, 2014). Uma ferramenta muito útil que pode fornecer informações que contribuem para mitigar os efeitos das mudanças climáticas é a modelagem numérica do clima (Ynoue, 2017).

As características de relevo de continente na AS determinam um clima regional característico, o qual não é observado em outras regiões do globo, tornando o processo de adaptação e validação de modelos atmosféricos. A presença da Cordilheira dos Andes (CA) na AS provoca uma circulação muito característica sobre os países com topografia acidentada incluindo as regiões centro-oeste e sudoeste do Brasil e Bolívia (Reboita et al. 2012). A extensão cobre mais de 7000 km, sendo que a latitude média atinge cerca de 4000 m.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é avaliar e estudar a climatologia e tendências climáticas nos cenários regionalizados do Regional Climate Model versão 4 (RegCM4) sobre os Andes (região andina), especialmente nas regiões da Bolívia e Peru.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Validar as simulações a partir de dados observados sobre a Bolívia e Peru no clima presente, ou seja, para o período 1981-2005;
- Validar as simulações do vento considerando análises de circulação em grade regular;
- Analisar a acurácia das simulações climáticas para representar o ciclo anual da temperatura média e a precipitação;
- Analisar a habilidade das simulações em representar a variabilidade climática interanual observada;

- Avaliar o sinal de mudanças climáticas no cenário RCP8.5 sobre região de topografia complexa;

As regionalizações com o RegCM4 foram realizadas com espaçamento de grade horizontal de ~50 km, em um domínio que abrange toda a AS conforme descrito em Llopart et al. (2014). Para o período de 1970-2100, as simulações foram forçadas por três modelos globais (HadGEM2, MPI e GFDL) no cenário RCP8.5. Por isso, esta pesquisa pretende analisar e avaliar o clima atual (temperatura média e precipitação acumulada), e também avaliar tendências climáticas futuras na região Andina.

Em muitas situações, os governos nacionais são chamados para tomar decisões de mitigação e adaptações às mudanças climáticas. Os ciclos de chuva e temperatura podem ser afetados pelas mudanças climáticas e para isso é necessário gerar estratégias para as mudanças nos costumes da agricultura. Desta forma, os resultados desta pesquisa podem contribuir à prevenção e mitigação dos impactos nas zonas do Peru e Bolívia porque é difícil separar a sinal das mudanças da variabilidade natural originados por mudanças climáticas e eventos extremos associados.

## **1.2. Revisão Bibliográfica**

Este capítulo apresenta uma revisão da evolução dos estudos sobre o clima em regiões de topografia complexa. Além disso, apresenta uma revisão bibliográfica dos estudos realizados com modelos climáticos regionais (MCRs) e projeções climáticas para a AS.

### **1.2.1. O clima da Bolívia e do Peru**

A CA é uma cadeia montanhosa situada na (AS) que tem uma extensão de 7500 km na direção meridional e 241 km de largura, atravessa a Argentina (18%), Bolívia (19.8%), Chile (16.6%), Equador (5.5%), Colômbia (10.9%), Peru (28.6%) e Venezuela (0.6%), sendo a cordilheira mais longa da terra (FAO et al., 2014). A Bolívia e Peru juntos têm quase a metade da extensão na direção meridional. A influência da região andina Boliviano-Peruano no clima da tem implicações em estudos do clima passado, presente e futuro (Andrade et al., 2018).

A AS, e em particular a região da Bolívia e Peru, apresenta topografia complexa (Figura 1), o que contribui com a não homogeneidade da altitude, latitude espacial e temporal de variáveis meteorológicas tais como, temperatura e precipitação. Esta região de topografia complexa possui ainda uma grande extensão latitudinal, e, portanto possui diferentes sistemas atmosféricos que contribuem para a não homogeneidade espacial e temporal do clima. A CA atua como uma barreira topográfica, de forma que correntes de ar tende a ascender ao se deparar com a forçante topográfica e, nesse processo, pode ocorrer formação de nuvens, chuvas a barlavento (lado onde o ar ascende) e condições secas a sotavento (lado onde o ar desce). Deve-se notar que após cruzar a topografia a corrente de ar se aquece adiabaticamente e seca ao subsidir, dificultando a formação de nuvens (Reboita et al., 2012).

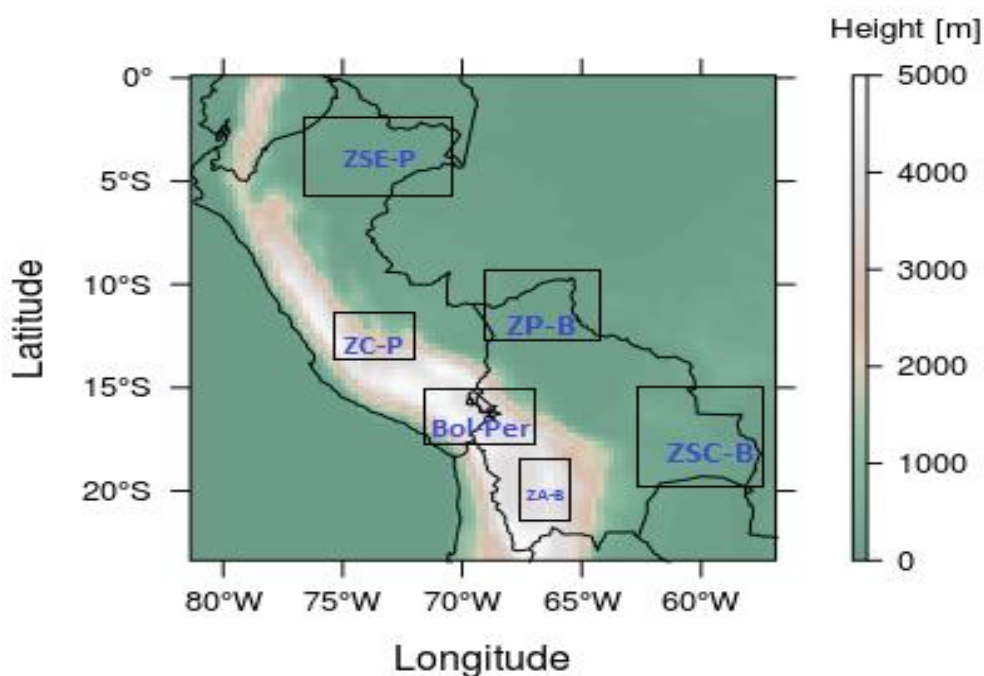


Figura 1 Topografia (sombreado, m) e localização dos países Bolívia e Peru e das regiões ZSE-P (Zona Selva- Peru), ZC-P (Zona Central-Peru), Bol-Per (Boliviano-Peruano), ZPA-B (Zona Pando-Bolívia), ZA-B (Zona Altiplano-Bolívia, ZSC-B (Zona Santa Cruz -Bolívia).

A Bolívia e Peru estão localizados na zona tropical entre a linha do equador e trópico de Capricórnio compreendendo, respectivamente, as latitudes de 00°01' S e 22°54'1 S.

O clima na Bolívia é fortemente influenciado por sua localização geográfica, sua orografia e sua geomorfologia (Andrade & Blacutt, 2010). A temperatura e a precipitação dependem fortemente da distribuição da altitude, uma vez que a topografia da Bolívia é muito variável e desempenha um

papel muito importante no clima. Quase dois terços da Bolívia, aproximadamente 60%, encontra-se em regiões com menos de 500 metros acima do nível do mar, 24% está entre 500 e 3500 metros acima do nível do mar e os restantes 16% acima dos 3500 metros acima do nível do mar, que corresponde à zona andina (Andrade & Blacutt, 2010).

A precipitação na Bolívia depende fortemente da umidade proveniente da Amazônia e transportada pelo JBN que vem do oeste em 850 hPa no verão (Marengo et al, 2004) e, portanto, podem ser identificadas e divididas em duas estações: estação úmida (Dezembro, Janeiro, Fevereiro) e seca (Junho, Julho, Agosto) sendo que 70% da precipitação acontece nos meses de verão (Garreaud et al., 2003), enquanto no inverno há um fluxo intenso e quase permanente de ar seco de oeste que inibe quase completamente a precipitação (Andrade & Blacutt, 2010). O altiplano boliviano apresenta invernos secos e verões chuvosos muito marcantes e no verão processos convectivos de grande intensidade que geram tempestades elétricas são causados pelo aquecimento da superfície do altiplano na Bolívia. Na região tropical da Bolívia tem-se invernos secos e verões muito chuvosos, nesta região as frentes frias vindas do sul contribuem com o aporte de umidade na estação seca. O Chaco tem um clima quente com invernos secos, a principal característica desta região é a presença do Jato de Baixos Níveis (JBN). O JBN é uma corrente de ventos mais fortes que contribui para transportar umidade dos trópicos para os subtropicais da AS (Reboita et al., 2006). O clima na Bolívia varia com o aumento da altitude desde clima tropical até o de um deserto frio, com temperatura média anual que varia entre 0° a 30°C (SENAMHI et al., 2009).

O Peru está localizado na zona tropical e também é influenciado por diversos controladores climáticos como o anticiclone do Pacífico sul (APS), a corrente oceânica superficial fria de Humboldt, a Zona de convergência intertropical (ZCIT), a corrente oceânica do Niño, a Bacia Amazônica e a Cordilheira Andina CA contribuem para a diversidade do clima (Bazo et al., 2014). O APS é um sistema atmosférico, que atua sobre o oceano Pacífico tropical-subtropical, o que influencia no clima árido e subtropical com temperaturas frias e pouca precipitação no inverno, afetando na pesca, agricultura e as atividades aerocomerciais do país. A ZCIT influencia o clima árido tropical do litoral



peruano próximo da zona norte e juntamente com a corrente do Niño contribui para gerar precipitação nesta região. Da mesma maneira que a Bolívia, a variabilidade espacial do clima está associada com a altitude. O Peru tem uma topografia bem acidentado devido à presença da CA, esta última pode ser dividida em três sub-regiões: costa, serra e selva. Nas áreas perto dos lagos andinos existe uma circulação de mesoescala com um incremento das chuvas e da temperatura, desde que durante o dia o ar flui fora dos lagos, então nos lagos predominam céu limpo e bastante subsidência. Pela noite, o fluxo de ar torna-se da terra para o lago, gerando nebulosidade e precipitação (Chuchón, 2016).

A CA possui formas de relevo muito variadas. Além disso, a AS é circundada a oeste pelo Oceano Pacífico e a leste pelo Oceano Atlântico, e estes fatores proporcionam o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos que contribuem para a não homogeneidade climática da região (Reboita et al., 2012).

Walsh et al. (1993) realizaram experimentos numéricos para estudar a influência da CA na circulação geral no Hemisfério Sul. Os autores mostraram que existe um aumento da temperatura sobre as regiões onde a topografia foi removida. Há também uma área de aumento significativo sobre o Brasil central, causada pela expansão da região de altas temperaturas sobre a Amazônia associada às baixas altitudes. A remoção dos Andes também aumenta a precipitação na região da costa oeste, atualmente seca, entre 0° e 10°S, provavelmente porque a remoção da montanha permite o aumento do transporte de umidade pelos ventos predominantes da região da Amazônia.

A monção da América do sul está baseada principalmente em reversões estacionais na direção dos ventos as monções na AS organizam as chuvas no verão e a ocorrência de invernos secos na maior parte do continente. Segundo Mendonça et al. (2017) o aumento da convecção, que caracteriza o estabelecimento das monções, se inicia, em média, nos primeiros 15 dias do mês de novembro a data de início das monções pode sofrer variação em função da influência do fenômeno ENSO.

### **1.2.2. Simulações climáticas regionais nos Andes e América do Sul**

Na atualidade, os resultados dos modelos globais mostraram-se insuficientes para responder a questões de escalas menores, em função da baixa resolução horizontal que utilizam. Para aumentar a

resolução, são utilizados modelos de circulação regional (MCR) baseados em técnicas de maior regionalização (Figura 2). Da mesma forma que os modelos em escala global, os fenômenos que ocorrem em escalas menores devem ser parametrizados nos MCRs. Assim como nos modelos de circulação global, a região andina representa um grande desafio até mesmo para os MCRs, já que os eventos de brisa vale-montanha ocorrem em escalas menores e não podem ser adequadamente capturados mesmo por MCRs (Giorgi et al., 2012). Nos dias atuais, os MCRs estão sendo executados com espaçamento maior entre  $0,5^\circ$  e  $0,2^\circ\text{S}$  (aproximadamente entre 50 e 20 km perto do equador). Existem várias técnicas para downscaling climático. Na técnica de regionalização dinâmica os MCRs são aninhados a um modelo para simular regiões menores que a global e resolvem basicamente as mesmas equações dos modelos globais, mas utilizando espaçamento de grade mais refinado. Outra técnica consiste em desenvolver regionalização estatística. Neste caso, séries temporais são extraídas de modelos globais e métodos estatísticos, juntamente com observações locais do clima passado, permitem reconstruir os padrões climáticos em escalas espaciais mais refinadas (Giorgi et al., 2009).

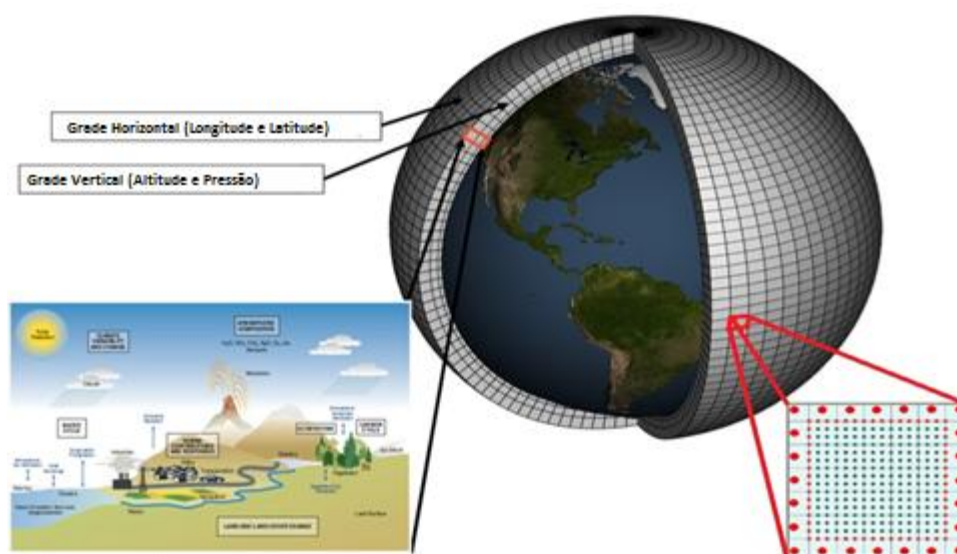


Figura 2 Representação da maior resolução da grade horizontal e vertical de um MCR. Fonte: <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/climatemodel>.

Apesar dos avanços nos modelos climáticos e na capacidade dos computadores, os modelos não representam perfeitamente, isto não deve ser atribuído a imperfeições dos modelos, mas essencialmente ao fato de que a atmosfera é um sistema caótico, portanto, exigem validação. A

validação é realizada comparando os resultados de simulações com observações locais (estações meteorológicas de superfície) ou análises em ponto de grade. Para uma validação adequada em regiões montanhosas e com fortes gradientes de altitude é necessário contar com uma alta densidade de estações meteorológicas. No entanto, a distribuição de estações de superfície na região andina está longe de ser densa. Os dados disponíveis necessitam de uma avaliação prévia por meio de testes de consistência.

No período seco, devido ao deslocamento para norte da ZCIT e da desorganização da AB, que controlam as condições térmicas e a precipitação, a umidade diminui muito (Vuille et al., 2003) na região andina. As tendências históricas mostram uma inclinação positiva na temperatura máxima e mínima para o século XX na região andina (Urrutia et al., 2009). Nas maiores altitudes, o aquecimento foi maior comparado com a parte leste mais baixa da CA, porém menor que no lado oeste (Garreaud et al., 2003).

Urrutia et al. (2009) analisaram projeções climáticas nos Andes usando um MCR e avaliando as variáveis temperatura e precipitação. O MCR simula adequadamente a variabilidade espaço-temporal de precipitação e temperatura, mas apresenta bias frio e úmido, em particular ao longo da encosta andina oriental durante a estação chuvosa (dezembro-fevereiro). Projeções para o século XXI indicam um aquecimento significativo nos Andes tropicais, que é maior em altitudes mais elevadas.

Sobre a Bolívia, Andrade et al. (2010) avaliaram o modelo PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*), usando espaçamento de grade horizontal de 50 km. Comparações do PRECIS com dados mensais observados no período 1961-1990 mostraram um bom desempenho para temperatura e a precipitação acumulada em zonas planas (regiões com altura inferior a 500 metros acima do nível do mar (manm)). No entanto, o modelo superestima a precipitação nas zonas de altura intermediária (entre 500 e 3500 manm) e também na zona andina (localizada a uma altura maior que 3500 manm).

Chacón et al. (2011) avaliaram dois modelos climáticas hidrostático e não hidrostático (PRECIS e TL959) sobre o Equador. Os modelos climáticos representam a climatologia observada

realisticamente, mas os menores erros ocorrem nas zonas baixas onde não existem zonas com montanhas. O modelo hidrostático PRECIS em geral teve melhor desempenho do que TL959. O problema foi nos ventos muito intensificados pela presença de montanhas e ativação excessiva da convecção que gerou muita chuva na zona andina.

Giorgi (2012) descreveu a nova versão do modelo RegCM4 que incluiu novo esquema para resolver processos de interação superfície terrestre-atmosfera, camada limite planetária, esquemas de fluxos turbulentos ar-terra e convecção. Além disso, o modelo inclui um esquema de aerossol simplificado como: carbono negro,  $SO_4$ , etc. Os resultados indicaram que os experimentos com o RegCM4 melhoraram em muitos aspectos comparado com a primeira versão. O problema de precipitação na escala da grade foi resolvido incluindo uma equação de previsão água de nuvens que ajudou a não ter chuva excessiva, especialmente em simulações de alta resolução. Estudos feitos por Reboita et al. (2014), o modelo mostrou um desempenho razoavelmente bom, mas alguns desvios significativos foram encontrados para a precipitação o com melhor desempenho com a convecção mista (MIT e Tiedtke) e o esquema de superfície (BATS e CLM), enquanto para a temperatura o desempenho foi melhor com a convecção (MIT Cumulus) e o esquema de superfície (CLM).

Mudanças climáticas na Bolívia foram também analisadas usando 35 modelos de circulação global (GCMs) do CMIP3 e CMIP5 (a terceira e quinta fases do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados) desde que o país vem enfrentando inúmeras ameaças relacionadas ao clima (Seiler et al.,2013). Um dos problemas é a retração rápida das geleiras nos Andes. Os resultados do trabalho projetaram um aumento de temperatura (2,6-6,05°C) sobre a Bolívia. Nas regiões baixas, as mudanças nas chuvas anuais permaneceram incertas para o CMIP3, enquanto que as do CMIP5 mostraram estar mais inclinadas a diminuir a chuva (29%). Nos Andes, o CMIP3 tende a projetar diminuição da chuva (-19%) enquanto que o CMIP5 indica tendência positiva (+20%) de precipitação durante a estação úmida.

Bazo (2014) analisou projeções climáticas e a relação com o fenômeno ENSO sobre o Peru utilizando 5 diferentes simulações de MCRs. Estas foram avaliadas para as variáveis temperatura e

precipitação. Para as projeções futuras (2015-2040) e (2075-2100), Os resultados de Bazo (2014) mostraram que algumas simulações regionais mantêm o padrão de configuração em que superestimam a precipitação, embora qualitativamente sejam capazes de reproduzir a distribuição espacial, associando que a resposta da precipitação de cada parametrização de superfície interage de um jeito diferente ao esquema de convecção. No caso das temperaturas, as simulações são bastante coerentes na reprodução do padrão espacial de temperaturas, porém, quantitativamente, certas diferenças são observadas.

A tendência futura das geadas na serra peruana foi avaliada por Davila (2016) a partir de simulações do RegCM4 no cenário RCP 8.5. Para reduzir erros, foi aplicada a técnica estatística *perfect prog* no clima presente (1971-2005) que depois foi utilizada nas projeções do clima futuro (2060-2090). Os resultados mostraram que no clima presente todas as simulações de temperatura mínima apresentam bias quente comparado com as observações. O uso do *perfect prog* ajudou a diminuir este bias quente. As projeções futuras do RegCM4 no RCP8.5 indicam uma tendência de diminuição nas geadas.

Llopart et al. (2017) avaliaram o modelo RegCM4 com duas parametrizações de superfícies terrestre sobre a AS. Uma simulação utilizou a *parametrização Biosphere – Atmosphere Transfer Scheme* (RegBATS) e a outra o *Community Land Model version 3.5* (RegCLM). Os resultados da avaliação mostraram que o RegCLM simula valores mais próximos das observações do que RegBATS. Esta simulação fornece grandes quantidades de vapor d'água à atmosfera (maior evapotranspiração) e tem energia disponível para aumentar a espessura da camada limite e fazer com que ele atinja mais frequentemente o nível de convecção livre, resultando em maiores taxas de precipitação.

Andrade et al. (2018) desenvolveu um atlas do clima e eventos extremos do Altiplano Central baseado em 50 estações no altiplano boliviano-peruano no período 1981-2010. Este atlas inclui as variáveis a temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação acumulada. Além disto, o atlas inclui uma análise de uma simulação com *Weather Research and Forecasting* (WRF), em resolução

refinada, de um dia que aconteceu evento extremo de chuva em La Paz que causou uma inundação na cidade. O modelo reproduziu conseguiu uma abrupta incursão de ar úmido em torno 12 horas antes do evento de granizo, mas a intensidade da precipitação e granizo simulada foi muito baixa.

## 2. DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os dados utilizados nas análises realizadas, o modelo RegCM4, e a metodologia empregada no presente trabalho.

### 2.1. Descrições dos dados

Na análise da climatologia sazonal e ciclo anual de temperatura média e precipitação são utilizados os dados do *Climate Prediction Center* (CPC), *Climate Research Unit* (CRU), *Climate Hazards infrared precipitation with stations* (CHIRPS), e dados de estações meteorológicas (referidos a partir daqui como dados de estações) fornecidos pelo “Laboratório de Física de la Atmósfera” (LFA) a través do projeto DECADE (*Data on climate and Extreme weather for the central Andes*). Além disso, as simulações climáticas foram geradas com o MRC RegCM4 forçadas por três modelos globais GFDL, HadGEM2 e MPI, utilizando as variáveis de temperatura média, precipitação acumulada, ventos (850 e 200 hPa), e umidade específica .

#### 2.1.1. CPC

O CPC (*Climate Prediction Center*) disponibiliza uma análise de precipitação acumulada diária a partir de observações de pluviômetros. O CPC faz parte do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e esta análise de chuva tem sido utilizada há muito tempo para várias aplicações em pesquisa e operações (Xie et al., 2010). A análise do CPC está em grade regular de 0.5° x 0.5° de latitude por longitude desde 1978 até 2017

#### 2.1.2. CRU

Desenvolvido na *University of East Anglia* no Reino Unido, o CRU (*Climate Research Union*; Mitchell e Jones, 2005) é um conjunto de análise de observações mensais de estação interpoladas ao redor do mundo para uma grade horizontal de 0.5°x0.5° de latitude por longitude para o período 1900-2015. Esses dados são usados com muita frequência na validação dos modelos climáticos (da Rocha et al., 2014).

### **2.1.3. CHIRPS**

O CHIRPS v2 é uma análise de dados pluviométricos globais, que são observados em superfície, conjuntamente com dados de sensoriamento remoto. O CHIRPS incorpora observações de satélite em alta resolução, de 0,05°, e dados de estações para criar séries temporais de chuva quadriculadas para análise de tendências e monitoramento sazonal de chuva. Esta análise possui mais de 30 anos, começando em 1981 até o presente. O CHIRPS pode ser usado para quantificar os impactos hidrológicos da diminuição da precipitação e do aumento da temperatura do ar, por exemplo (Chris Funk et al., 2015).

### **2.1.4. ERA-Interim**

Os dados de reanálise Era-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) é um conjunto de dados obtidos a partir de modelos de circulação global e observações diretas (dados de superfície, radiossondagens, boias, navios, etc.) e indiretas (satélites, radares, etc.), conforme descrito por Dee et al. (2011). Atualmente, existem várias gerações, porém, a Era-Interim faz parte de uma nova geração de reanálises bastante utilizadas para entender o clima e sua variabilidade em diversa.

### **2.1.5. Dados de estações meteorológicas**

Uma parte muito importante é a construção de um melhor conjunto de dados meteorológicas para a região dos Andes. Neste trabalho esta construção inclui as observações meteorológicas do SENAMHI da Bolívia e Peru. Estas observações passaram por um controle de qualidade que incluiu visitas às mesmas para obter informações adicionais dos observadores que contribuíssem para identificar erros de observação. Todo este controle de qualidade foi realizado através do projeto DECADE (*Data on climate and Extreme weather for the central Andes*), isto possibilitou um maior controle de qualidade das séries temporais observadas na região, que incluiu correções aos dados originais, tais como, preenchimento de dados faltante, dados observados incorretos, erros de



transcrição durante a digitalização, verificação visual de gráficos, verificação na coerência espacial (Hunziker et al.,2017; Hunziker et al.,2018 ).

Estas observações estão disponíveis para o período 1981 a 2010 e passaram por um controle de qualidade rigoroso, sendo a primeira vez que foram analisados tão cuidadosamente, especialmente na Bolívia (Andrade, 2018). Adicionalmente, os dados foram ainda processados de maneira particular usando o software RClindex (Zhang e Yang, 2015) que analisa as incongruências identificando os outliers. O controle de qualidade utilizada por Sugahara et al. (2011) considerou uma observação de temperatura como um valor válido se situada dentro do intervalo  $Q75\% \pm 3IQR$ , onde  $Q75\%$  é o percentil 75% e  $IQR$  é a faixa interquartil. Para a precipitação, apenas o limite superior foi considerado. Neste caso, utilizou-se o  $Q98\%$  em vez de  $Q75\%$  devido à alta variabilidade temporal da chuva (Canedo-Rosso, et al., 2018). É importante destacar que a qualidade das observações pode influenciar no resultado de qualquer análise de dados meteorológicos (Sugahara et al., 2011). Aplicando os critérios de controle de qualidade de dados mencionados restaram 85 estações meteorológicas para temperatura média diária e 181 estações para a precipitação situadas em alturas maiores do que 600 metros acima do nível do mar (manm) localizadas nos Andes da Bolívia e Peru (Figura 2.1).

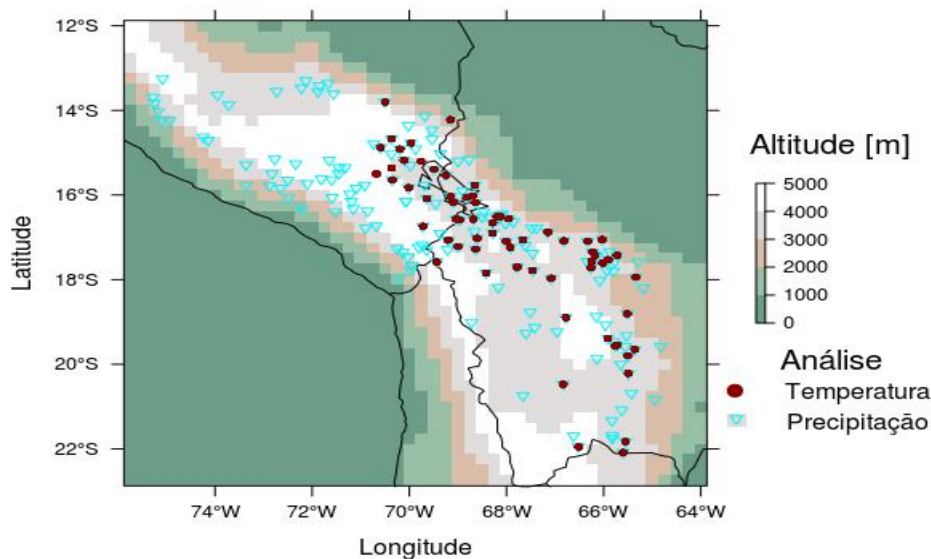


Figura 2.1. Localização das estações meteorológicas. Círculos vermelhos indicam as estações com apenas observações de temperatura e triângulos celestes representam estações com apenas precipitação.

## 2.2. Metodologia

### 2.2.1. Análise de cluster

Os estudos regionais utilizando análise de cluster em estações meteorológicas é uma análise estatística exploratória onde os dados são agrupados em ordem e em função à similitude (distâncias) entre grupos. Analisando os dados meteorológicos de quantidade considerável, todo cluster se agrupa da mesma similitude e se divide em pequenos grupos. A técnica estatística dispõe da facilidade de agrupar variáveis tentando atingir a máxima homogeneidade e a maior diferença de cada grupo (Wilks, 2006). Não existem muitas análises que sejam regionalizadas por clusters com dados de estações meteorológicas nos Andes. Os métodos de análise de cluster podem ser hierárquicos e não hierárquicos. A análise de cluster hierárquico começa com  $n$  clusters e gradualmente reduz o número. Especificamente, o método de Ward (Wilks, 2006) considera a soma de quadrados no cluster e a soma de quadrados entre os clusters. Os métodos não hierárquicos formam um grupo ótimo considerando todas as formas possíveis de dividir um objeto em  $k$ -means que é um método que permite atribuir a cada observação o cluster mais próximo em termos do centroide (média). Em geral, a distância utilizada é a euclidiana.

A análise de cluster basicamente é um agrupamento em função da similitude (distância) de dados das estações, ou seja, o cluster agrupa em grupos similares e representativos. A Figura 2.2 apresenta uma descrição da análise de cluster aplicada aos dados de temperatura e precipitação para as estações mostradas na Figura 2.1, que compreende as regiões da Bolívia e Peru.

A vantagem do *k-means* é que pode ser aplicado em todo tipo de dado porque não precisa de padronização de dados. O método também depende do número de clusters *k* e os valores iniciais, ou seja, estas informações afetam na seleção final do grupo. A proporção da informação sobre o número de *k*-clusters é determinada com antecedência, então a configuração do valor inicial, que é o centro do cluster (ou centroide), tem bastante influência na formação dos clusters. Estabelecer inicialmente valores errados resultará em clusters errados (Luna et al., 2013). Portanto, neste estudo aplicou-se o método de Ward (Espinoza et al., 2009) hierárquico para determinar o número *k* de clusters apropriados. Calculou-se o valor de cluster usando método Ward como valor inicial para em seguida aplica-se o método *k-means* para os dados de temperatura e precipitação.

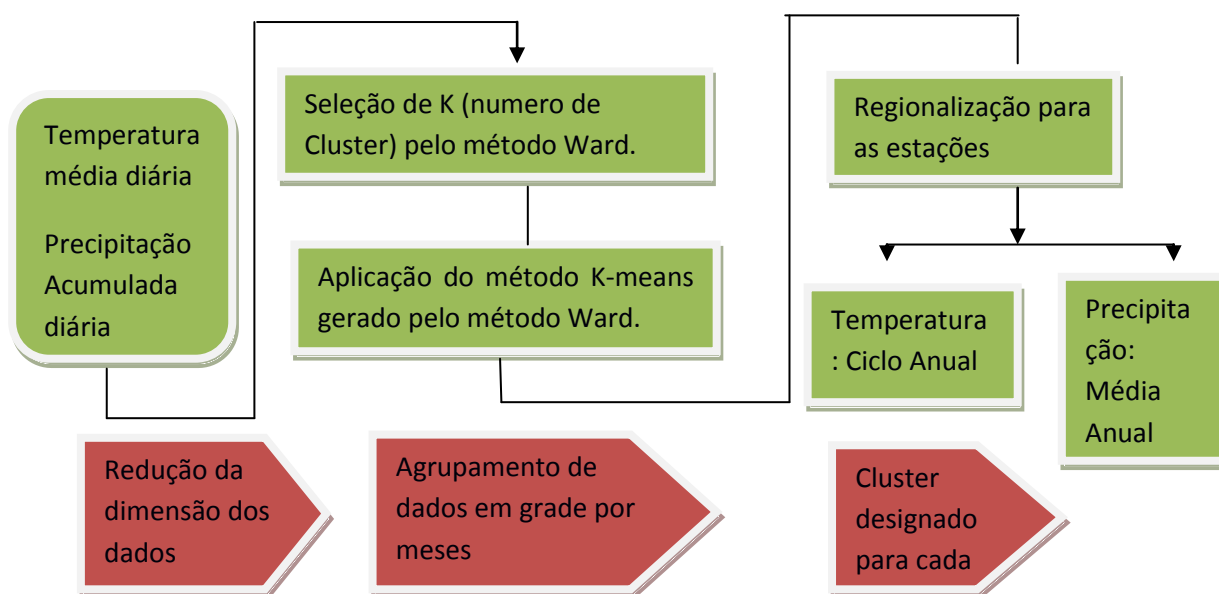


Figura 2.2 Diagrama de análise de cluster aplicada para as estações meteorológicas.

O procedimento foi aplicado nos dados observados (CRU, CHIRPS, PCP) e simulados (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI). Foram comparados os ciclos anuais simulados e observados,

construídos os diagramas de Taylor e calculados os biases sazonais para os quatro clusters. Estas comparações permitem quantificar os erros e incertezas presentes nas simulações no clima presente.

## **2.2.2. Descrição do modelo RegCM4 e simulações Climáticas**

### **2.2.2.1. RegCM4**

O modelo RegCM4 resolve as equações para uma atmosfera incompressível em coordenadas verticais sigma pressão utilizando método de diferenças finitas em uma malha B de Arakawa-Lamb. Além disso, utiliza o esquema split-explicit para resolver dinamicamente os modos de gravidade mais rápidos usando passos de tempo menores. O RegCM4 utiliza um logaritmo para reduzir a difusão horizontal na presença de intensos gradientes de topografia complexa. Existem várias parametrizações físicas (de convecção, interação solo-planta-atmosfera, camada limite planetária, etc) no modelo.

### **2.2.2.2. Simulações Climáticas**

Neste trabalho foram utilizados 3 simulações climáticas do RegCM4 denominadas de RegHadGEM2, RegGFDL e RegMPI. Estas simulações utilizaram o CLM3.5 (*Community Land Model* version 3.5; Oleson et al., 2008) como parametrização de superfície e a parametrização de convecção Emanuel (Emanuel e Zivkovic-Rothman et al., 1999). Estas simulações foram forçadas pelos modelos climáticos GFDL, HadGEM2 e MPI do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5; Meehl 2011).

As simulações do RegCM4 foram realizadas no contexto do projeto CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) em um domínio que inclui o toda AS e parte dos oceanos adjacentes (Llopart et al., 2017). As simulações utilizaram 50 km de espaçamento de grade na horizontal, 18 níveis verticais sigma-pressão e para o período 1970-2100 (foram iniciadas em 01/1/1969, mas segundo Llopart (2014) o primeiro ano foi descartado das análises pois representa o período de *spin-up*). Neste trabalho serão analisadas as simulações para o cenário *Representative concentrations Pathways- RCP8.5* (Van Vuuren et al., 2011), que representa o mais pessimista dos RCPs em função do maior forçamento radiativo (Figura 2.4).

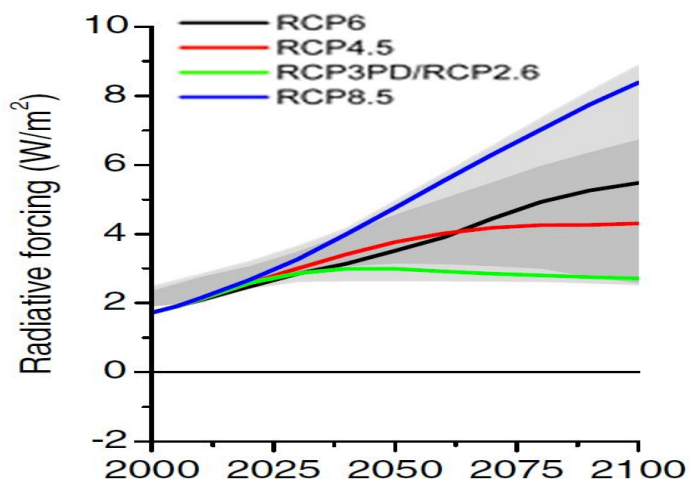


Figura 2.4 Concentração de forçamento radiativo para distintos cenários. Fonte: (IPCC, 2013)

### 2.2.2.3. Condição inicial /contorno GFDL

O modelo acoplado carbono-clima GFDL-ESM2M (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; Dunne, 2012*) foi desenvolvido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Nas simulações para o CMIP5 o GFDL-ESM2M está disponível com  $2^\circ \times 2.5^\circ$  de resolução horizontal e 24 níveis verticais.

### 2.2.2.4. Condição inicial /contorno HadGEM2

HadGEM2-ES (ES: *Earth system*) é um modelo desenvolvido pelo departamento da *Met Office Hadley Centre* do Reino Unido que inclui os componentes do sistema terra, o ciclo do carbono terrestre, oceano, e da química da troposfera. Na versão para o CMIP5 o HadGEM2 possui espaçamento de grade horizontal de  $1.875^\circ \times 1.25^\circ$  e 38 níveis verticais (Martin et al., 2011)

### 2.2.2.5. Condição inicial /contorno MPI

O modelo do sistema terrestre do *Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM)* também realizou simulações para o CMIP5 (Giorgetta et al., 2013) para vários dos RCPs. A versão utilizada na regionalização do RegCM4, MPI-ESM, está disponível com grade horizontal de  $1.5^\circ \times 0.4^\circ$  com 95 níveis verticais.

Neste trabalho, o período de análise no clima presente é representado por 1981-2005 e para o período futuro 2030-2060. As variáveis meteorológicas analisadas foram: temperatura média do ar a 2 metros (°C), precipitação acumulada (mm/mês), componente zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s), como umidade específica (g/kg).

### 2.2.3. Análises

### 2.2.4. Diagrama de Taylor

Segundo o trabalho de Taylor (2001), o diagrama de Taylor é uma forma gráfica de representar, por apenas um ponto, três métricas utilizadas em avaliações estatísticas:

- Coeficiente de correlação (r)
- Desvio padrão ( $\sigma$ )
- Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE)

Vários experimentos podem ser representados num gráfico, e a comparação entre eles torna-se mais clara. Na melhor situação espera-se que:

- ✓ r tem que ser 1 ou -1
- ✓  $\sigma$  do experimento seja próximo de  $\sigma$  das observações
- ✓ RMSE tem que ser 0

Onde são representados três parâmetros por um único ponto num plano.

Esperam-se três dimensões. A resposta é que existe uma relação entre os três parâmetros, de forma que apenas 2 são livres. A Lei dos cossenos que são parâmetros utilizados no diagrama de Taylor guardam uma relação similar à lei dos cossenos; o que permite sua construção gráfica:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab * \cos(\alpha) \quad (1)$$

Então, para um b fixo, a isolinha de c, a e  $\cos(\alpha)$  tem a forma do diagrama de Taylor mostrado na Figura 2.5

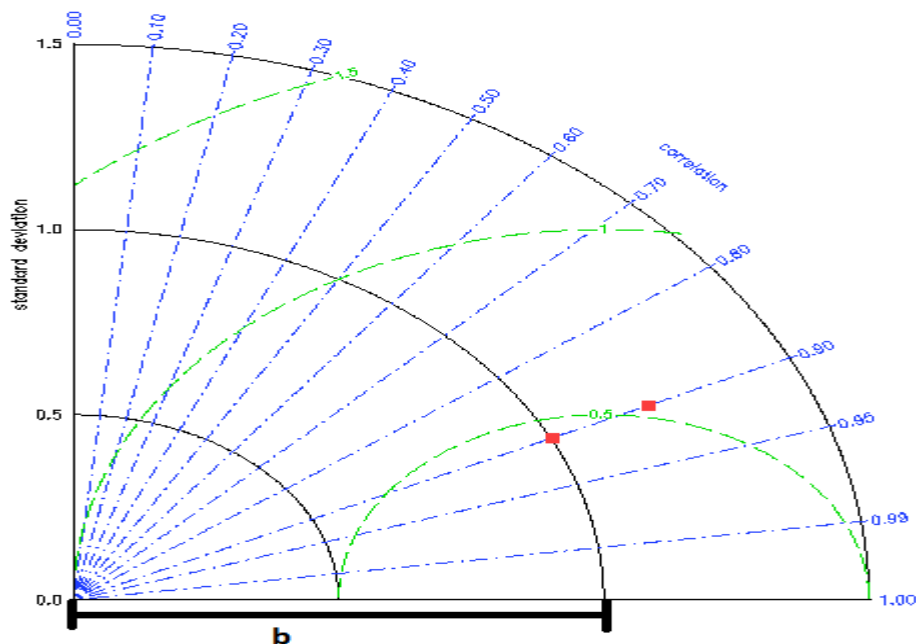


Figura 2.5 Diagrama de Taylor,  $c$  constante (linha verde),  $\cos(\alpha)$  constante (linha azul) e  $b$  constante (linha preta). Adaptado de <http://www.lamma.ufrj.br/sites/spo/atlasul/scripts/taylor/diagrama.php>.

No diagrama de Taylor, O RMSE quantifica a diferença de um conjunto de valores enquanto seja menor o valor de RMSE, mais próximos são os valores simulados e observados. Além disso, a correlação corresponde à correlação de Pearson ( $r$ ) que mede o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias e não depende das unidades de medida. O valor de  $r$  varia no intervalo de -1 a 1.

Os valores positivos de  $r$  representam uma relação direta, ou seja, uma das variáveis aumenta e a outra aumenta também quando a outra diminui. Os valores de -1 e 1 indicam relação linear perfeita, enquanto o valor 0 indica que não existe relação linear entre as variáveis (Fonte: <http://www.lamma.ufrj.br/sites/spo/atlasul/scripts/taylor/diagrama.php>).

De forma complementar, foi calculado o bias ou erro médio. O bias, ou erro média, é a diferença da média de dois conjuntos de dados, indicando se um deles superestima ou subestima o outro valor, sendo calculado como:

$$BIAS = \frac{\sum_i^n (x_i - y_i)}{N} \quad (2)$$

### **2.2.5. Variabilidade interanual e efeitos de El Niño-Oscilação sul**

De acordo com Garreaud et al. (2009) o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno acoplado entre oceano e atmosfera que se caracteriza por variações irregulares com períodos de 2 a 7 anos entre condições quentes (El Niño) e frias (La Niña) sobre o Oceano Pacífico equatorial. O padrão de El Niño está associado com (a) chuvas abaixo da média na região tropical da América do Sul, (b) precipitação acima da média na subtropical e temperatura do ar mais quente que o normal em latitudes tropicais e subtropicais (Garreaud et al., 2008). Geralmente as condições são opostas durante episódios de La Niña.

Como um dos objetivos é estudar a variabilidade climática interanual nos Andes no clima presente e futuro, os valores mensais foram filtrados na banda interanual utilizando um filtro passa baixa (Duchon et al., 1979). Antes de aplicar o filtro, foram calculadas as séries anomalias mensais cada um dos clusters selecionados.

### **2.2.6. Tendências futuras de temperatura e precipitação.**

A tendência futura de temperatura foi calculada como a diferença entre o período futuro (2030-2060) e o clima presente (1981-2005) em função à média anual seguido de uma densidade de probabilidade (PDF). No caso da precipitação, a tendência relativa foi obtida considerando a diferença entre o clima futuro (2030-2060) e o presente (1981-2005) dividido pelo clima presente.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Topografia do modelo versus topografia de estações meteorológicas

A Figura 3.6 apresenta um resfriamento forte sobre os Andes. Isto pode estar relacionado ao excesso de precipitação, o que reduz a radiação solar incidente com consequente temperatura do ar mais baixa na encosta andina (Urrutia et al., 2009). De fato, uma comparação da temperatura média e da topografia do RegCM4 e de estações meteorológicas é muito importante. Então, foi realizada uma comparação entre a altitude do RegCM4 e das observações dos Andes (dados de estação) apresentada na Figura 3.1. As altitudes das estações foram extraídas do projeto DECADE que inclui 83 registros de estações entre o 14°S e 22°S. Este registro observacional engloba parte dos Andes da Bolívia e Peru.

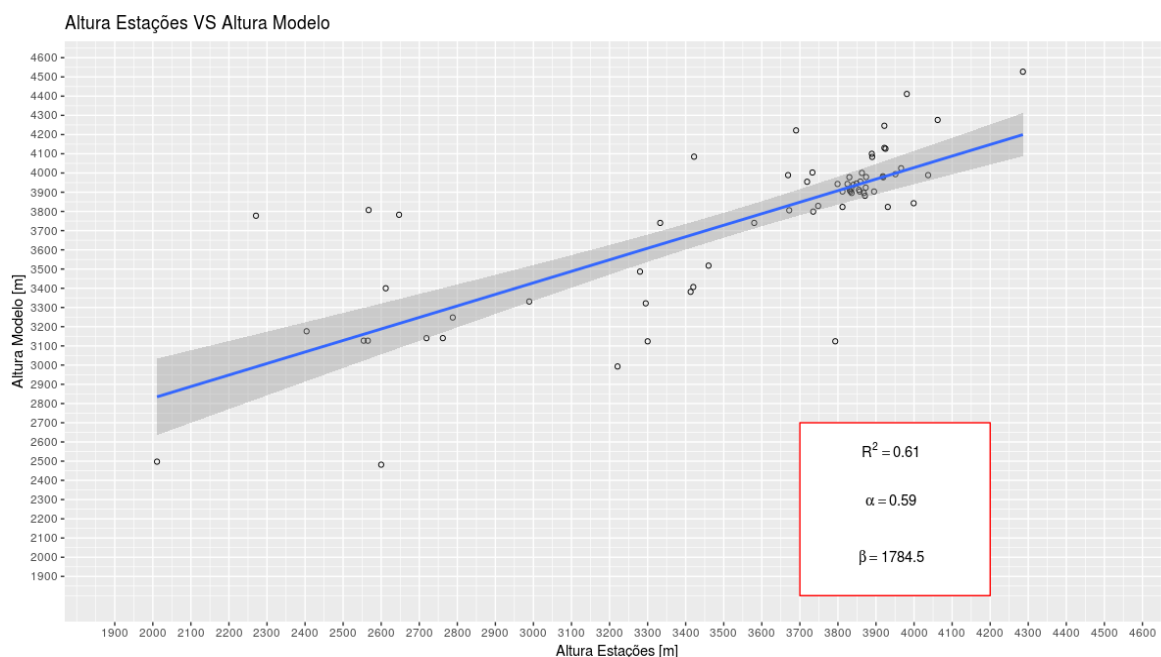


Figura 3.1 Comparação entre altitude representada pelo modelo RegCM4 e altitude das estações meteorológicas.

Cabe ressaltar, que as informações do modelo foram extraídos de uma grade de 0,5 latitudes por 0,5 de longitude. Na Figura 3.1, nota-se que as altitudes do RegCM4 são maiores do que nas estações. No geral, existe uma tendência do RegCM4 em superestimar a altura da topografia complexa dos Andes. Aliás, entre o intervalo de 3700-3950 m encontram-se valores muito parecidos de altura

entre estações e RegCM4. O  $R^2$  da regressão linear é 0,61 e a inclinação (lapse-rate) 0,59 apresentando uma relação linear positiva. Os resultados mostram que para cada metro nas estações, a altura do modelo reduz à metade ( $\alpha=0,55$ ) do seu valor original. Não obstante, a confiabilidade da regressão ( $R^2= 0,61$ ) não é muito boa.

Em seguida a Figura 3.2 apresenta a temperatura média anual em função da altitude tanto para as estações meteorológicas como para as simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI). Especialmente nas altitudes maiores (acima de 2200 m), as simulações realmente apresentam um bias frio, resultando em temperaturas simuladas mais frias sobre os Andes. Além disso, o lapse-rate de temperatura das estações (Figura 3,2a) é maior (-0,006 °C/m) do que das simulações (Figuras 3,2 b, c e d; -0,005 °C/m).

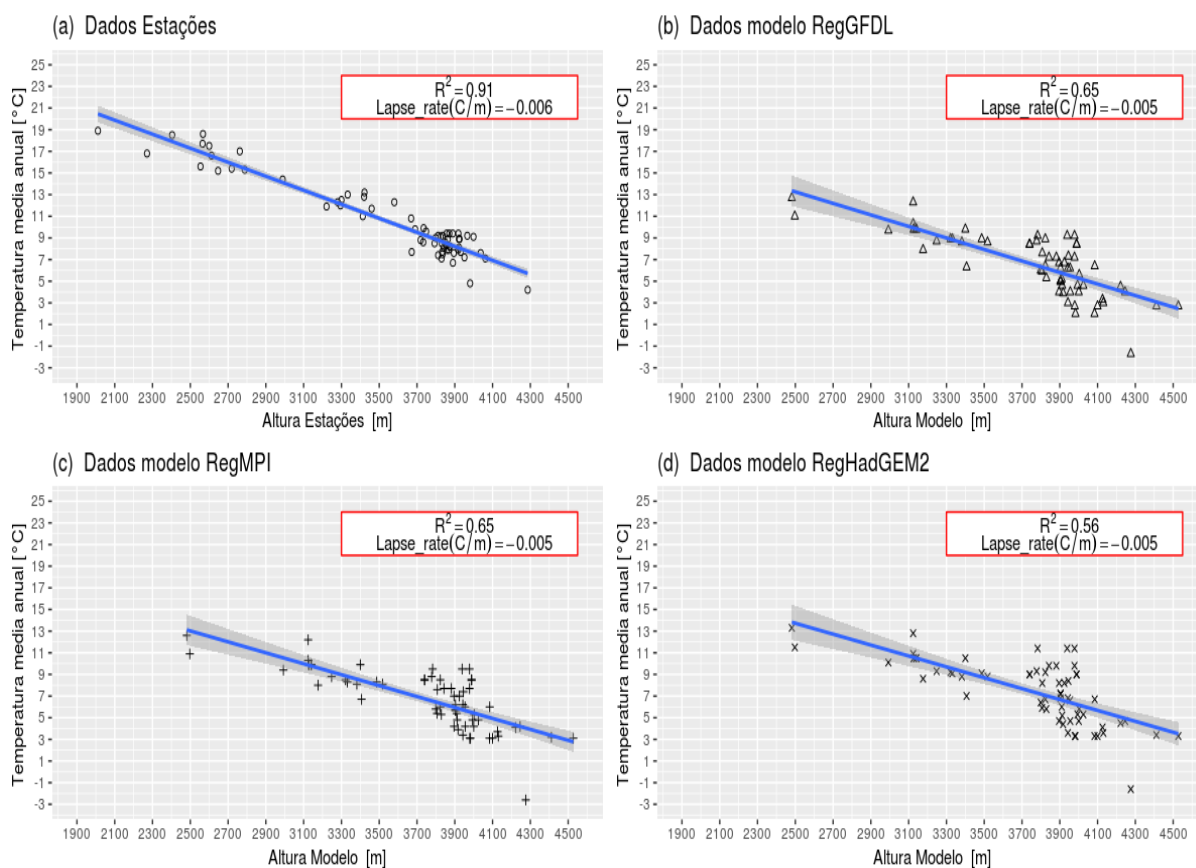


Figura 3.2 Temperatura (em °C) média anual (1981-2005) versus elevação para: (a) dados das estações meteorológicas, (b) RegGFDL, (c) RegHadGEM2 e (d) RegMPI.

Segundo Ynoue (2017) o lapse-rate á qual a parcela se resfria com a altura no processo adiabático saturado é  $\Gamma_w = \frac{-0,6^\circ\text{C}}{100\text{ m}}$ , ou seja,  $-\frac{6^\circ\text{C}}{1\text{ km}}$ . De fato, essa taxa não é constante como a adiabática seca, porque existe uma relação com a temperatura.

No caso dos Andes, ocorre uma mudança abrupta no lapse-rate de temperatura perto de 3200 m (Figura 3,2a), com um lapse-rate de apenas  $-0,006^\circ\text{C/m}$  ou  $-\frac{6^\circ\text{C}}{1\text{ km}}$ . Essa quebra é igualmente aparente com uma variação de  $1^\circ\text{C}/1\text{ km}$  nas simulações  $-\frac{5^\circ\text{C}}{1\text{ km}}$ . (Figuras 3,2 b, c e d), mesmo assim, os resultados são muito semelhantes entre dados de estação e simulações.

Segundo o trabalho de Urrutia et al.(2009), o baixo valor de lapse-rate seria provavelmente um reflexo da subsidência de baixos níveis sobre o sudeste do Pacífico, mantida pela corrente fria de Humboldt e seu efeito de afloramento associado, que tende a resfriar a atmosfera sobreposta e nas encostas andinas inferiores e o forte resfriamento sobre os Andes pode estar relacionado ao excesso de precipitação, o que reduz a radiação solar que entra e reduz a temperatura do ar sobre a costa andina .

### 3.2. Perfil Vertical

Neste item, a umidade específica ( $q$ ) das simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) é utilizada para entender os mecanismos de convecção profunda e umidade no verão, que ocorre quando  $q \geq 5\text{ g/kg}$  (condição úmida), e no inverno, quando  $q \leq 3\text{ g/kg}$  (condição seca), em aproximadamente a 600 hPa (Garreaud et al., 2003). Para melhorar a visualização a Figura 3.3 exibe a localização da linha de corte utilizada para construir os perfis verticais, que mostram o altiplano boliviano-peruano (seco) e a leste a parte oriental da Bolívia (úmida).

Baseado no trabalho de Garreaud et al. (2003), o transporte da umidade no altiplano que é produzido pela circulação regional no lado sudeste dos Andes extrai o ar úmido da camada limite sobre as terras baixas. No verão, época mais úmida nos Andes com mais do 80% da precipitação, entre 300 e 100 hPa existe um escoamento ascendente de leste para oeste, aumentando o transporte de umidade que alimenta a convecção profunda. Já no inverno a circulação regional é oposta

prevalecendo escoamento para oeste, impedindo o transporte de umidade de leste e eliminando a convecção úmida sobre o altiplano.

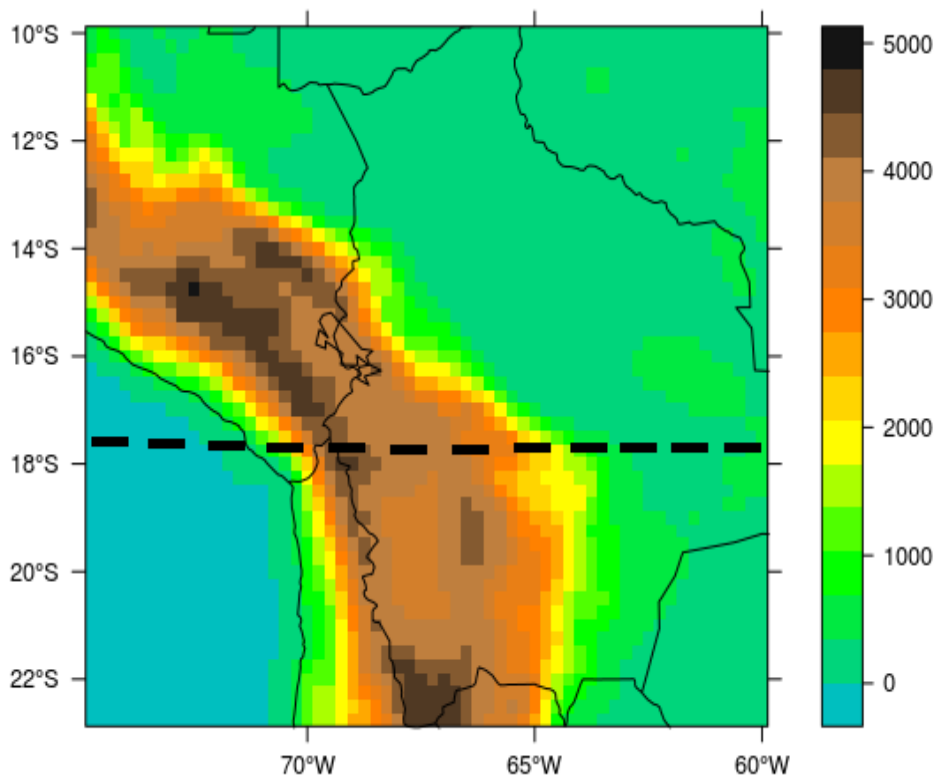


Figura 3.3 Localização de corte vertical na zona Andina de Bolívia e Peru.

A Figura 3.4 mostra a seção vertical da climatologia (1981-2005) da umidade específica para o verão e inverno obtida utilizando 7 diferentes níveis de pressão (1000, 900, 800, 700, 600, 500, 400 hPa). Para o verão a simulação RegHadGEM2 (Figura 3.4e), apresenta maiores valores de umidade específica próximo da superfície, aproximadamente de 15-16 g/kg entre 900 e 850 hPa, na parte leste comparado com as outras simulações RegGFDL (Figura 3.4c) e RegMPI (Figura 3.4g). Este último os valores de umidade específica de 14-15 g/kg entre 900 e 850 hPa (Figura 3.4g). Um ponto interessante é que em todas as simulações de verão existe convecção profunda (umidade específica  $\geq 5$  g/kg) em 600 hPa.

No geral, o RegHadGEM2 simula muita chuva nos Andes (Figura 3.8d). Como indica a Figura 3.4e isto pode estar associado com uma quantidade maior de umidade e movimentos convectivos mais intensos resultando em convecção profunda, já que a chuva no verão seria controlada localmente pela disponibilidade de umidade perto da superfície segundo Garreaud et al. (2013). Neste caso, na Figura 3.3 as terras de topografia baixa na zona leste da Bolívia apresentam ar úmido disponível para o transporte para níveis superiores (64 °W e 60°W).

Já no inverno, as Figura 3.4 (b, d, f) mostram uma redução da umidade específica, de até 7,0 g/kg na média, em comparação com o verão. A simulação RegHadGEM2 (Figura 3.4b) mostra valores maiores de umidade específica, de 10,0 g/kg em 850 hPa, na superfície na região leste entre ( 64°W e 65°W), enquanto as simulações RegGFDL e RegMPI apresentam um valor menor de 8,0 g/kg .

Os dados da Era Interim (Figuras 3.4a e b) mostram alto teor de umidade, acima de 15 g/kg, desde a superfície até 800 hPa no verão a leste dos Andes (Figura 3.4a). Nesta mesma região, este alto teor de umidade está presente nas simulações, mas só em níveis muito próximos da superfície (Figuras 3.4c-e-g) e nos níveis acima a atmosfera nas simulações é mais seca do que a Era-Interim. Para o inverno, a Era -Interim apresenta no lado leste da CA maior teor de umidade, desde a superfície até 800 hPa, comparando com as simulações nota-se que estas subestimam os valores da Era-Interim em cerca 2 g/kg. De fato os modelos, apresentam uma subestimação da umidade específica, especialmente entre os níveis de 1000 e 800 hPa e sobre o a parte mais elevada dos Andes.

Na Figura 3.5 apresentam-se através de um digrama Hovmoller o ciclo anual tanto para Era-Interim, como para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI. A simulação RegHadGEM2 mostra maior similitude em comparação às observações Era-Interim, enquanto as simulações RegGFDL e RegMPI apresentam períodos de pouca chuva (~50 mm), em particular nos meses de inverno. De fato, no verão apresentam-se superestimação da precipitação por parte das simulações. O posicionamento da AB (deslocada para sudoeste) é um fator importante para determinar a subestimação da umidade e a superestimação da precipitação.

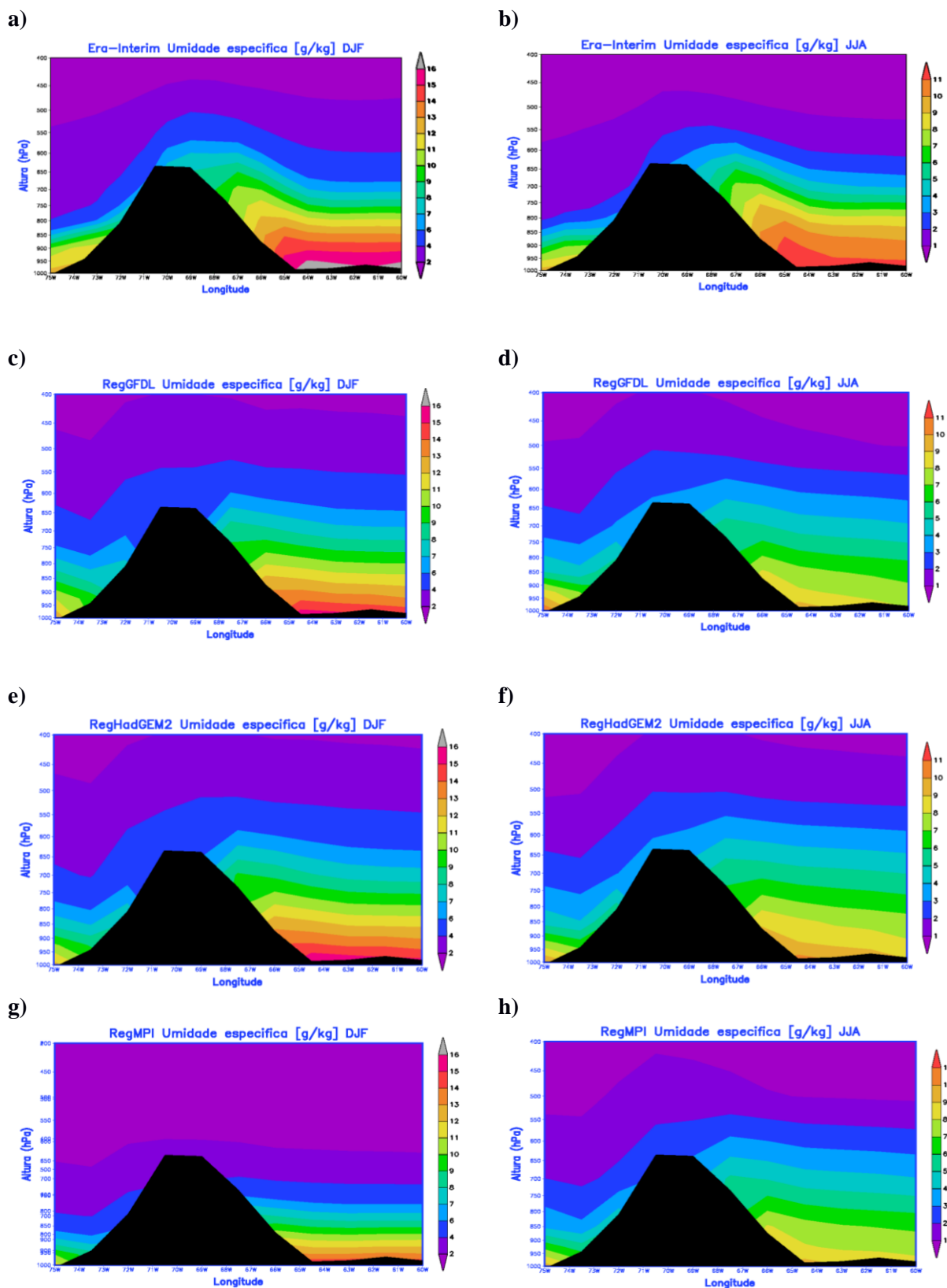


Figura 3.4 – Seção vertical da climatologia (1981-2005) sazonal de umidade específica (g/kg) para a reanálise Era-Interim (a) e as simulações RegGFDL (c), RegHadGEM2 (e), RegMPI (g) no verão, e para a reanálise Era-Interim (b) e as simulações RegGFDL (d), RegHadGEM2 (f), RegMPI (h) no inverno.

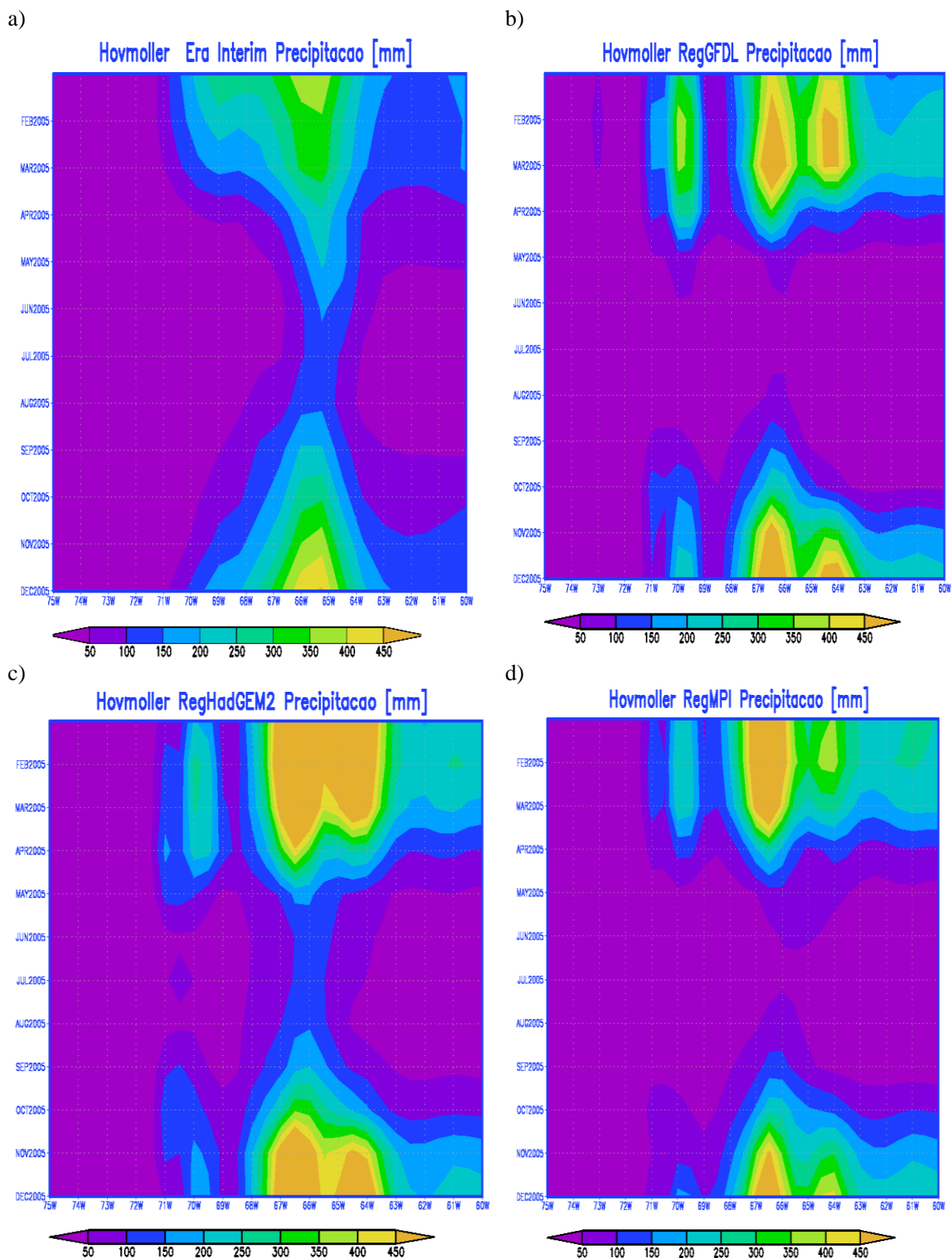


Figura 3.5 Diagrama Hovmoller para o ciclo anual de precipitação no período (1981-2005). (a) Era-Interim, (b) RegGFDL, (c) RegHadGEM2 e (d) RegMPI.

### 3.3. Clima Presente

Esta seção apresenta a climatologia (1981-2005) da temperatura do ar, precipitação acumulada e vento (850 e 200 hPa) sobre as regiões andinas da Bolívia e Peru usando o conjunto de observações interpoladas (CRU, CHIRP, CPC) observações da Era-Interim, e as simulações do RegCM4 (RegGFDL, RegMPI e RegHadGEM2) para o período de verão (Dezembro, Janeiro, Fevereiro) e inverno (Junho, Julho, Agosto). A comparação dos padrões espaciais ajudará identificar as principais diferenças entre as simulações forçadas com os modelos globais e os dados observados junto com suas incertezas.

#### 3.3.1. Padrão sazonal da temperatura média

As Figuras 3.6 (b, c, d) e 3.7(b, c, d) mostram as temperaturas médias durante o verão e inverno para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI entre 1981-2005. As diferenças entre simulações e observações CRU de verão (Figura 3.1a) e inverno (Figura 3.2a) são apresentadas nas Figuras 3.6 (e, f, g) e 3.7(e, f, g).

Em termos gerais, as simulações apresentam distribuição espacial de temperatura similar ao CRU. Porém, apresentam diferenças em relação às observações, que podem chegar a até 8°C, como mostram as Figuras 3.6 (e, f, g) e 3.7 (e, f, g). O bias de verão na zona andina é aproximadamente -2°C e de inverno -2°C para o RegGFDL, enquanto para RegHadGEM2 estes biases são em média de aproximadamente -1°C no inverno e verão. Para o RegMPI, o bias de verão atinge -4°C e no inverno -3°C. As simulações apresentam temperaturas médias menores do que CRU, especialmente na parte da Cordilheira Andina. Em geral, há uma subestimação de aproximadamente -4°C em áreas com topografia acidentada. Observa-se que nas regiões mais baixas a temperatura média é melhor representada pelo RegHadGEM2 do que pelos RegGFDL e RegMPI. Além disso, o RegMPI simula temperaturas mais baixas que o RegHadGEM2 na maioria do domínio, tanto no verão como no inverno. De acordo com o trabalho de Xu (2003) a subestimativa da temperatura na costa oeste da AS, entre as latitudes 25° e 15°S, resulta da ausência nas simulações das nuvens stratocumulus cobrindo a costa leste do Pacífico. De fato, devido à corrente fria de Humboldt que contribuem à formação de



nuvens nessa região. Esta cobertura de nuvens atua para reduzir a incidência de energia solar e impedir a ocorrência de altas temperaturas. As Figuras 3.6a-d mostram também que as temperaturas no verão e inverno são ligeiramente mais altas ao redor do Lago Titicaca (LT) devido ao efeito termorregulador que produz.

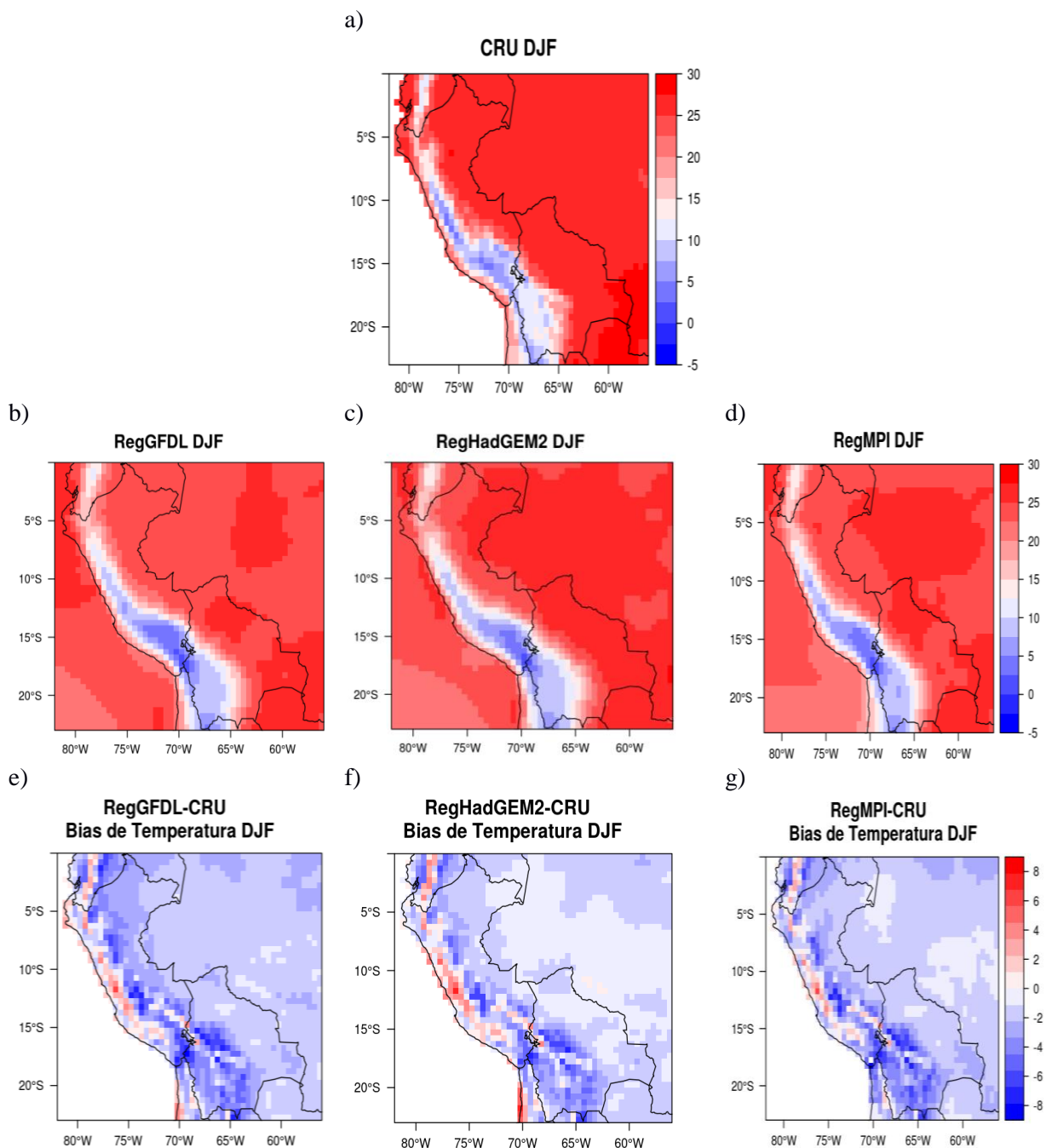


Figura 3.6 Climatologia (1981-2005) sazonal de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para DJF, CRU (a) modelos RegGFDL(b), RegHadGEM2(c), RegMPI(d), e diferença entre temperatura do ar observada CRU e as simulações(e), (f) e (g).

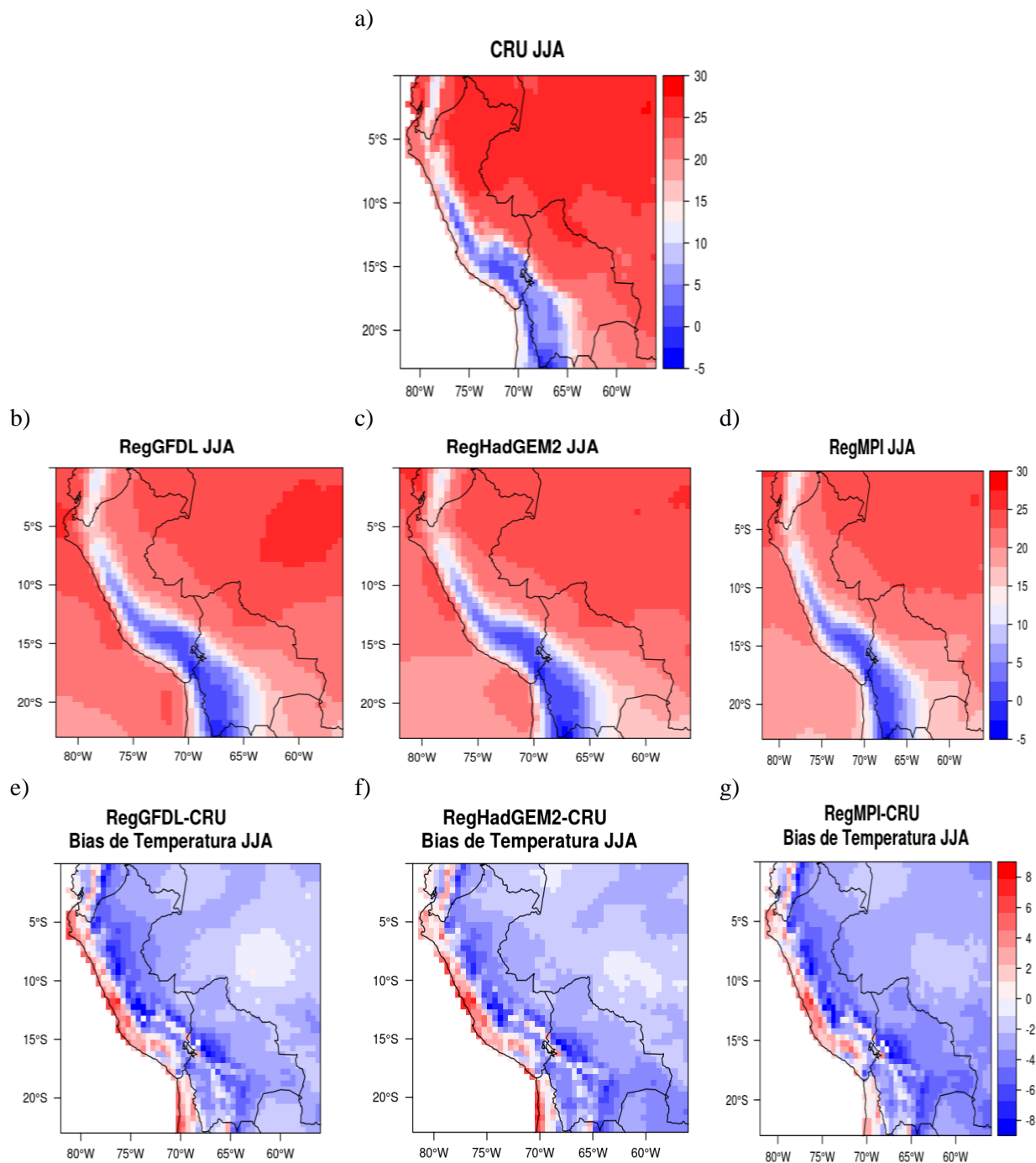


Figura 3.7 Climatologia (1981-2005) sazonal de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para JJA, CRU (a) modelos RegGFDL(b), RegHadGEM2(c), RegMPI(d), e diferença entre temperatura do ar observada CRU e as simulações(e), (f) e (g).

Durante o verão, o RegGFDL Figura 3.6 (b) apresenta do lado leste da CA valores baixos de temperatura do que o CRU Figura 3.6 (a), enquanto que na zona oeste apresenta uma superestimativa de temperatura assim como ocorre com o RegMPI Figura 3.6 (d). Nesta estação o RegHadGEM2 (Figura 3.6c) apresenta melhores resultados especialmente em regiões mais baixas, com valores mais

semelhantes aos do CRU. Durante o inverno, o padrão muda, e as simulações RegMPI Figura 3.7 (d) estão próximos às temperaturas observadas do CRU. Nota-se, que na costa norte do Chile, entre as latitudes 23° e 17°S, existe um bias pequeno que oscila entre -1°C e 1°C no modelo RegMPI (Figura 3.7 g), enquanto os modelos RegGFDL e RegHadGEM2 (Figuras 3.7e e 3.7f) apresentam uma superestimativa entre 2°C e 8°C.

### **3.3.2. Padrão Sazonal da Precipitação e Circulação**

Neste item, apresenta-se a climatologia sazonal da precipitação e vento (850 e 200 hPa) sobre as regiões andinas da Bolívia e Peru do conjunto de observações interpoladas (CRU, CHIRPS, CPC) e no caso do vento a ERA-Interim e das simulações RegGFDL, RegMPI e RegHadGEM2. A climatologia compreende o período 1981-2005 e a comparação espacial pretende identificar o padrão espacial das diferenças entre o modelo e observação.

As climatologias de vento em 200 hPa e precipitação (mm/mês) para DJF e JJA, observadas e simuladas, são apresentadas nas Figuras 3.8 e 3.9. As climatologias da Bolívia e Peru e especialmente a zona andina, apresentam médias sazonais diferentes no verão e inverno, caracterizando um sistema de monção (MS) (Reboita et al., 2010; Mendonça et al., 2017), onde a estação mais chuvosa é o verão e a estação seca o inverno. Nestas Figuras nota-se precipitação mais intensa nas regiões da Amazônia e principalmente no sudeste do Peru e no centro da Bolívia no verão, onde especialmente na Bolívia a precipitação depende fortemente do transporte de umidade que chega desde a Amazônia, gerada pela intensa atividade convectiva na zona centro-norte do Brasil. Na Amazônia boliviana-peruana 80% da precipitação acontece nos meses de dezembro até março (Vuille et al., 1999).

Durante o verão na região de máxima precipitação, localizada no centro da Bolívia e o extremo da costa norte do Peru, resulta em um sistema de alta pressão quase estacionário em 200 hPa, chamado alta da Bolívia (AB; Figuras 3.8). A AB simulada pelos modelos RegGFDL (Figuras 3.8b), RegHadGEM2 (Figuras 3.8d), RegMPI (Figuras 3.8f) estão deslocadas para o sudoeste comparada com a da Era-Interim (Figura 3.8a). A velocidade média no centro da AB é aproximadamente 4 m/s

para ERA-Interim, que está situada ao redor de 15,5° Sul e 65° oeste, nos modelos está em 20° sul e 74° oeste com velocidade de aproximadamente 2 m/s. De acordo com o trabalho de Llopart (2014), esse erro do deslocamento da AB é pelo fato que os mesmos simulam a ASAS mais intensos e mais ao sul do que é observado, isso reflete no posicionamento da AB.

Em baixos níveis, 850 hPa, um componente do sistema de monção chamado Jato de Baixos Níveis (JBN) (Figuras 3.10 e 3.11) têm a função de transportar umidade da bacia amazônica para a bacia Paraná-Prata, afetando o tempo e o clima da região leste dos Andes (Marengo et al.,2014). Este JBN nas latitudes tropicais e subtropicais da CA atua como uma barreira ao escoamento do Oceano Pacífico (Llopart, 2014). Na ERA-Interim, entre latitudes 10 e 20°S o JBN representa máximos valores de velocidade, aproximadamente 10 m/s, em contrapartida os modelos (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) apresentam valores de velocidade maiores.

As observações (CRU, CHIRPS e CPC) mostram padrões e intensidade semelhantes de chuva, mas com algumas diferenças na localização dos máximos no verão e inverno (Figuras 3.8 e 3.9). Por exemplo, o CRU apresenta apenas um máximo sobre os Andes, próximo de 14°S-70°W, que está ausente na análise do CPC (com resolução horizontal mais grosseira) e no CHIRPS (que possui maior resolução horizontal e incorpora dados de satélites) outros núcleos também intensos são encontrados mais ao norte (Figura 3.8). Todas as simulações (RegGFDL, RegMPI e RegHadGEM2) capturam o regime de monções mostrando padrões espaciais semelhantes às observações de precipitação no verão (Figura 3.8) e inverno (Figura 3.9). No entanto, especialmente no verão (Figura 3.8), nas simulações a chuva mais intensa se estende para a costa leste e para sul de 20°S, seguindo a encosta leste do Andes, em desacordo com todas as observações consideradas. Comparativamente, o padrão espacial da chuva sobre os Andes simulada pelo RegMPI no verão aproxima-se mais das observações (Figura 3.8).

Devido a alta variabilidade espacial da precipitação foram selecionadas 6 regiões indicadas na Figura 1 e denominadas: ZSE-P (Zona Selva Peru), ZC-P (Zona Central-Peru), Bol-Per (Boliviano-Peruano), ZPA-B (Zona Pando Bolívia), ZA-S (Zona Altiplano Bolívia), ZSC-B (Zona Santa Cruz Bolívia) para análise de padrão sazonal da precipitação e circulação. Do ponto de vista qualitativo, as

áreas relativamente planas da Bolívia e Peru são representadas pelos subdomínios ZSE-P, ZPA-B e ZSC-B. O RegHadGEM2 é a simulação com menores erros no padrão espacial de verão na precipitação na zona central do Peru (ZC-P), enquanto no altiplano da Bolívia (ZA-B) e na zona Boliviana-Peruana (Bol-Per) os menores erros são encontrados no RegGFDL e RegMPI, com pequena superestimativa. As observações CRU, CHIRPS e CRU no verão (Figuras 3.10a,c,e) mostram algumas diferenças principalmente nas zonas da Bol-Per, um aspecto muito interessante entre as observações é que o dado CPC sempre mostra valores mais baixos CRU e CPC em zonas de forte gradiente de altitude. Além disto, percebe-se quantidades muito altas de precipitação (outliers) nas regiões de topografia complexas, principalmente na zona Bol-Per tendo como exemplo o RegHadGEM2.

Para facilitar o análise construiu-se um “ensemble” de verão e de inverno das simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) e das observações (CRU, CHIRPS e CPC) apresentado na Figura 3.12. De fato, a precipitação simulada é superestimada nas regiões de maiores altitude ZC-P, Bol-Per e ZA-B, enquanto nas zonas baixas ZSE-P, ZPA-B e ZSC-B a chuva simulada apresenta menores erros tanto no verão (Figura 3.12a) como no inverno (Figura 3.12b).

Diferenças (bias) entre cada uma das simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) e cada uma das observações (CRU, CHIRPS e CPC) no verão são mostradas no apêndice A.

Para a estação de inverno, os sistemas precipitantes se deslocam para o norte por causa do deslocamento da ZCIT, e as chuvas diminuem de intensidade na maior parte AS. As simulações (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) apresentam um padrão espacial coerente com as observações (CRU, CHIRPS, CPC; Figuras 3.9 e 3.11), onde a precipitação é mais intensa nas regiões sobre influência da ZCIT. Durante o inverno, com a diminuição da chuva na AS, a AB gerada pelos modelos (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) ERA-Interim, e nas observações desaparece em 200 hPa, e os ventos são predominante de oeste e mais intensos do que no verão na Era-Interim (Figuras 3.9b,d,f). As simulações reproduzem ventos que predominam com direção nordeste, também as simulações apresentam maior velocidade do vento no inverno, mas simulam uma leve inclinação da direção do vento para norte, ao norte de 15°S (RegGFDL e RegMPI) ou em praticamente todo o domínio

(RegHadGEM2). Nas simulações os ventos são mais fortes do que na Era-interim. Para 850 hPa, nas Figuras 3.11(b,d,f) nota-se no inverno predomínio de vento de leste no setor leste dos Andes ao norte de 15°S, que a partir desta latitude gira para norte e caracteriza o JBN, mas menos intenso do que no verão. Aliás, na ERA-Interim, entre as latitudes 13 e 23°S o JBN apresenta máximos valores da velocidade do vento, aproximadamente 7 m/s com maior intensidade na ZSC-B, em contrapartida, os modelos RegGFDL (Figura 3.11b), RegHadGEM2 (Figura 3.11d), RegMPI (Figura 3.11f) mostram velocidades abaixo de 7 m/s. Desta forma o JBN simulado no inverno é mais fraco do que observado na Era-Interim. O JBN no inverno também está presente como no verão, mas localiza-se mais ao sul, começando em 14°S (Llopart,2014). Um destaque interessante é a formação de uma circulação de baixa nas simulações, entre 10° e 15°S, perto do litoral peruano.

No inverno, a precipitação nas observações (CRU, CHIRPS, CPC) apresentam valores mínimos, perto de 50 mm/mês nas zonas ZSE-P, ZPA-B e ZSC-B (Figuras 3.9(a, c, e)). Neste caso as simulações nas zonas ZC-P, Bol-Per e ZA-B mostram este período com um pouco mais de precipitação, que oscila entre 25 e 50 mm/mês (Figuras 3.9(b, d, f)). A simulação que com menores erros na representação do padrão espacial e intensidade da precipitação no inverno é o RegGFDL. O RegMPI também mostra menores erros na ZC-P e ZA-B quando comparado com o RegHadGEM2, com alta superestimativa, principalmente na zona Bol-Per.

As observações CRU, CHIRPS e CRU no inverno (Figuras 3.9(a, c, e)) têm algumas diferenças principalmente nas zonas ZSE-P e ZP-B. De fato, no ensemble de inverno na Figura 3.12b nota-se que a precipitação é superestimada pelas simulações no centro-leste da Bolívia-Peru e subestimada a leste. Nesta estação do ano a superestimativa chega a 50 mm/mês em regiões baixas de altitude (ZSE-P, ZPA-B e ZSC-B), enquanto nas zonas ZC-P, Bol-Per e ZA-B os erros são menores.

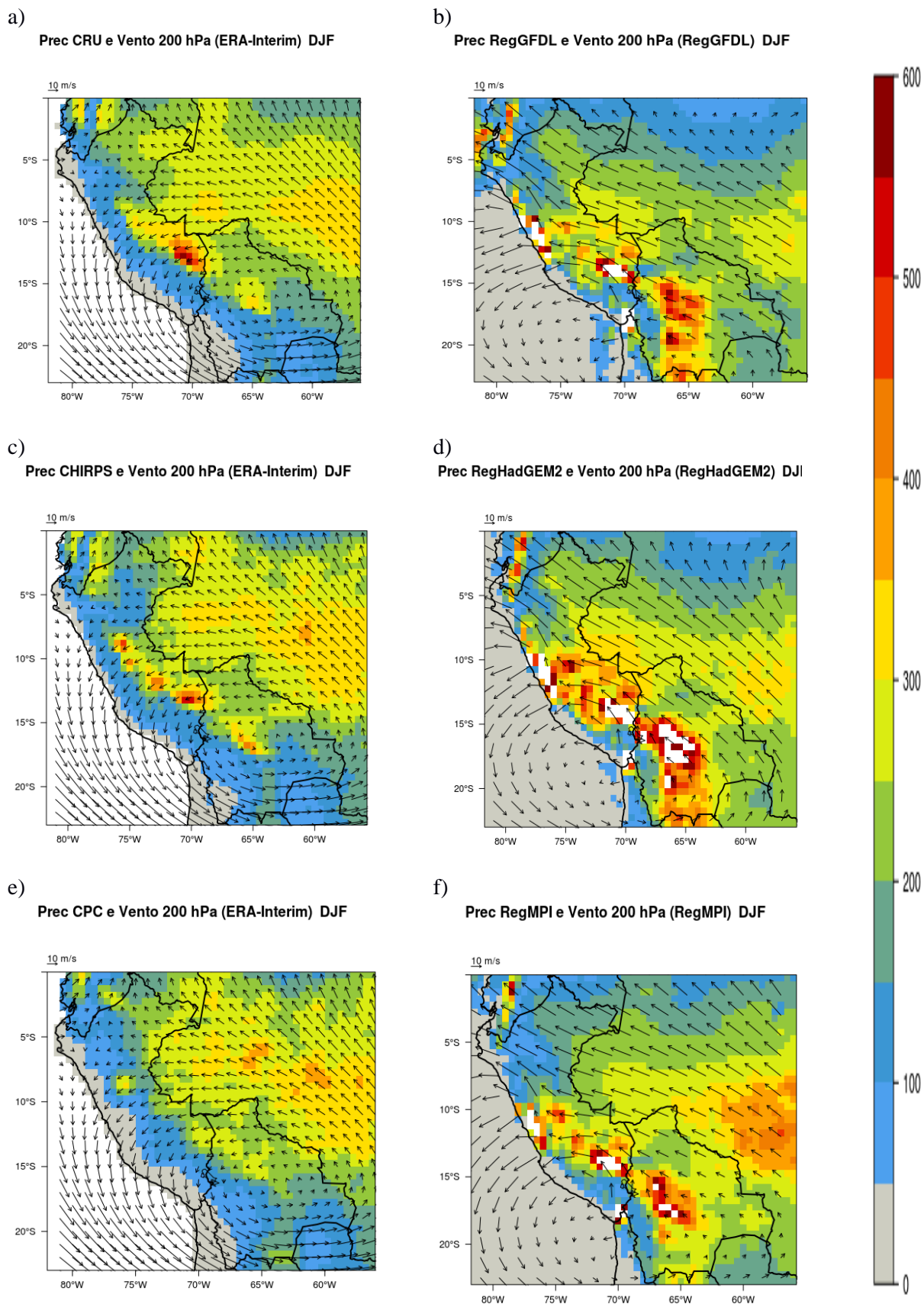


Figura 3.8 Climatologia (1981-2005) de verão (DJF) do vento em 200 hPa e precipitação (mm/mês) para observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.



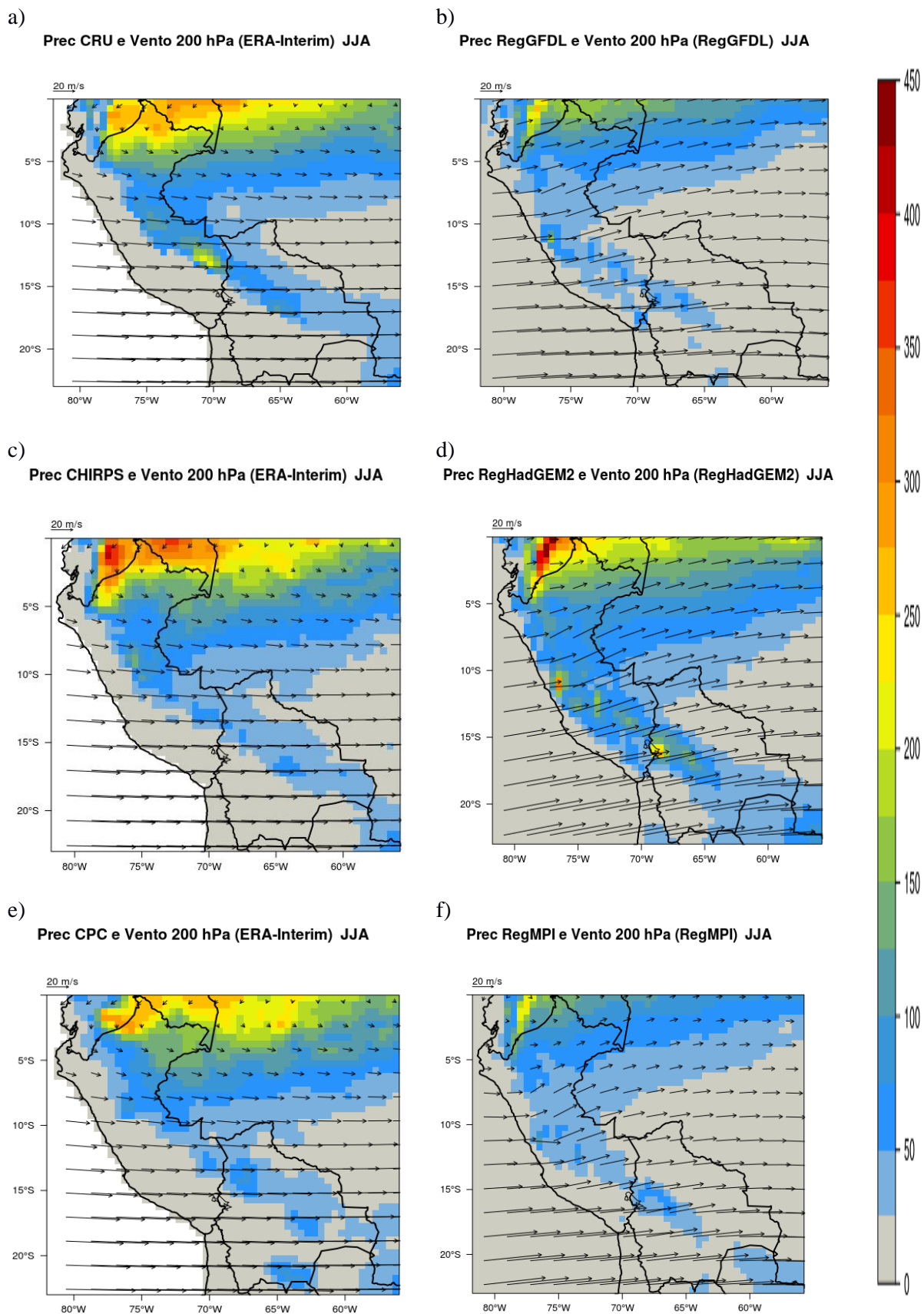


Figura 3.9 Climatologia (1981-2005) de inverno (JJA) do vento em 200 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.



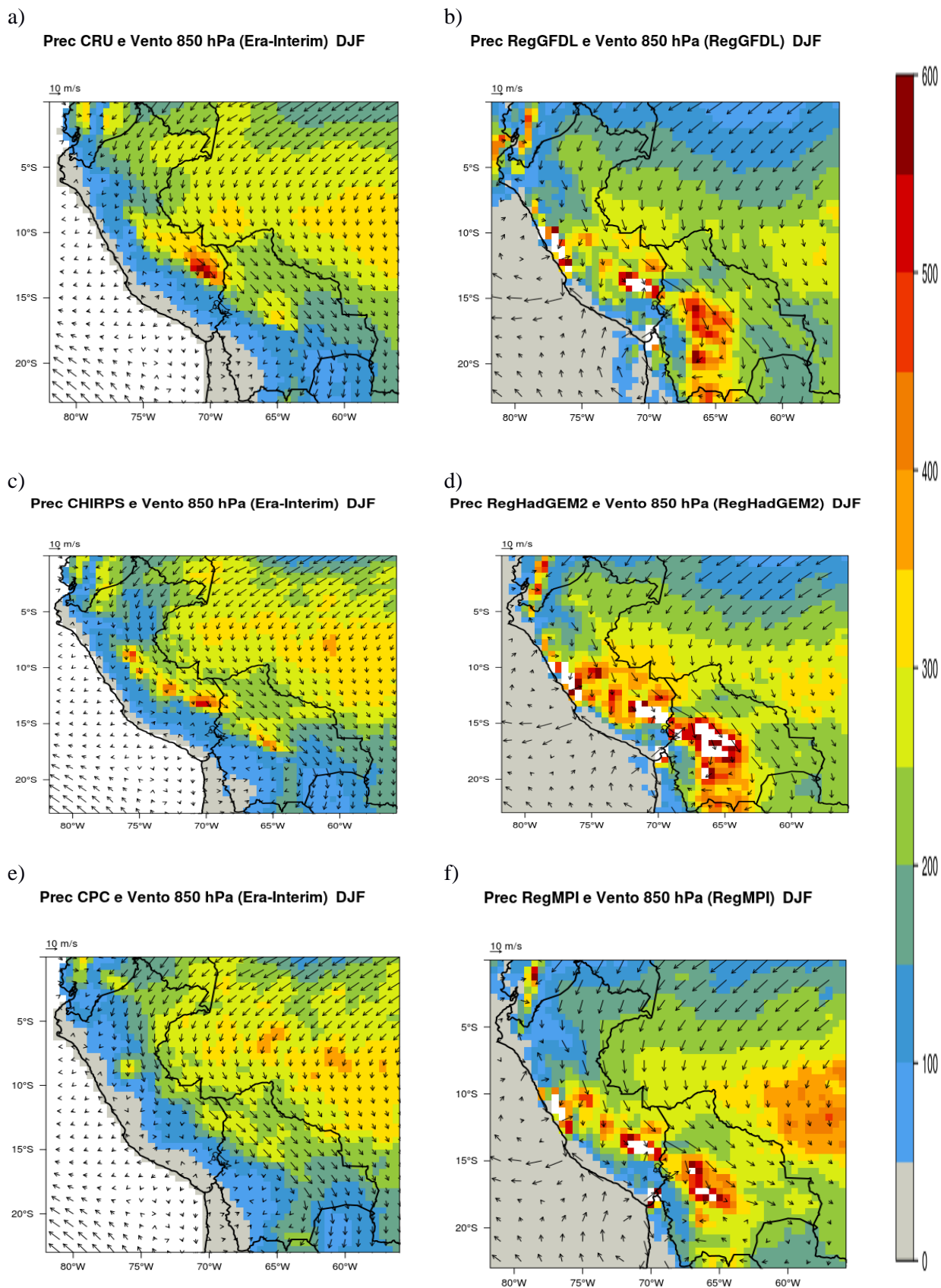


Figura 3.10 Climatologia (1981-2005) de verão (DJF) para o vento em 850 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.

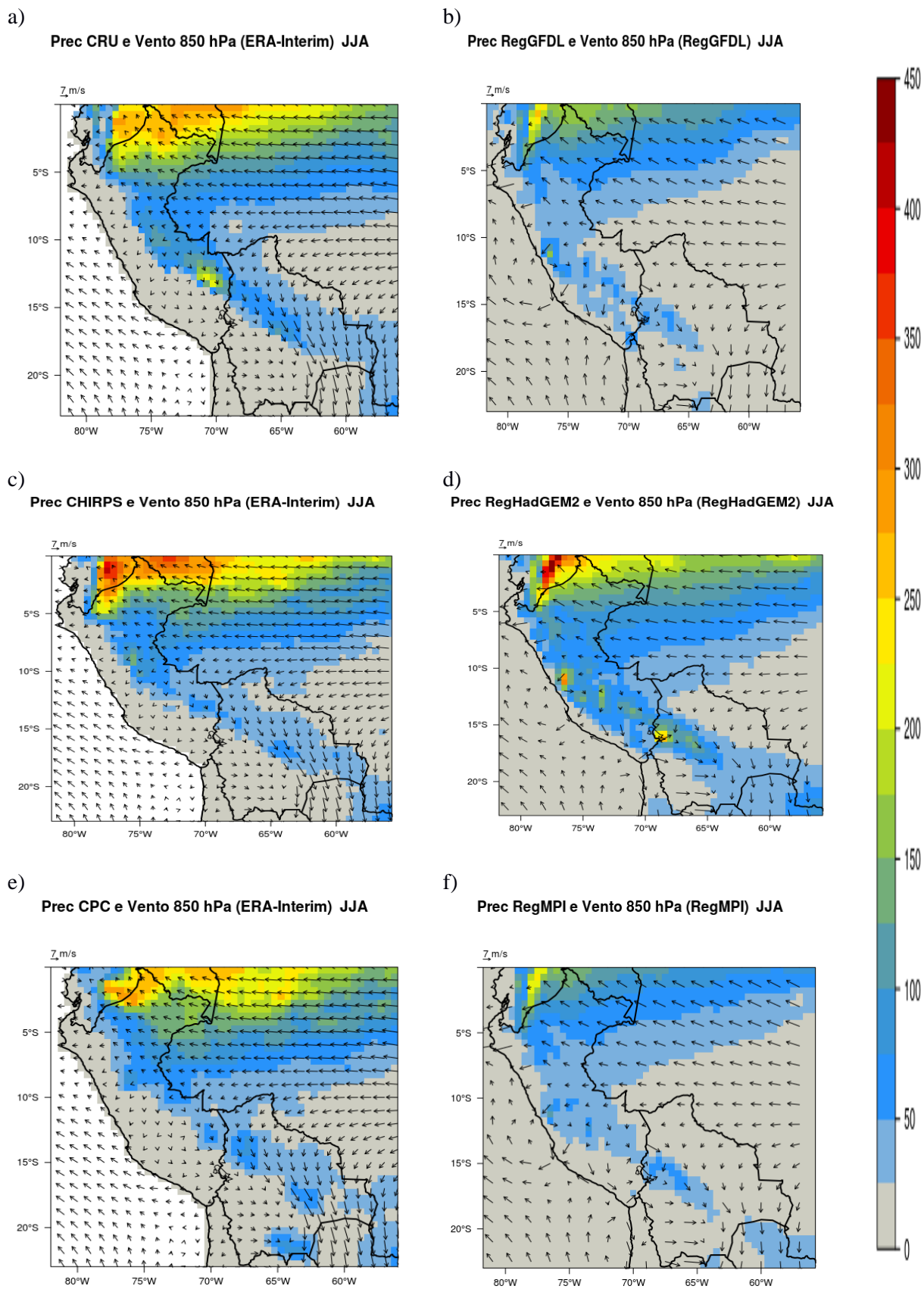


Figura 3.11 Climatologia (1981-2005) de inverno (JJA) para o vento em 850 hPa e precipitação (mm/mês) para as observações (a) CRU, (c) CHIRPS, (e) CPC; simulada pelo (b) RegGFDL, (d) RegHadGEM2 e (f) RegMPI.

Diferenças entre cada uma das simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI com as observações CRU, CHIRPS e CPC para o inverno estão no apêndice A.

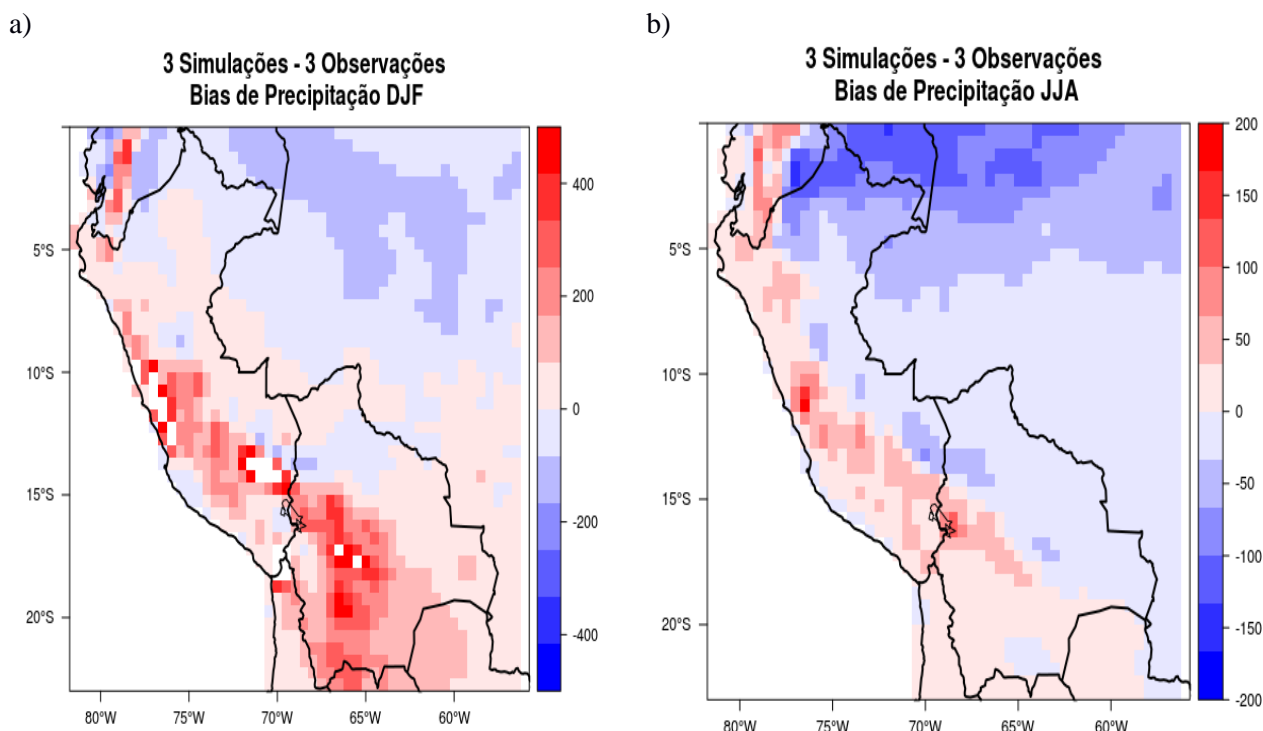


Figura 3.12 Diferença (bias) entre ensemble climatológico (1981-2005) de precipitação (mm/mês) simulado simulações (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) e observados (CRU, CHIRPS, CPC) para DJF (a) e para JJA (b).

### 3.4. Ciclo anual

Uma análise do ciclo anual foi realizada para a temperatura e precipitação para 4 clusters (Figura 3.13) usando estações meteorológicas e observações em grade (CRU, CHIRPS e CPC) para comparações com as simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) no clima presente (1981-2005). A metodologia de extrair informação para cada ponto de grade foi aplicada para cada ponto de estação meteorológica e depois foi calculada a média para cada cluster.

A Figura 3.13 mostra a regionalização feita pela análise de cluster para a variável de temperatura média mensal. O número ótimo de clusters (ou regiões) está associado a um Dendrograma que é uma representação gráfica da distribuição dos dados em forma de árvore utilizando o método

Ward (Wilks, 2006). A regionalização para temperatura está conectada com o ciclo anual de cada estação meteorológica. Neste caso, o método forneceu 4 clusters com as seguintes características:

- ✓ **Cluster 1:** Considerada a região mais quente com maior temperatura ao longo do ano, situada nas partes mais baixas dos Andes.
- ✓ **Cluster 2:** Considera regiões com temperatura relativamente quentes ao longo do ano, situada nas partes baixas dos Andes.
- ✓ **Cluster 3:** Considera as regiões mais frias, com menor temperatura ao longo do ano, situada nas partes mais altas dos Andes.
- ✓ **Cluster 4:** Considera regiões frias com a maioria das estações próximas do Lago Titicaca, situada nas partes altas dos Andes.

Cabe ressaltar que existem muitas similitudes em termos do comportamento do ciclo anual entre o Cluster 3 e Cluster 4.

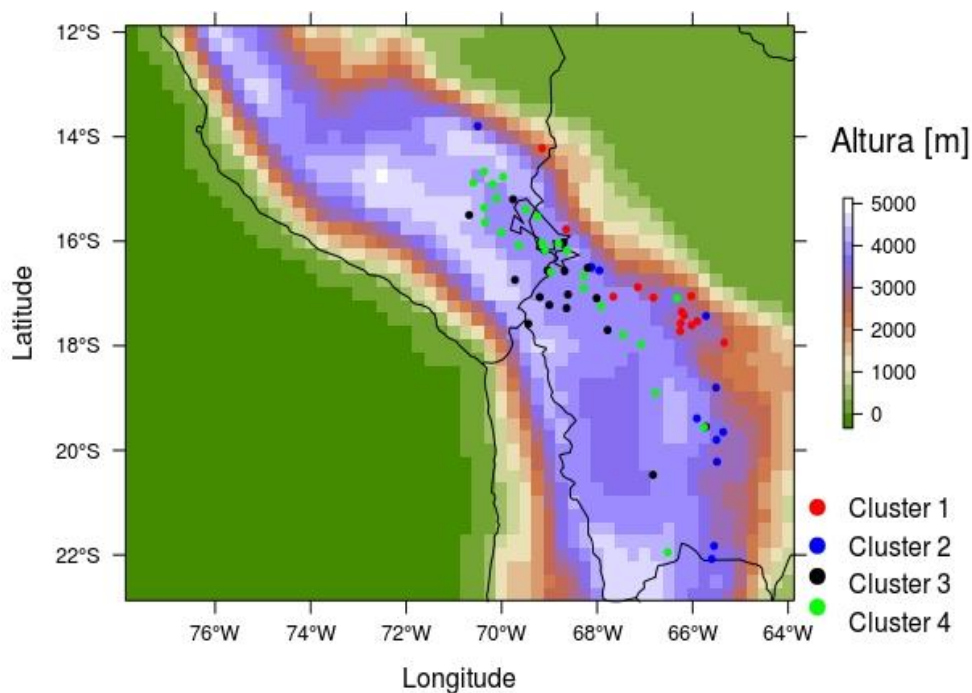


Figura 3.13 Resultado da análise de cluster. Os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as cores identificam os 4 clusters (zonas) analisadas para temperatura média.

### 3.4.1. Ciclo anual da temperatura média

A Figura 3.14 mostra os ciclos anuais de temperatura (observada e simulada) e os diagramas de Taylor para os 4 clusters identificados na Figura 3.13.

Para o Cluster 1 ( Figura 3.14a), que é a região mais quente, tem-se uma concordância entre fases do ciclo anual das estações meteorológicas e observações CRU (Figura 3.14a). Os valores máximos estão próximo de 18°C no verão e no inverno as mínimas variam entre 15°C e 16°C. Neste cluster, o CRU, RegGFDL, RegHadGEM2, e RegMPI apresentam valores inferiores, subestimando a temperatura média ao longo de todo ano como sintetizado na Tabela 3.2.1. No entanto, como a fase simulada e do CRU segue a observação, as correlações são altas e o RMS são baixos para o ciclo anual (Figura 3.14b). Cabe ressaltar que o RegGFDL apresenta menor correlação (~0,95) e tem um bias frio de -5,9 °C no verão e -6,2 °C no inverno (Tabela 3.2.1) . O RegHadGEM2 e RegMPI apresentam maior correlação, mas também subestimam a temperatura das estações no verão entre -5,9°C e -6,8 °C, enquanto a subestimativa no inverno variam entre -6,2°C e -6,8 °C. Além disso, também em relação ao CRU os biases das simulações são negativos para todas as estações do ano e todos os clusters (Tabelas 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4). No entanto é importante destacar a alta correlação (entre 0,95 a 0,99), menor RMS (menor que 1) e menores biases (Tabela 3.2.1) quando as simulações são comparadas com o CRU.

Tabela 3.2.1 – Biases (ou erros médios) de temperatura (°C) média anual e sazonal para o cluster 1 calculados em relação às estações meteorológicas e ao CRU.

Cluster 1		Anual	Verão	Inverno	Primavera	Outono
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	17,2	18,7	14,6	18,2	17,2
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	-4,3	-4,3	-4,4	-4,2	-4,3
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	-6,3	-5,9	-6,2	-6,6	-6,4
	<b>bias(CRU)</b>	-2,0	-1,7	-1,8	-2,4	-2,1
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	-7,0	-6,8	-6,8	-7,1	-7,2
	<b>bias(CRU)</b>	-2,7	-2,5	-2,4	-2,9	-2,9
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	-7,0	-6,6	-6,6	-7,4	-7,4
	<b>bias(CRU)</b>	-2,7	-2,3	-2,2	-3,2	-3,0

No Cluster 2, os erros diminuem bastante em termos do bias, já que o cluster consegue juntar estações com ciclo anual similar como mostram as Figuras 3.14(c) e (d). A diferença entre as observações do CRU e estações meteorológicas são pequenas (entre  $-0,5\text{ °C}$  e  $-1,5\text{ °C}$ ). Os valores de temperatura das estações oscilam entre  $14\text{ °C}$  no verão e  $9\text{ °C}$  no inverno, enquanto o CRU apresenta uma variação de  $13\text{ °C}$  no verão e  $8\text{ °C}$  no inverno. A descrição mais precisa pelo CRU da fase e amplitude resulta em a correlação muito alta ( $\sim 0,99$ ) e baixo RMS (menor a  $1,0\text{ °C}$ ), mas o desvio padrão do CRU é maior do que o das estações. Neste cluster, as simulações apresentam mais uma vez valores menores que as observações, sendo que o RegHadGEM2 apresentou o maior bias de  $-3,7\text{ °C}$  no inverno (Tabela 3.2.2). Mesmo assim, o HadGEM2 foi a simulação que apresentou melhor desempenho com maior correlação e menor RMS (Figura 3.14d). Em termos de amplitude do ciclo anual, o desvio padrão mais próximo do das estações é o do RegGFDL.

Tabela 3.2.2 - Similar a Tabela 3.2.1, mas para o cluster 2.

<b>Cluster 2</b>		<b>Anual</b>	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Outono</b>
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	12,3	13,9	9,7	13,1	12,4
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	-0,9	-0,5	-1,5	-0,6	-1,0
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	-3,3	-2,7	-3,7	-3,3	-3,3
	<b>bias(CRU)</b>	-2,4	-2,2	-2,1	-2,8	-2,3
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	-3,7	-3,4	-3,6	-3,7	-3,9
	<b>bias(CRU)</b>	-2,8	-2,9	-2,1	-3,1	-2,9
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	-2,4	-1,5	-2,5	-2,4	-3,0
	<b>bias(CRU)</b>	-3,0	-3,2	-1,9	-3,5	-3,3

A Figura 3.14e descreve o ciclo anual para o cluster 3, que se caracteriza por incluir estações com altitude acima de 4000 manm. O cluster 3 apresenta maior amplitude térmica do ciclo anual que os outros clusters. Neste caso, as estações e observações CRU apresentam valores mais quentes, principalmente na estação de inverno, quando o CRU apresenta o maior bias quente de  $1,19\text{ °C}$  (Tabela 3.2.3) Novamente, a simulação com melhor desempenho em termos de correlação e RMS é o RegHadGEM2 (Figura 3.14f). As simulações RegMPI e RegGFDL subestimam a temperatura observada nas estações, apresentando bias frio no inverno de  $-0,35\text{ °C}$  e  $0,96\text{ °C}$  respectivamente. Em particular no inverno o bias das simulações é muito pequeno, já no verão os biases são maiores e



variam entre  $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  até quase  $-4^{\circ}\text{C}$  (Tabela 3.2.3). De fato, existe uma subestimação da temperatura em regiões de gradientes atitudinais altos.

Tabela 3.2.3 - Similar a Tabela 3.2.1, mas para o cluster 3.

<b>Cluster 3</b>		<b>Anual</b>	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Outono</b>
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	7,2	10	3,7	7,8	7,6
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	0,8	0,3	1,19	1,0	0,8
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	-1,5	-2,2	-0,4	-1,6	-2,0
	<b>bias(CRU)</b>	-2,4	-2,5	-1,6	-2,6	-2,8
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	-2,5	-3,5	-1	-2,6	-2,9
	<b>bias(CRU)</b>	-3,3	-3,7	-2,2	-3,6	-3,7
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	-2,3	-3,4	-0,4	-2,3	-3,0
	<b>bias(CRU)</b>	-3,1	-3,7	-1,5	-3,3	-3,8

No caso do cluster 4, a amplitude térmica das estações meteorológicas mostra um máximo no verão de  $11^{\circ}\text{C}$  e um mínimo de  $8^{\circ}\text{C}$  nos meses frios. Neste caso, o CRU apresenta um comportamento no ciclo anual muito similar ao das estações, com bias no verão de  $-0,4^{\circ}\text{C}$  e no de  $-0,7^{\circ}\text{C}$  (Tabela 3.2.4). Entre todos os clusters, neste o CRU apresenta melhor desempenho em reproduzir a temperatura das estações, com correlação de 0,99 e RMS menor que 0,1 (Figura 3.14h). O ciclo anual (Figura 3.14g) simulado possui menor amplitude térmica o que as estações. Comparativamente, o RegGFDL e RegMPI no geral apresentam maior bias frio (Tabela 3.2.4). A simulação com melhor desempenho é a RegHadGEM2, tendo biases entre  $-2,3^{\circ}\text{C}$  e  $-2,7^{\circ}\text{C}$ , correlação mais alta e menor RMS (Figura. 3.14h).

Tabela 3.2.4 - Similar à Tabela 3.2.1, mas para o cluster 4.

<b>Cluster 4</b>		<b>Anual</b>	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Outono</b>
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	8,9	10,6	6,4	9,7	9,1
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5	-0,4
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	-2,5	-2,2	-2,3	-2,7	-2,7
	<b>bias(CRU)</b>	-2,0	-1,8	-1,6	-2,2	-2,4
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	-3,5	-3,6	-2,9	-3,7	-3,8
	<b>bias(CRU)</b>	-3,0	-3,1	-2,2	-3,2	-3,5
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	-3,3	-3,5	-2,4	-3,5	-3,9
	<b>bias(CRU)</b>	-2,82	-3,0	-1,7	-3,0	-3,6

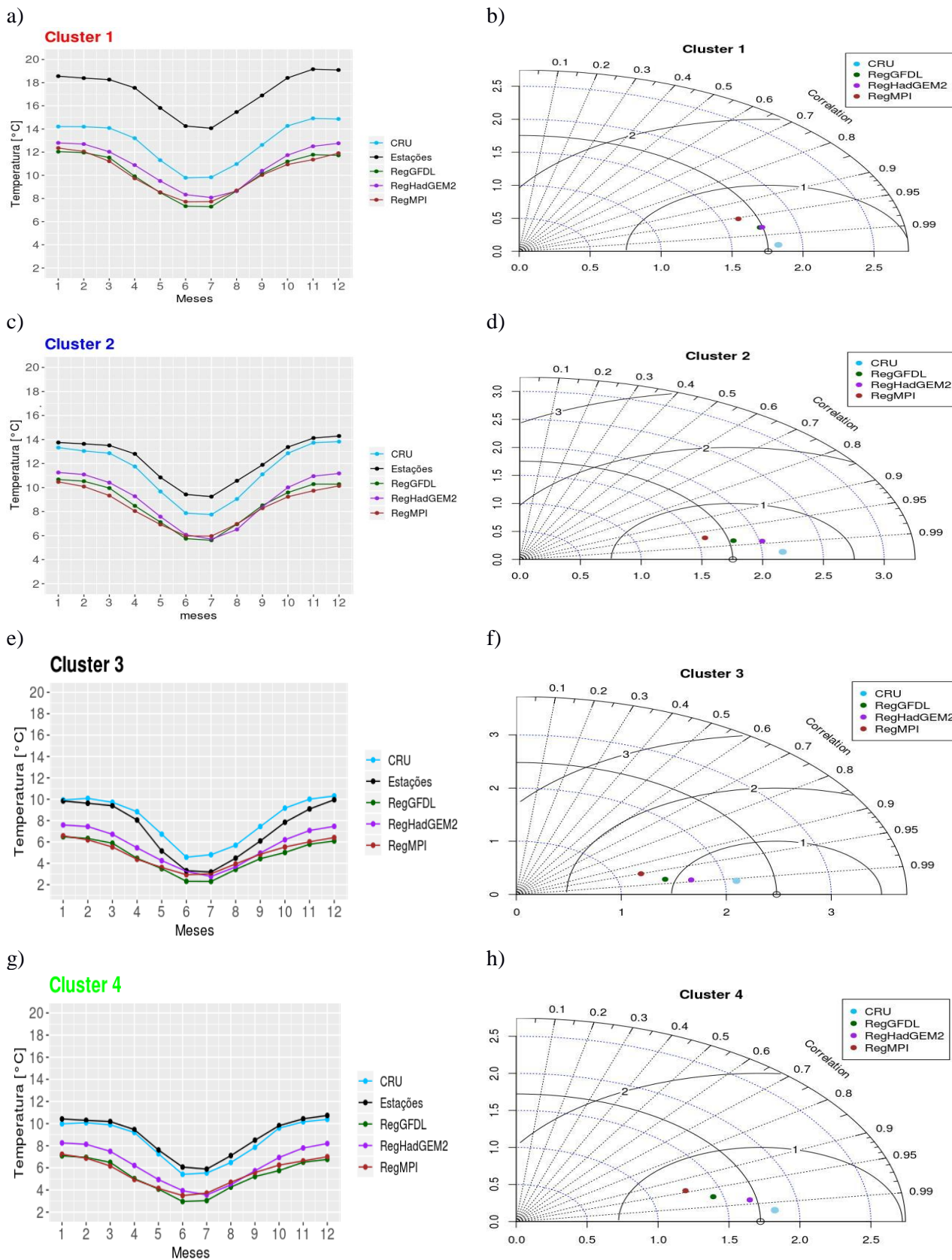


Figura 3.14 Ciclo anual climatológico (período 1981-2005) da temperatura média mensal e respectivo diagrama de Taylor observado (Estações e CRU) e simulado (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) para os: cluster 1 (a, b), cluster 2 (c, d), cluster 3 (e, f), cluster 4 (g, h).



### 3.4.2. Análise do ciclo anual da precipitação acumulada

Como a precipitação é uma variável meteorológica discreta, é necessário ter cuidado na análise e definição do número de clusters. A Figura 3.15c mostra a regionalização feita através da análise de cluster para a variável precipitação acumulada anual. O número ótimo de clusters (ou regiões) está relacionado ao Dendograma apresentado na Figura 3.15a. Neste Dendograma pelo método Ward procura-se a distância mínima (ou maior similitude) entre cada cluster (Wilks, 2006; Espinoza et al., 2008). A regionalização para precipitação está conectada a chuva média anual precipitação de cada estação meteorológica, já que é necessário conhecer os períodos secos e úmidos. Neste caso, foram selecionados 4 clusters, que para sua melhor visualização a Figura 3.15b mostra um Boxplot em função a precipitação média anual com as seguintes características:

- ✓ **Cluster 1:** Considerada a região com maior precipitação anual ao longo do ano, entre 1000 e 1500 mm, e situada em partes específicas dos Andes (no meio do LT).
- ✓ **Cluster 2:** Considerada a região com precipitação anual elevada, entre 250 e 750 mm, e situada principalmente próximas e ao sul/sudeste do LT.
- ✓ **Cluster 3:** Considerada a região com precipitação anual também elevada, entre 500 e 1000 mm, situada principalmente próximo e ao norte do LT e em altitudes maiores que 4000 m nos Andes.
- ✓ **Cluster 4:** Considera regiões com pouca precipitação a maioria das estações próximas do Altiplano sul da Bolívia e em parte da costa do Peru.

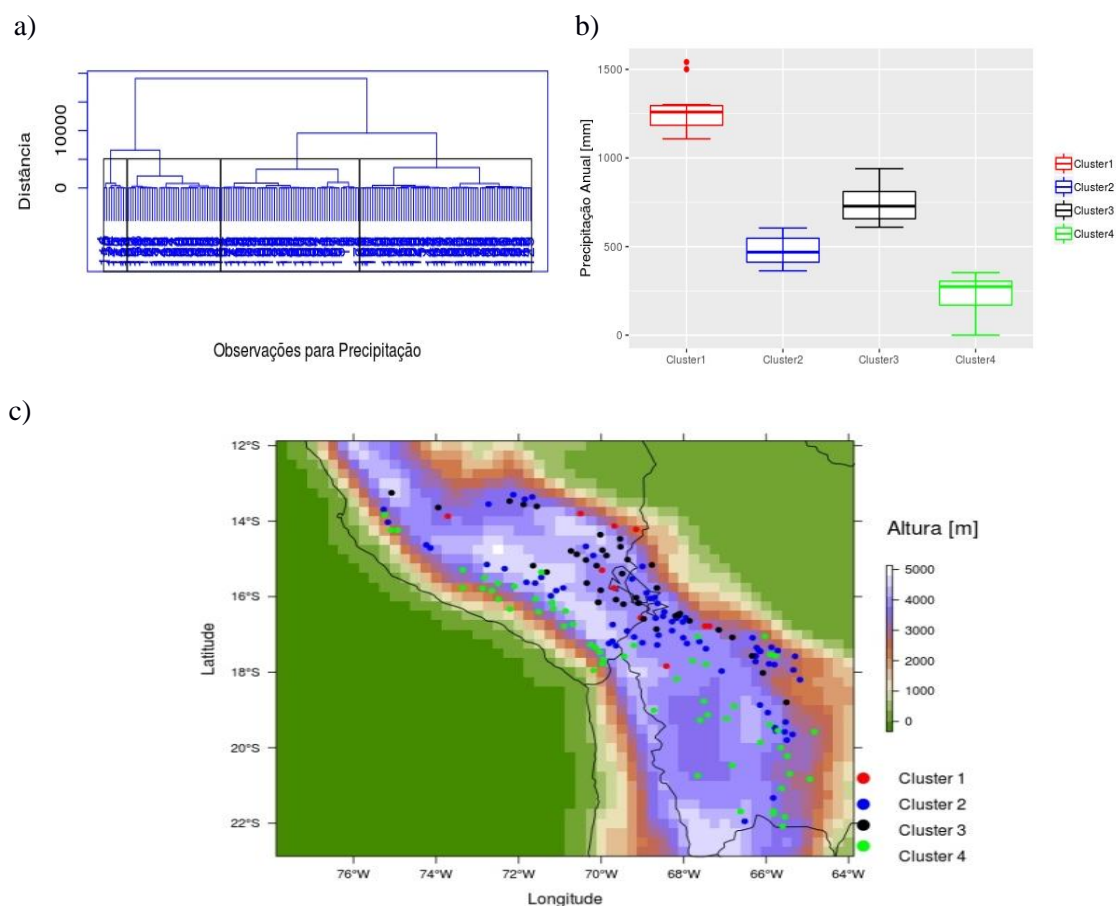


Figura 3.15 Resultado da análise de cluster. (a) Dendograma, (b) Boxplot da precipitação média anual e em (c) os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as cores identificam os 4 clusters (zonas) identificados para precipitação.

No caso da precipitação acumulada além das observações das estações e do CRU foram adicionadas as observações CHIRPS e CPC no processo de validação do clima presente. A Figura 3.16 mostra o ciclo anual observado e simulado, assim como o respectivo diagrama de Taylor.

Tabela 3.2.5 Bias de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 1.

Cluster 1		Anual	Verão	Inverno	Primavera	Outono
Estações	<b>Média</b>	116	241	26	89	107
CRU	<b>Bias</b>	-45	-98	-10	-32	-39
CHIRPS	<b>Bias</b>	-45	-99	-11	-34	-37
CPC	<b>Bias</b>	-60	-126	-12	-45	-55
RegHadGEM2	<b>bias(Estações)</b>	106	142	42	124	115
	<b>bias(CRU)</b>	151	241	52	156	154
	<b>bias(CHIRPS)</b>	152	242	53	159	152

	<b>bias(CPC)</b>	166	269	54	169	170
RegGFDL	<b>bias(Estações)</b>	29	20	-1	49	46
	<b>bias(CRU)</b>	74	119	9	82	85
	<b>bias(CHIRPS)</b>	74	119	10	84	83
	<b>bias(CPC)</b>	89	147	11	95	101
RegMPI	<b>bias(Estações)</b>	31	39	-5	45	46
	<b>bias(CRU)</b>	76	138	5	77	85
	<b>bias(CHIRPS)</b>	77	139	5	79	83
	<b>bias(CPC)</b>	91	166	6	90	102

O ciclo anual da precipitação mensal para o cluster 1 é apresentada na Figura 3.16a, onde o acumulado mensal possui valores máximos no intervalo de 125-400 mm/mês nos meses de verão e valores mínimos no intervalo 0-75 mm/mês no inverno. Nota-se que as simulações RegHadGEM2 e RegMPI comparadas com estações meteorológicas apresentam valores de bias maiores, entre 142 e 39 mm/mês, no verão (Tabela 3.2.5), superestimando a precipitação acumulada da estação, mas mesmo assim mostram forte correlação ( $\sim 0.99$ ). No entanto, tanto os RMSs como os desvios padrão são altos para estas simulações (Figura 3.16b). Durante o inverno RegGFDL e RegMPI apresentam biases negativos e pequenos de -1 e -5 mm/mês. Além disso, existem diferenças negativas (ou seja subestimativa) entre as observações CRU, CHIRPS E CPC e a estações meteorológicas, especialmente no verão (Figura 3.16a). Outro fato notável é que CRU e CHIRPS têm um desempenho muito similar durante o ano todo. Um aspecto importante no cluster 1, revelado na Tabela 3.2.5 e Figura 3.16, que os biases de chuva das três simulações (RegHadGEM2, RegGFDL e RegMPI) são sempre menores quando estas são comparadas com os valores das estações, ou seja todas as simulações subestimam.

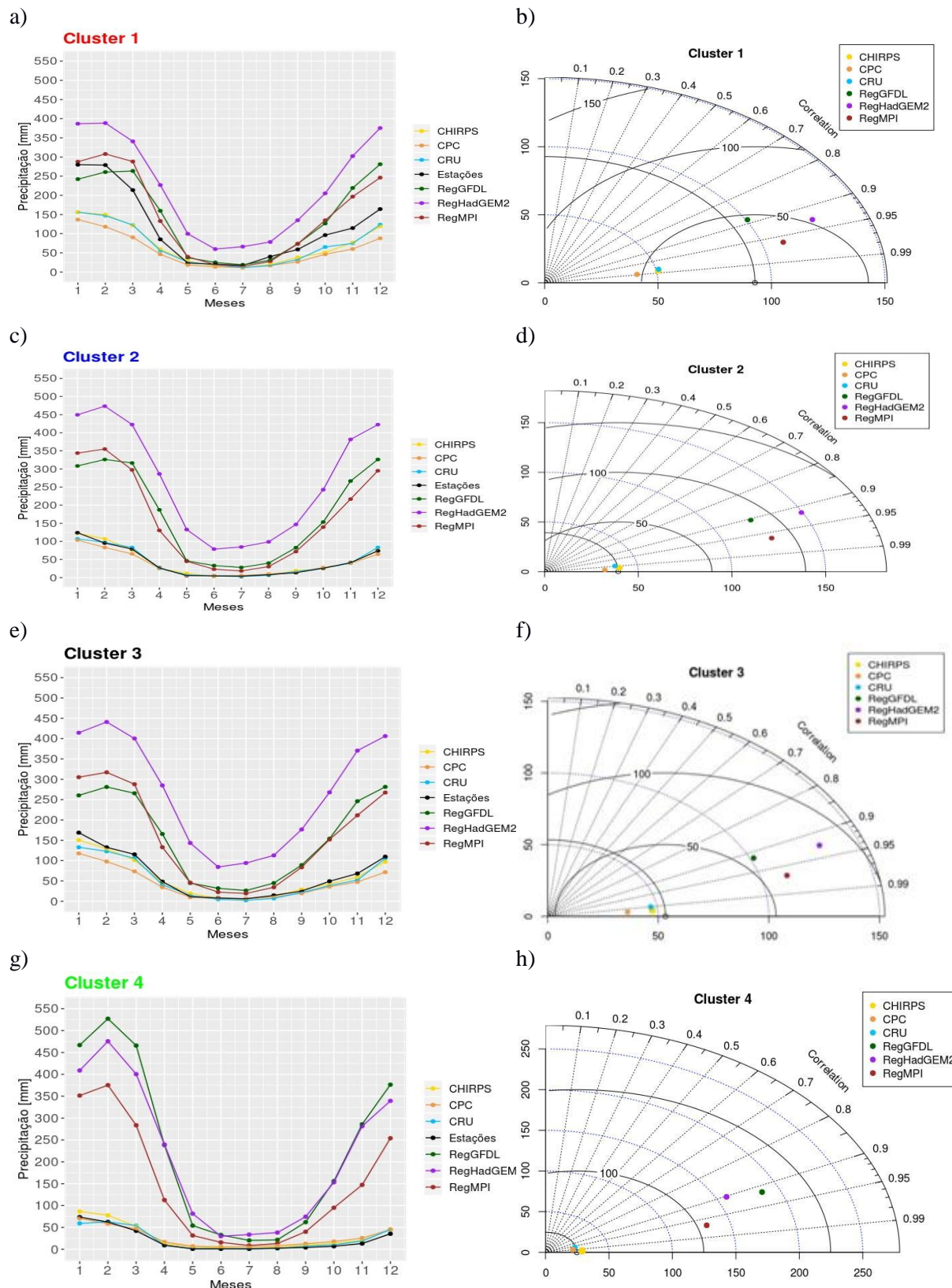


Figura 3.16 Ciclo anual climatológico (período 1981-2005) da chuva média mensal (mm) e respectivo diagrama de Taylor observado (Estações, CHIRPS, CPC e CRU) e simulado (RegGFDL, RegHadGEM2, RegMPI) para os: cluster 1 (a, b), cluster 2 (c, d), cluster 3 (e, f), cluster 4 (g, h).

Para o Cluster 2, as análises (CRU, CHIRPS e CPC) reproduzem ciclo anual de precipitação muito similar ao das estações meteorológicas (Figura 3.16c), apresentando máximo de 125-100 mm/mês no verão, enquanto os meses frios são bastante secos com chuva acumulada menor que 10 mm/mês. Ao longo das estações a diferença é bastante pequena entre as estações e as análises (Tabela 3.2.6). Não obstante, a diferença entre estações e simulações é maior no cluster 2 do que no cluster 1. Os reproduzem a fase do ciclo anual, mas superestimam os valores mensais e sazonais da precipitação (Figura 3.16c e Tabela 3.2.6). A amplitude do ciclo anual das simulações é muito acentuada, em particular do RegHadGEM2 apresentando super-estimativa de 380% na precipitação, mas como indica o diagrama de Taylor (Figura 3.16d) esta simulação apresenta forte correlação ( $\sim 0,93$ ) com as estações. Isto ocorre também para o RegGFDL ( $\sim 0,90$ ) e RegMPI ( $\sim 0,96$ ). Mas em função da forte superestimativa de chuva e maior amplitude do ciclo anual todas as simulações apresentam desvio padrão muito maior do que das estações e também alto RMS.

Tabela 3.2.6 Biais de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 2.

Cluster 2		Anual	Verão	Inverno	Primavera	Outono
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	42	98	6	27	37
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	0	-2	-1	1	2
<b>CHIRPS</b>	<b>Bias</b>	1	4	-1	1	1
<b>CPC</b>	<b>Bias</b>	-4	-14	1	1	-5
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	227	351	82	230	244
	<b>bias(CRU)</b>	227	353	83	230	242
	<b>bias(CHIRPS)</b>	225	347	83	229	242
	<b>bias(CPC)</b>	231	365	80	229	248
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	134	223	28	141	146
	<b>bias(CRU)</b>	135	224	29	140	145
	<b>bias(CHIRPS)</b>	133	219	29	139	145
	<b>bias(CPC)</b>	138	237	27	140	151
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	122	234	18	116	121
	<b>bias(CRU)</b>	122	236	20	115	119
	<b>bias(CHIRPS)</b>	121	230	19	115	119
	<b>bias(CPC)</b>	126	248	17	115	125

Com respeito à precipitação acumulada do cluster 3, o ciclo anual está definido nas observações com valores máximos no intervalo de 150-100 mm/mês nos meses de verão e valores

mínimos entre 0-4 mm/mês no inverno (Figura 3.16e). De fato, os resultados para o cluster 3 são similares aos do cluster 2, ou seja, as análises (CRU, CHIRPS e CPC) apresentam valores muito próximos das estações, enquanto as simulações superestimam a chuva ao longo do ano, mas representam corretamente a fase do ciclo anual resultando em correlações entre 0.91 e 0.97 (Figura 3.16e, f e Tabela 3.2.7). A maior amplitude do ciclo anual e a forte superestimativa de chuva ao longo do ano resultam também no cluster 3, assim como no cluster 2, em desvios padrões e RMSs altos nas simulações (Figura 3.16f).

Tabela 3.2.7 Idem à Tabela 3.2.5, mas o cluster 3.

<b>Cluster 3</b>		<b>Anual</b>	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Outono</b>
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	63	137	10	48	58
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	-9	-17	-5	-10	-5
<b>CHIRPS</b>	<b>Bias</b>	-5	-11	-1	-4	-3
<b>CPC</b>	<b>Bias</b>	-19	-41	-2	-13	-19
<b>RegHadGEM2</b>	<b>bias(Estações)</b>	203	284	88	224	218
	<b>bias(CRU)</b>	212	300	92	234	223
	<b>bias(CHIRPS)</b>	208	295	89	228	221
	<b>bias(CPC)</b>	222	325	89	237	237
<b>RegGFDL</b>	<b>bias(Estações)</b>	94	137	25	116	100
	<b>bias(CRU)</b>	103	154	30	126	105
	<b>bias(CHIRPS)</b>	99	149	26	119	103
	<b>bias(CPC)</b>	113	179	26	129	119
<b>RegMPI</b>	<b>bias(Estações)</b>	94	160	16	102	97
	<b>bias(CRU)</b>	103	176	21	112	102
	<b>bias(CHIRPS)</b>	98	171	17	105	100
	<b>bias(CPC)</b>	112	201	17	115	116

Finalmente, o cluster 4 é uma região que ao longo do ano apresenta pouca chuva, com intervalos de 60-90 mm/mês no verão e inverno bastante seco (Figura 3.16g e Tabela 3.2.8). De fato, é muito difícil para as simulações representar lugares de pouca chuva ao longo do ano por causa principalmente da modulação dos modelos globais nos Andes (Bazo, 2014). Assim, as simulações mostram a mais alta superestimativa de chuva da todos os clusters apresentados, mas segundo Llopart (2014) a subestimativa das observações CPC, CHIRPS E CRU têm a ver com a desempenho na MS. A

Tabela 3.2.8 mostra valores muito altos de bias entre estações meteorológicas e simulações. Comparativamente, a simulação RegMPI apresenta a melhor estatística, com correlação de 0,96, menor RMS e menor desvio padrão (Figura 3.16h). No caso das observações, realmente existe uma boa concordância entre elas em termos estatísticos para o ciclo anual, mostrando estar em fase e com valores de chuva mensal próximo ao das estações (Figura 3.16g e h).

Tabela 3.2.8 Bias de Precipitação acumulada do ciclo anual sazonal para o cluster 4.

<b>Cluster 4</b>		<b>Anual</b>	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Outono</b>
<b>Estações</b>	<b>Média</b>	<b>21</b>	<b>57</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>18</b>
<b>CRU</b>	<b>Bias</b>	<b>2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>CHIRPS</b>	<b>Bias</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>
<b>CPC</b>	<b>Bias</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>6</b>
<b>RegHadGEM2</b>		<b>192</b>	<b>351</b>	<b>32</b>	<b>162</b>	<b>223</b>
	<b>bias(Estações)</b>					
	<b>bias(CRU)</b>	<b>190</b>	<b>352</b>	<b>33</b>	<b>158</b>	<b>219</b>
	<b>bias(CHIRPS)</b>	<b>185</b>	<b>338</b>	<b>31</b>	<b>155</b>	<b>217</b>
	<b>bias(CPC)</b>	<b>186</b>	<b>350</b>	<b>27</b>	<b>151</b>	<b>217</b>
<b>RegGFDL</b>		<b>205</b>	<b>400</b>	<b>23</b>	<b>160</b>	<b>235</b>
	<b>bias(Estações)</b>					
	<b>bias(CRU)</b>	<b>203</b>	<b>401</b>	<b>24</b>	<b>156</b>	<b>231</b>
	<b>bias(CHIRPS)</b>	<b>198</b>	<b>387</b>	<b>22</b>	<b>153</b>	<b>229</b>
	<b>bias(CPC)</b>	<b>199</b>	<b>399</b>	<b>18</b>	<b>149</b>	<b>229</b>
<b>RegMPI</b>		<b>123</b>	<b>270</b>	<b>11</b>	<b>86</b>	<b>125</b>
	<b>bias(Estações)</b>					
	<b>bias(CRU)</b>	<b>121</b>	<b>271</b>	<b>11</b>	<b>82</b>	<b>121</b>
	<b>bias(CHIRPS)</b>	<b>116</b>	<b>257</b>	<b>10</b>	<b>80</b>	<b>119</b>
	<b>bias(CPC)</b>	<b>117</b>	<b>269</b>	<b>6</b>	<b>75</b>	<b>119</b>

Na maior parte dos clusters, a análise do CPC apresenta fase mais secas do que CHIRPS e CRU, mesmo assim apresenta correlações altas com as estações. No inverno as simulações representam mais adequadamente a precipitação, visto as precipitações são escassas e em geral as simulações diminuem consideravelmente a chuva nesta estação (Figura 3.16). Existe uma clara tendência das análises (CRU, CPC e CHIRPS) apresentarem valores baixos de chuva, mesmo as estações locais reportando valores muito altos de precipitação como ocorreu no cluster 1 (Figuras 3.16a). Neste cluster em particular as estações simulam chuva mensal muito mais próxima das estações do que as outras análises. Efetivamente, em todos os clusters as observações oscilam entre valores 150-60 mm/mês de



precipitação nos meses de verão (Figuras 3.16). Nas Figuras 3.16 b, d, g e h, destacam-se dois grupos, um grupo muito perto das estações meteorológicas, que corresponde às observações CRU, CHIRPS e CPC, e outro grupo, o das simulações, RegMPI, RegHadGEM2 e RegMPI. A simulação com maior correlação com as estações nos 4 clusters foi a RegMPI, e de correlação mais baixa foi RegHadGEM2.

### 3.5. Variabilidade Climática: 1981-2005

Este item apresenta uma análise da variabilidade interanual dos 4 cluster para os dados das estações meteorológicas e análises de observação (CRU, CHIRPS e CPC) e das simulações climáticas (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI). As séries de anomalias mensais no período 1981-2005 foram filtradas na escala interanual. O objetivo é analisar a habilidade das simulações em reproduzir as características observadas e também os eventos extremos secos/úmidos (frios/quentes) representados, respectivamente, pelos percentis 25%/75% para as anomalias de chuva e temperatura.

#### 3.5.1. Temperatura

A Figura 3.17 mostra as observações meteorológicas para cada cluster. Em geral, todos os clusters estão em fase e têm uma tendência de amplificar o sinal interanual em eventos ENSO, como ocorre nos anos 1983, 1988 e especialmente 1998.

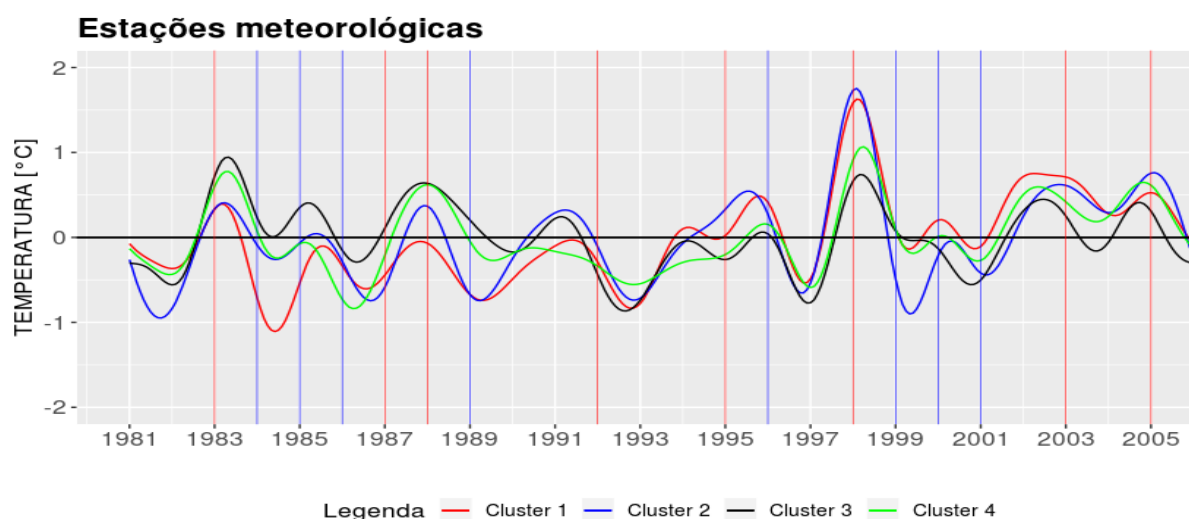


Figura 3.17 Anomalia interanual o clima presente (1981-2005) de temperatura média mensal para as estações meteorológicas e para cada cluster. As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño e La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.



A Figura 3.17 para o cluster 1, mostra inicialmente baixa sinal, mesmo sendo o cluster que apresenta maior temperatura na região, enquanto o cluster 3 mostra maior sinal sendo o a região com temperaturas menores da região. Um destaque no ano La niña 2000 com forte sinal no cluster 2.

Para o cluster 1, a Figura 3.18 mostra que as observações CRU amplificam o sinal interanual das estações, superestimando a temperatura média até o mais o menos o ano 1995, depois existe uma interseção entre o CRU e estações. Nos anos subsequentes, os valores do CRU tendem a subestimar o sinal interanual por longo do tempo. No entanto, existe grande similaridade no comportamento das anomalias de temperatura média durante os períodos 1982 até 1990 especialmente. Nesse intervalo, o CRU e as estações estão em fase. Há um atraso da anomalia positiva de temperatura no ano El niño 1985. No caso no ano La niña 1985 há uma anomalia positiva apresentada pelas observações CRU, enquanto as estações meteorológicas mostram anomalia negativa. De fato, existe uma superestimação de CRU especialmente no cluster 1.

O comportamento da variabilidade interanual no cluster 2 é muito similar ao cluster 1. No cluster 2 (Figura 3.18), as anomalias do CRU e das estações sempre estão em fase, indicando que o CRU representa adequadamente a variabilidade de temperatura observada. Existe uma subestimativa da intensidade das anomalias positivas pelo CRU entre 1981 até 1997, e após este período ocorre uma inversão culminando com amplitude de El Niño 1998 maior no CRU. Nenhum erro significativo ocorre em qualquer ano. Nos períodos La niña 1999,2000 e 2001 a sinal esta bem acentuada.

Existe uma forte similaridade entre o CRU e as estações no comportamento das anomalias de temperatura nos anos de La Niña (1984, 1985, 1986) no cluster 3 (Figura 3.18). Até 1992 a fase e intensidade das anomalias é muito semelhante, e entre 1992 a 1995 o CRU apresenta anomalias negativas em contraposição às estações. Comparativamente o impacto do El Niño 1998 na anomalia de temperatura é muito menor do que nos clusters 1 e 2. No caso no cluster 3 no El Niño 1998 existe um ligeiro adiantamento no CRU das anomalias positivas, embora a magnitude da anomalia seja muito próximo nas estações e no CRU. Há uma defasagem muito interessante tomando como exemplo o intervalo entre os anos de El Niño 1992 e 1995, onde o CRU apresenta anomalia positiva muito

marcada, enquanto que as estações meteorológicas apresentam anomalias negativas. Nos anos de La Niña em 2001 e de El Niño em 2003 não existe forte semelhança entre estações e CRU, mesmo considerando que estes eventos tiveram um impacto muito pequeno na anomalia de temperatura. No geral, é importante destacar que quando estão em fase às estações e observações CRU há uma desinteficação do sinal, e quando CRU intensifica sinal esta fora de fase.

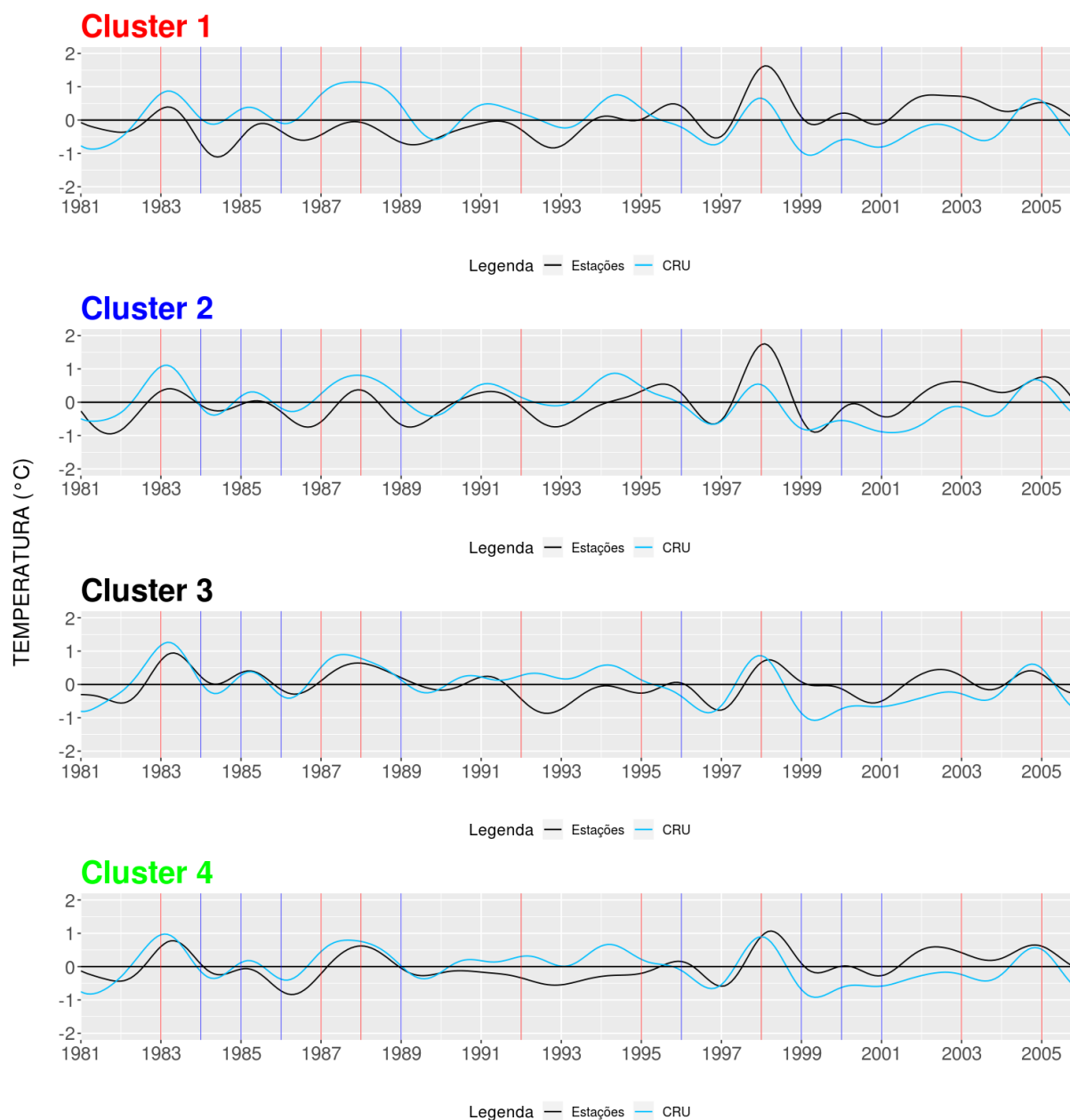


Figura 3.18 Anomalias interanuais de temperatura para as estações meteorológicas (linha preta) e CRU (linha azul) para o cluster 1 (título vermelho), cluster 2 (título azul), Cluster 3 (título preto), cluster 4 (título verde). As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño ou La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.

Finalmente no caso do cluster 4 (Figura 3.18), as observação CRU amplificam a intensidade das anomalias de temperatura. Entretanto, as oscilações presentes na variabilidade interanual do CRU são similares as das estações. No período do El Niño 1998, assim como notado no cluster 3, o CRU antecipa o pico positivo de temperatura que só é observado nas estações no cluster 4 cerca de dois meses depois (Figura 3.18). Um ponto interessante na Figura 3.18 é que durante o período 1990-1996 a variabilidade interanual é bastante fraca nas estações e também no CRU, mas com sinais opostos entre si.

De acordo com a Figura 3.18 a magnitude do sinal associado à variabilidade interanual é maior nos clusters 1 e 2 do que nos clusters 3 e 4. Estudos indicam para zonas dos Andes são observadas anomalias de temperaturas positivas em anos de atuação do fenômeno El Niño (Bazo, 2014; Garreaud, 2009). Porém, existem outros fatores climáticos que modulam a temperatura, tais como, processos radiativos nas regiões montanhosas ou mudanças na circulação. Por exemplo, a anomalia de vento zonal muda de sinal sobre o altiplano, resultando em uma alternância de condições secas e úmidas entre o norte e sul do altiplano (Garreaud, 2009).

No caso das simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI), na Figura 3.19 note-se que estas apresentam padrão similar de variabilidade interanual de temperatura, tanto na fase como na amplitude, para os 4 clusters. As três simulações começam com uma anomalia negativa em 1983 e apresentam outros picos (positivos ou negativos) coincidentes. No entanto, desde que as simulações acopladas dos GCMs que forçaram o RegCM4 a atmosfera-oceano estão interagindo não se espera que as mesmas reproduzam os eventos nas datas observadas e mesmo que cada uma delas esteja em fase entre si. Desta forma, é mais importante comparar a amplitude das anomalias. Comparativamente, o RegGFDL simula anomalias mais intensas, principalmente as positivas, do que o RegMPI e RegHadGEM2 (Figura 3.19). Além disto, as anomalias no RegGFDL apresentam ciclo mais definidos (~5-6 anos) do que nas outras duas simulações. Por outro lado, na maior parte da série temporal (exceto na parte inicial da série) o RegHadGEM2 simula amplitudes menores para as anomalias interanuais de temperatura (Figura 3.19). Já o RegMPI tende a simular anomalias com períodos mais

longos e com amplitudes intermediárias entre os modelos, ou seja, maiores do que o RegHadGEM2 e menores do que o RegGFDL.

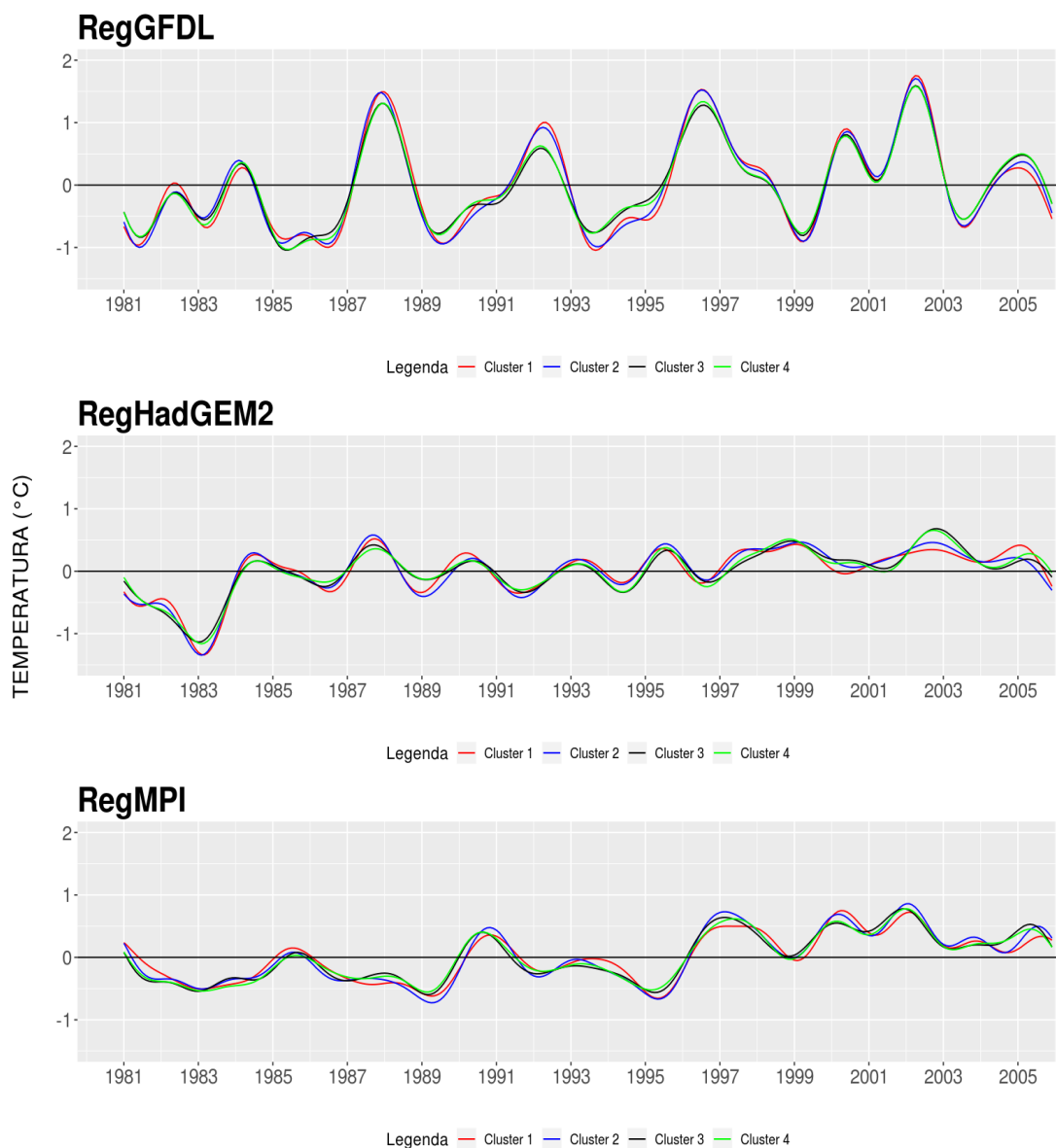


Figura 3.19 Anomalias interanuais de temperatura para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI. Cada figura corresponde a cluster 1, cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4.

Mostra-se na Figura 3.20 os limiares dos eventos extremos frios (percentil 25%) e quentes (percentil 75%) para cada cluster, estações meteorológicas, análises e simulações. A simulação RegMPI em eventos frios apresenta valores dos limiares de temperatura mais próximos do CRU e estações, especialmente no cluster 1 (Figura 3.20a), enquanto no RegGFDL e RegHadGEM2 os eventos frios são, respectivamente, mais quentes e mais frios do que nas observações. Também no

caso dos limiares quentes o RegMPI apresenta valores muito próximos dos das estações meteorológicas em todos os clusters (Figuras 3.20a e d).

Como mostra a Figura 3.20, o RegGFDL apresenta valores mais altos do que as estações, tanto nos limiares frios como quentes. De fato, uma forte superestimativa dos períodos frios no RegGFDL é aparente principalmente nas Figuras 3.20(a), (b) e (d), mas para limiares quentes as anomalias do RegGFDL são mais próximos daqueles do CRU nos clusters 1, 2 e 3. Por último, na simulação RegHadGEM2 os extremos apresentam valores mais baixos do que o CRU e estações, principalmente nos limiares frios, em todos os clusters como mostra a Figura 3.20. Apenas no cluster 1 a anomalia quente do RegHadGEM é similar à das estações.

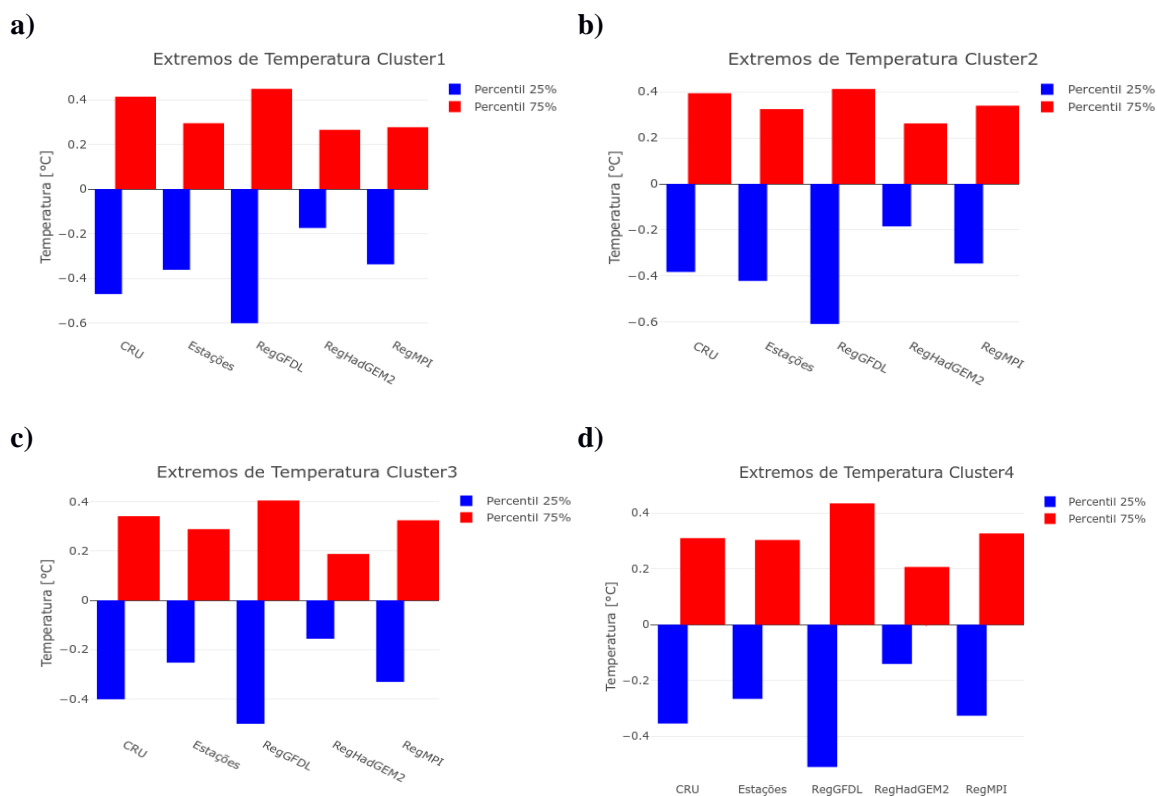


Figura 3.20 Limiares superiores, percentil de 75% (vermelho), e inferiores, percentil de 25% (azul), das anomalias interanuais de temperatura para as estações, simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) e CRU para: cluster 1 (a), cluster 2 (b), cluster 3 (c) e cluster 4 (d).

### 3.5.2. Precipitação

A Figura 3.21 apresenta as anomalias da precipitação filtrada na escala interanual para os 4 clusters para as observações das estações meteorológicas. Segundo Garreaud (2009), os Andes tropicais experimentam uma diminuição (aumento) da precipitação nos eventos El Niño (La Niña). Isto resulta do maior gradiente térmico meridional, entre os trópicos e subtropicais, intensificando então o escoamento de oeste na média e alta troposfera sobre os Andes centrais. Como consequência, diminui o transporte de ar úmido do interior do continente para o altiplano, limitando assim a convecção sobre o altiplano em anos de El Niño. Um comportamento inverso explicaria o aumento da chuva em anos de La Niña. Este padrão é observado em todos os clusters, mas com intensidades diferentes, ou seja, o sinal interanual é mais intenso nos clusters 1 e 3 do que nos clusters 2 e 4.

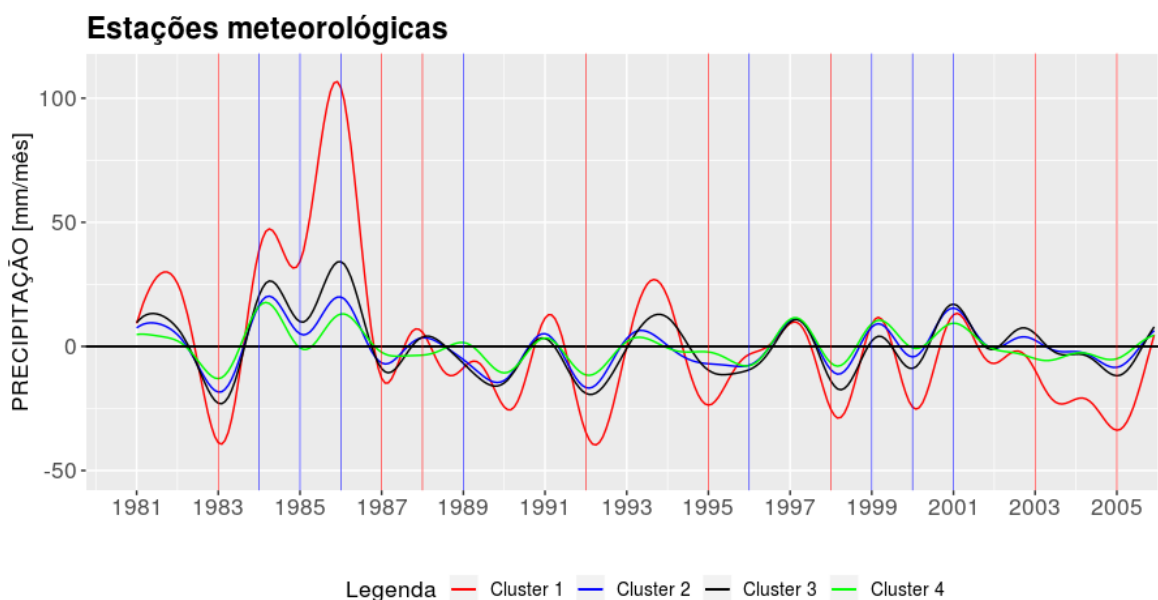


Figura 3.21 Anomalia interanual no clima presente (1981-2005) de precipitação mensal para as estações meteorológicas para cada cluster. As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño e La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.

A Figura 3.22 mostra um comportamento similar em termos de fase do sinal da anomalia em todos os clusters, mas existem diferenças marcantes entre os clusters. Em particular, no cluster 1 (Figura 3.22), tanto as análises (CRU, CPC e CHIRPS) como estações mostram sinal positivo da chuva no ano de 1981 e também entre 1984-1986, sendo que neste último período as anomalias das análises são

menores do que nas estações. Nos El Niños de 1983, 1987, 1992 apresentam anomalias negativas de precipitação, que são menores nas análises do que nas estações. Cabe ressaltar, nos períodos do El Niño 1988 o CPC subestima as anomalias de precipitação mostrando valores negativos, no 1995 os valores das observações CRU, CHIRPS e CPC são próximos de zero, enquanto as estações indicam anomalias negativas. É bom destacar no ano de La Niña 1986 existe a maior amplitude de anomalia positiva nas estações devido à maior variabilidade nesta região, que é a zona mais mais chuvosa de todas. No entanto, as análises CRU, CHIRPS e CPC apresentam amplitude menor para esta anomalia do que as estações.

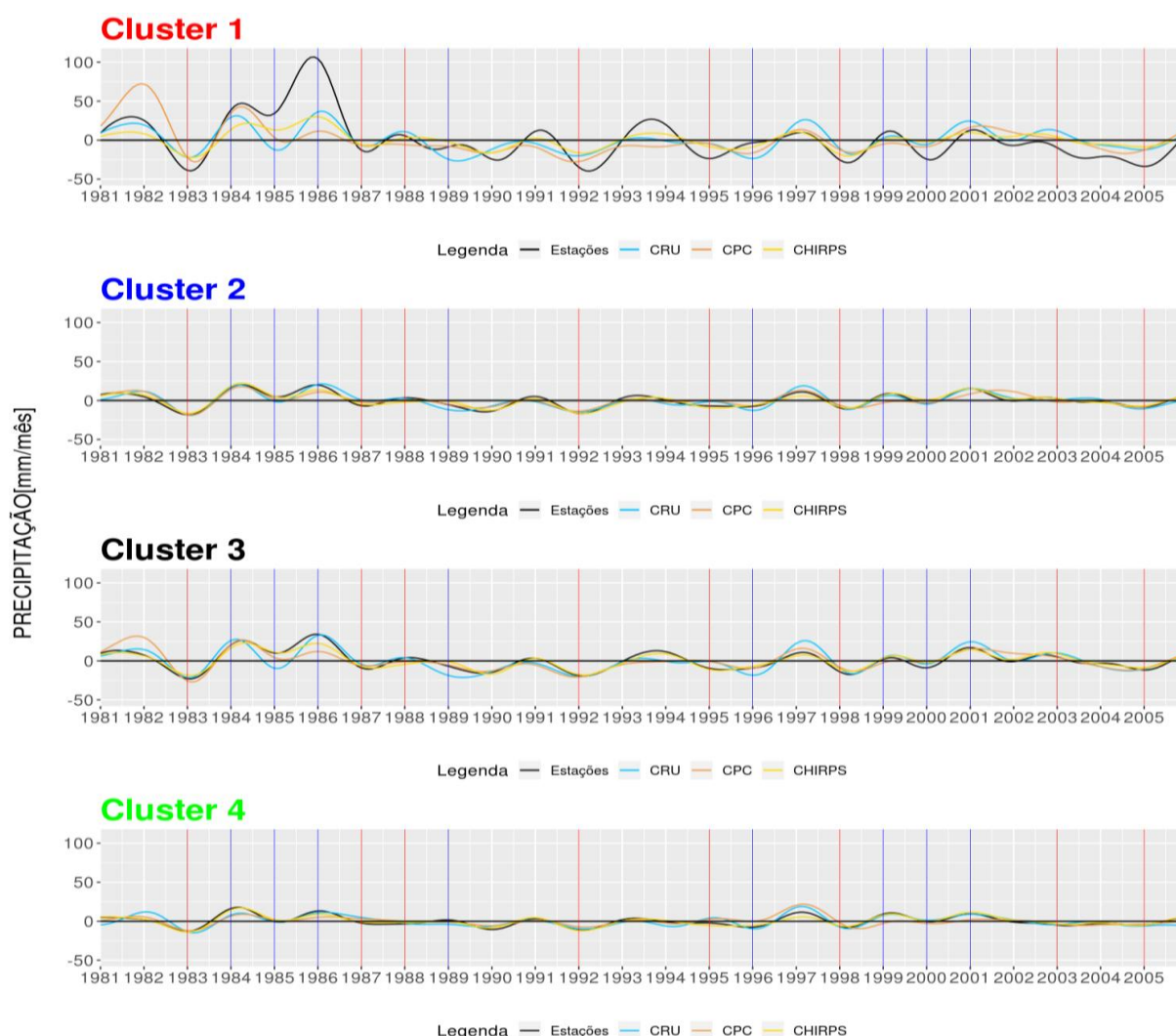


Figura 3.22 - Anomalias interanuais de precipitação acumulada para as estações meteorológicas (linha preta), CRU (linha vermelha), CHIRPS (linha amarela), CPC (linha laranja) obtidas no: cluster 1 (título vermelho), cluster 2 (título azul), cluster 3 (título preto), cluster 4 (título verde). As linhas vermelhas e azuis no eixo vertical indicam, respectivamente, os episódios de El Niño ou La Niña definidos de acordo com o índice ONI da NOAA.

A região do cluster 2 (Figura 3.22) não apresenta grandes amplitudes de anomalias. Em geral, neste cluster as intensidades das anomalias das análises (CPC, CRU e CHIRPS) são mais próximas daquelas das estações no cluster 2 do que no cluster 1. Inicialmente, as análises possuem a mesma fase e intensidade que as estações, especialmente nos anos 1983 e 1984. Nota-se que o CPC no evento El Niño de 1992 começa a apresentar uma defasagem atrasando a anomalia, enquanto ao longo dos anos o CHIRPS mostra o padrão de anomalia muito similar ao das estações. Por outro lado, o CRU mostra uma tendência de amplificar o sinal, ainda assim é capaz de reproduzir os máximos e mínimos que as estações meteorológicas registram na maioria dos anos.

Da mesma forma, o cluster 3 (Figura 3.22) exibe um comportamento semelhante ao cluster 2, em consequência da similaridade da variabilidade na precipitação nessas duas regiões. Não obstante, nota-se que o ano 1997 é o único onde as análises e as estações estão completamente em fase. Outras diferenças com o cluster 2 é que no cluster 3 o CPC apresenta no início de 1981 uma maior amplitude na anomalia de precipitação do que as demais análises. Assim como no cluster 2, no ano de La Niña de 1986 é o evento com maior anomalia positiva no cluster 3.

Por último, o cluster 4 (Figura 3.22) é a região que apresenta menor anomalia de precipitação ao longo do ano. Neste caso, as análises (CRU, CHIRPS e CPC) reproduzem a variabilidade interanual da precipitação presente nas estações. Em geral, seguem a fase e amplitude similares às observadas, sobretudo na localização dos máximos e mínimos. Em particular, este bom ajuste é melhor no CHIRPS devido ao fato que o CPC e CHIRPS representam a zona andina bem mais seca em comparações com outras análises. Então, desde que CPC e CHIRPS apresentam taxa de precipitação menor isto contribui para seu melhor desempenho em reproduzir as anomalias em zonas secas. No geral o cluster 4, quase não mostra sinal de anomalias interanuais.

A Figura 3.23 apresenta a anomalia interanual de precipitação das simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI. De fato, as simulações possuem a habilidade de representar sinal interanual de variabilidade da precipitação, mas como já mencionado cada uma tem sua frase própria de oscilação. Em alguns eventos existe coincidência de sinal, como por exemplo, no início da série. No



RegGFDL a variabilidade interanual possui mesma fase na maioria dos clusters, exceto no cluster 4 onde a amplitude da anomalia é maior do que nos demais e também possui fase oposta em alguns anos (1986, 1996, 2005).

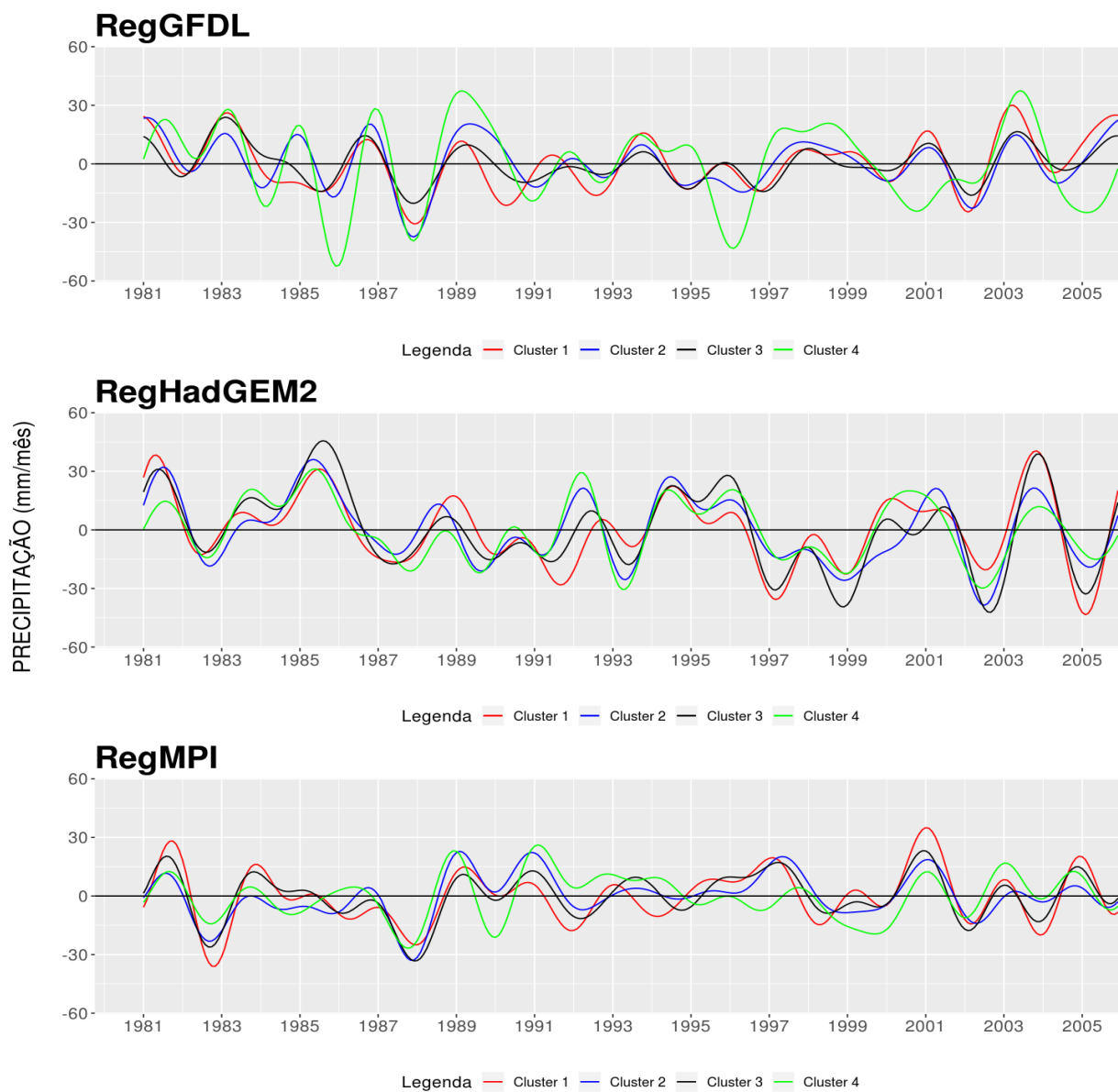


Figura 3.23 Anomalias interanuais de precipitação acumulada para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI nos clusters 1, 2, 3, 4.

De fato, os padrões de similitude que apresenta cada cluster não possuem uma boa fase entre elas, devido à variabilidade de precipitação de cada região de estudo, sendo os cluster 2 e 3 as zonas com maior parença, no mesmo tempo que os cluster 1 e 4, são zonas extremas de precipitação, o

primeiro exibindo valores máximos e o segundo está localizada numa região que mostra valores mínimos de precipitação. Na parte espacial a simulação RegHadGEM2 reproduz bastante precipitação na zona andina, mas nas anomalias de precipitação o RegGFDL apresenta valores altos para o cluster 4 que é um lugar que evidencia precipitações baixas, quando o esperado seria que o RegHadGEM2 apresente valores altos.

Por último, é importante considerar que para cada evento de El Niño ou La Niña os modelos não necessitam apresentar uma resposta simultânea à observada desde que estas simulações foram iniciadas em 1861 e desenvolvem a própria dinâmica de acoplamento, que independe do calendário das observações. Mas, nota-se claramente que as oscilações na escala interanual estão presentes nas simulações. Em termos de intensidade dos extremos na escala interanual nota-se que RegMPI simula valores mais próximos das estações na maioria dos clusters analisados, tanto para extremos de temperatura como de chuva.

Os limiares de eventos de extremos chuvosos (percentil 75%) e secos (percentil 25%) para as anomalias interanuais de precipitação estão apresentados na Figura 3.24. Para o clusters 1, os valores dos limiares do RegHadGEM2 de eventos extremos chuvosos são os mais próximos das estações meteorológicas, enquanto as análises (CRU, CHIRPS, CPC) e as simulações (RegGFDL e RegMPI) subestimam esses limiares (Figuras 3.24a). No cluster 1 os eventos secos observados nas estações são intensos, e neste caso tanto simulações como análises apresentam forte subestimativa deste limiar. Em relação aos limiares chuvosos e secos do cluster 2 (Figura 3.24b), tanto o RegMPI como CRU, CHIRPS e CPC apresentam valores semelhantes às estações meteorológicas, ao mesmo tempo, no RegHadGEM2 e RegGFDL estes valores são muito maiores do que apresentam a estações.

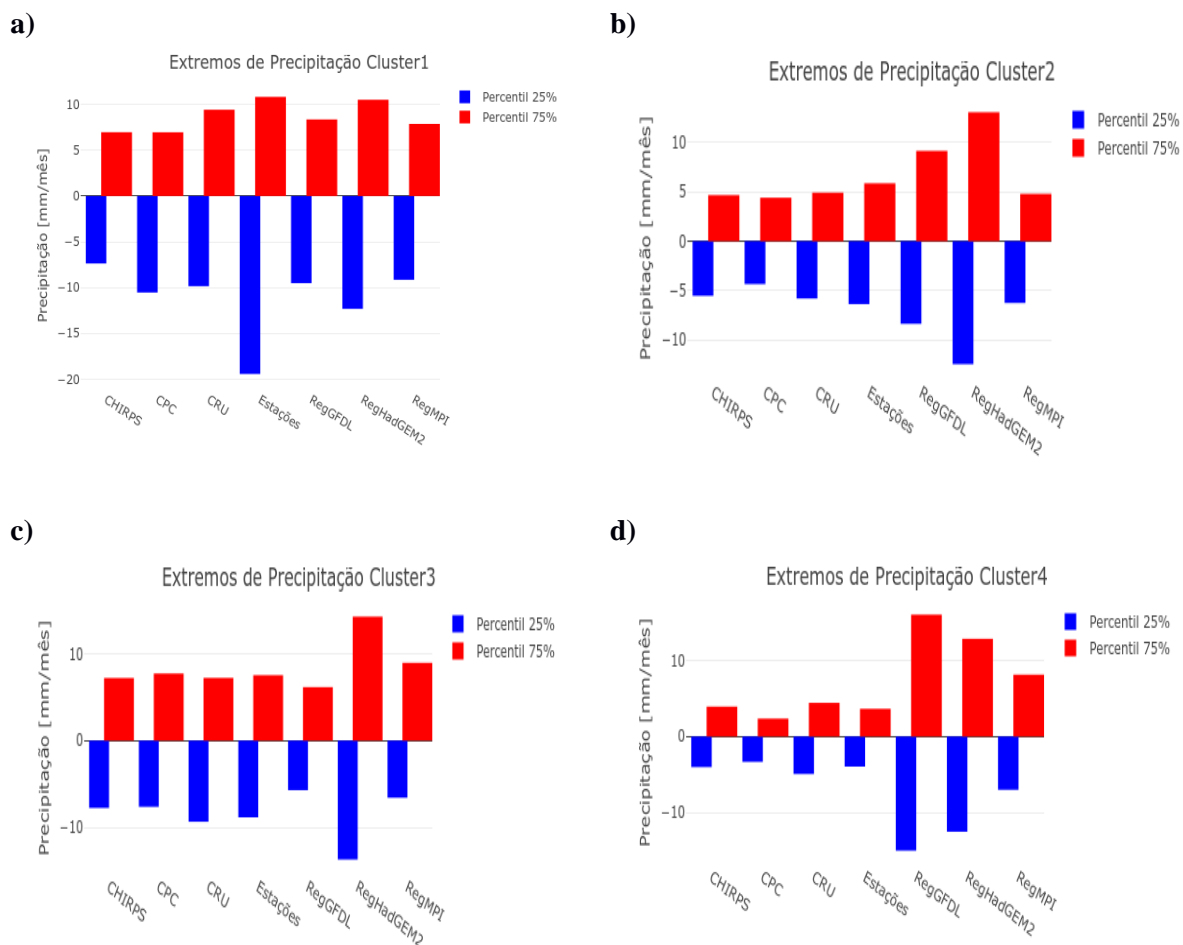


Figura 3.24 Limiões superiores dos percentis superiores 75% (vermelho) e inferiores 25% (azul) das anomalias interanuais para estações, CRU, CHIRPS, CPC e simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) para: cluster 1(a), cluster 2(b), cluster 3(c) e cluster 4(d).

Para os eventos secos e chuvosos do cluster 3 (Figura 3.24c), existe forte concordância entre CHIRPS, CRU e estações em relação aos valores dos percentis. Entre as simulações, os menores e maiores erros em termos de intensidade dos limiões secos e chuvosos são encontrados, respectivamente, no RegHadGEM2 (superestima ambos) e RegMPI (valores mais próximos das estações). Com Relação ao cluster 4 (Figura 3.24d), que é uma região com pouca precipitação, análises (CRU, CHIRPS e CPC) capturam muito bem os limiões secos e chuvosos das estações, mas as simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI) superestimam muito tanto os limiões inferiores como os superiores comparados com os das estações.

### 3.6. Tendências futuras de temperatura: 2030-2060

Esta seção apresenta a tendência futura de temperatura média anual no período 2030-2060 para as simulações RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI em todos os pontos das estações meteorológicas. A tendência foi calculada como a diferença entre o período futuro (2030-2060) e o clima presente (1981-2005).

Para a simulação RegGFDL, a Figura 3.25(a) apresenta as tendências de temperatura em cada estação meteorológica em função à latitude. Como várias estações situam-se em latitudes muito vizinhas, a Figura 3.25a indica o nome das estações de maneira consecutiva para cada ponto da Figura 3.25b. As regiões da Bolívia e Peru estão separada por 4 clusters (regiões) calculadas em função ao ciclo anual. No geral, todos os pontos exibem tendência positiva (maior 1,5 °C) indicando que são zonas muito vulneráveis às mudanças climáticas, como já discutido também por Urrutia et al. (2009). As estações entre 16°S e 18°S mostram uma tendência maior de aquecimento, podendo atingir 2.5°C, principalmente as estações Santiago de Machaca Achiri e Charaña que no clima atual se caracterizam como lugares frios nos Andes.

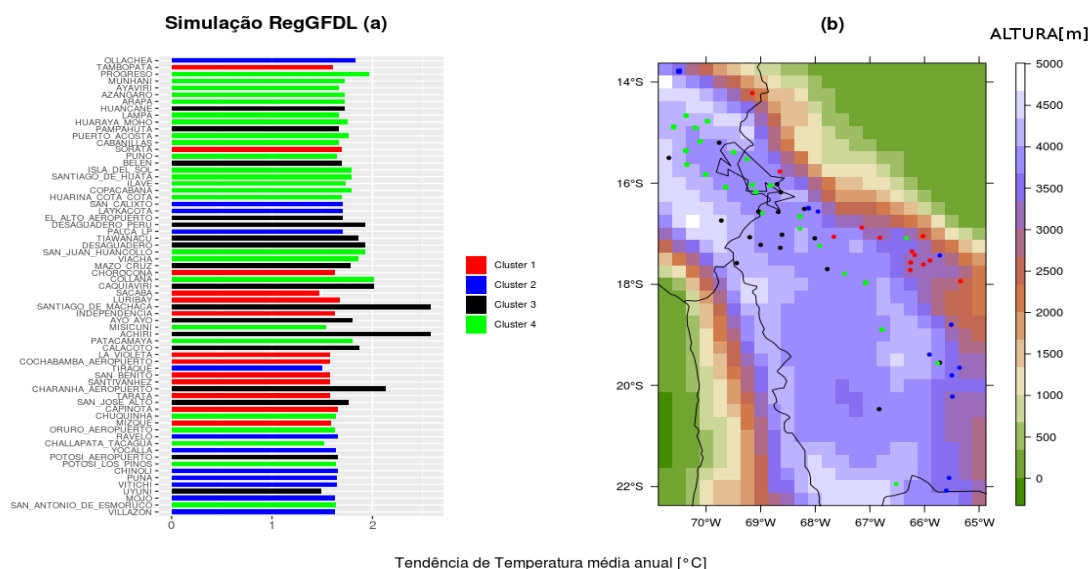


Figura 3.25 Variação meridional da tendência de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegGFDL. (a) Barras indicam a tendência de temperatura (°C) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.

A Figura 3.26 mostra a variação meridional da tendência anual de temperatura para o RegHadGEM2. Todas as estações indicam tendência positiva com valores muito similares, em torno de 2,2 °C. Nota-se, no entanto, que a localidade de Charaña, localizada em 17°S, apresenta um valor de tendência muito alto, próximo de 5 °C, diferindo da maior parte das estações. Esta estação está localizada numa altitude de 4000 m pelo que apresenta no presente um clima frio e seco. Em geral as tendências projetadas pelo RegHadGEM2 são muito similares variando entre 2 e 2.5 °C, exceto na localidade de Charaña.

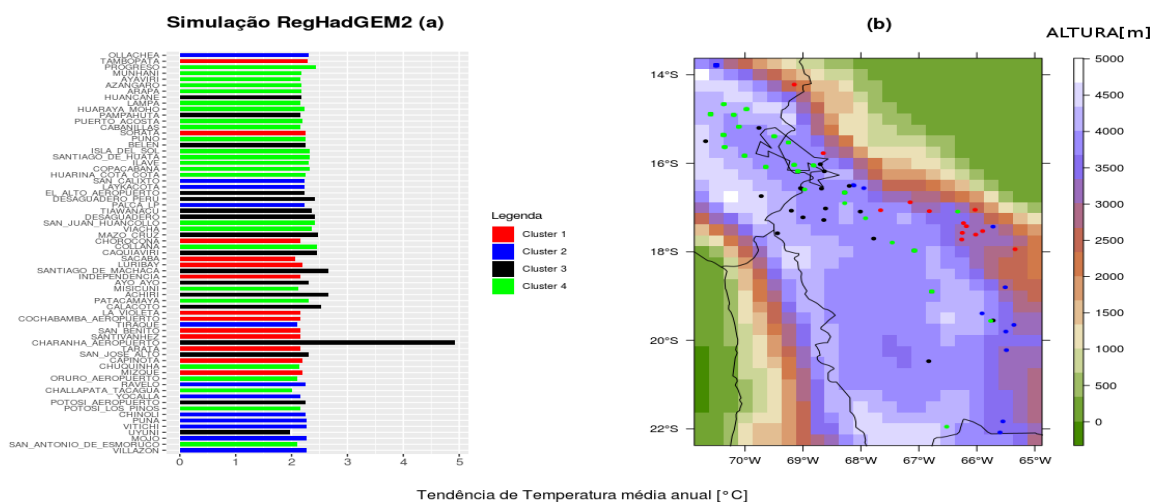


Figura 3.26 Variação meridional da tendência de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegHadGEM2. (a) Barras indicam a tendência de temperatura (°C) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.

A simulação RegMPI (Figura 3.27), mostra da mesma maneira que RegHadGEM2 e RegGFDL tendência positiva de temperatura em todas as estações, com valores entre 2 e 2.3 °C. É importante notar que assim como o RegHadGEM2 o RegMPI também apresenta a localidade de Charaña como um “outlier”, onde a tendência de aumento de temperatura chega a quase 3 °C.

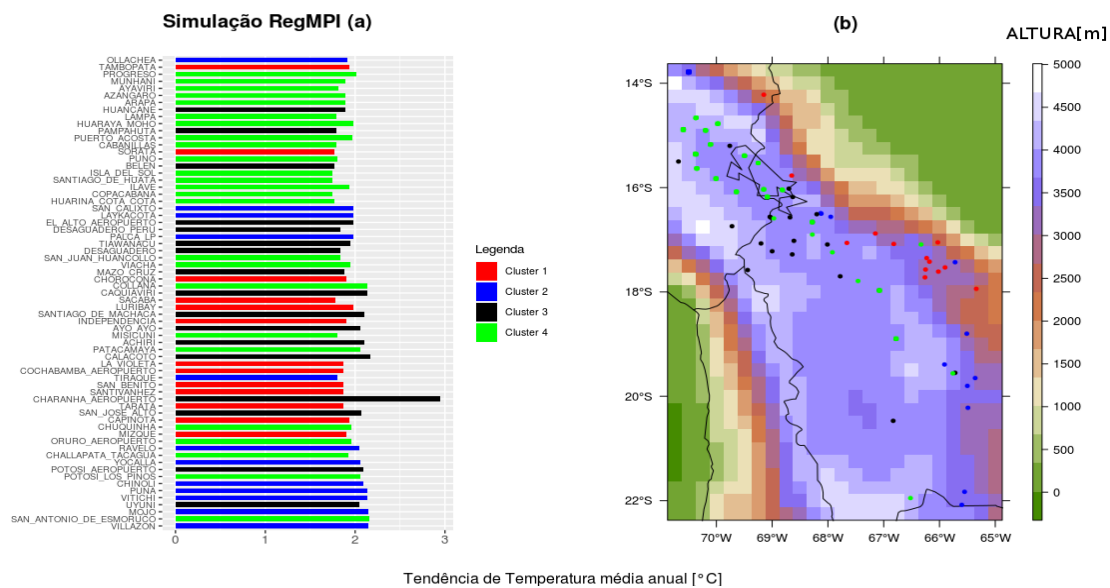


Figura 3.27 Variação meridional da tendência anual de temperatura média anual para o período 2030-2060 da simulação RegMPI. (a) Barras indicam tendências de temperatura em função à latitude de cada estação meteorológica para 4 cluster ou regiões. (b) Localização das estações meteorológicas.

Basicamente, em todas as simulações as latitudes têm maior tendência positiva de temperatura, estão entre 17°S e 19°S, que inclui regiões andinas muito frias no clima presente segundo as observações de estações meteorológicas (cluster 3). Uma razão para este maior aumento de temperatura seria a topografia da simulação RegCM4, desde que o espaçamento de grade de 50 km subestima (na maioria das estações) a altitude verdadeira em quase todas as estações (Figura 3.2). De acordo com estudos de modelagem do clima futuro nos Andes, todos projetam um aumento significativo da temperatura média, variando 1 e 3 °C, independentemente dos cenários e modelos (Andrade et al,2014; Bazo, 2014;Davila, 2016; Hoffmann, 2013; Seiler et al.,2012;Urrutia et al, 2009). No geral, o modelo subestima a temperatura média, então esse sinal de mudança no futuro pode ser maior.

A tendência de temperatura no cenário futuro é a variável meteorológica mais importante, é o melhor índice para o balanço da massa porque acopla processos extração e acumulação do gelo em regiões montanhosas considerando um intervalo de longo prazo (Hoffmann, 2013).

### 3.6.1. Densidade de probabilidade de temperatura: clima presente e futuro

A função densidade de probabilidade, ou PDF (Probability Density Function), descreve a probabilidade de ocorrência de um determinado valor de uma dada variável. A Figura 3.28 apresenta as PDFs para comparação entre as simulações e também do clima presente e futuro para cada cluster.

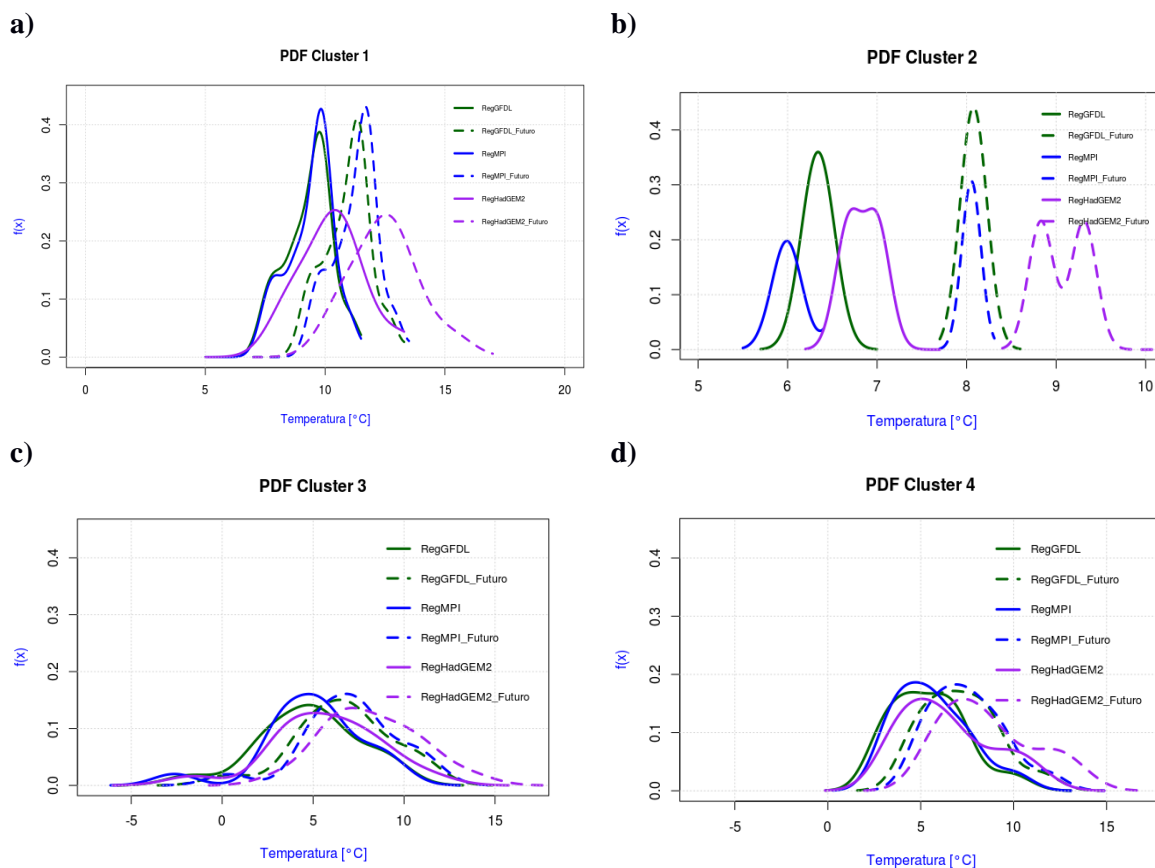


Figura 3.28 PDF para temperatura média anual dos modelos RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI no clima presente (1981-2005; linhas contínuas) e futuro (2030-2060; linhas tracejadas). (a) Cluster 1, (b) Cluster 2, (c) Cluster 3 e (d) Cluster 4.

As PDFs de temperatura média anual para o cluster 1, em cenário presente e futuro, são mostradas na Figura 3.28a. Nota-se que o RegGFDL e RegMPI apresentam distribuições muito semelhantes no clima presente, com alta frequência de valores próximo de 10°C, enquanto o RegHadGEM mostra uma distribuição deslocada para a direita e mais achatada. Todas as PDFs do clima futuro estão deslocadas para a direita em relação ao clima presente, mas mantêm a mesma forma do clima presente. Em termos de tendências, um aumento da média anual de 9,0°C no clima presente para 11°C é projetado pelo RegGFDL, ou seja, indicando uma mudança de 2°C. No caso do

RegMPI o valor médio anual de 8,2°C no clima presente é projetado atingir 10,2°C no futuro, um aumento de 2,0°C. Da mesma forma, o RegHadGEM2 exibe média anual de temperatura de 9,1°C no presente e no futuro de 12,0°C, um aumento de 2,9°C. Os desvios padrões variam entre 2,9°C e 1,4°C considerando em cenários diferentes, e apenas o RegMPI não indica aumento da variabilidade, como medida pelo desvio padrão, no clima futuro (Tabela 3.8.1).

Tabela 3.8.1 Temperatura média anual e desvio padrão no cenário presente e futuro para cluster 1.

<b>Cluster 1</b>	<b><math>\bar{x}</math>(Média) [°C]</b>	<b><math>\sigma</math> (Desvio Padrão) [°C]</b>
<b>RegGFDL</b>	9,0	1,4
<b>RegGFDL Futuro</b>	11,0	1,9
<b>RegHadGEM2</b>	9,1	2,4
<b>RegHadGEM2 Futuro</b>	12,0	2,9
<b>RegMPI</b>	8,2	1,8
<b>RegMPI Futuro</b>	10,2	1,8

A temperatura média anual para o cluster 2 apresenta distribuições de frequência próximas mais diferentes entre si para as simulações no clima presente (Figura 3.28b). Neste caso o RegGFDL mostra uma distribuição bastante estreita, com maior frequência de valores próximos da média (6,3°C), enquanto no RegMPI (deslocada para esquerda) e RegHadGEM2 (deslocada para a direita) mostram distribuições mais largas. No futuro, nota-se o deslocamento para a direita de todas as PDFs e maior similaridade entre RegMPI e RegGFDL, enquanto o RegHadGEM2 mostra um alargamento da distribuição, o mesmo padrão de mudanças de temperatura do que o cluster 1 entre cenário presente e futuro. O aumento da temperatura média anual no clima futuro varia de 1,8°C (RegGFDL) até 2,8°C (RegHadGEM2), enquanto que o desvio padrão é pequeno (varia entre 0,2°C e 0,4°C) e sofre pequena mudança no futuro (Tabela 3.8.2).



Tabela 3.8.2 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para o cluster 2.

<b>Cluster 2</b>	$\bar{x}$ (Média) [°C]	$\sigma$ (Desvio Padrão) [°C]
<b>RegGFDL</b>	6,3	0,4
<b>RegGFDL Futuro</b>	8,1	0,3
<b>RegHadGEM2</b>	6,4	0,4
<b>RegHadGEM2 Futuro</b>	9,2	0,5
<b>RegMPI</b>	6,0	0,3
<b>RegMPI Futuro</b>	8,0	0,2

Nos cluster 3 e 4 existe maior similaridade nas PDFs entre as três simulações tanto no clima presente como futuro (Figuras 3.28c e d). Estas distribuições são mais amplas, indicando maior variabilidade interanual de temperatura, e centradas em temperaturas mais frias (entre 4-5°C). O aquecimento projetado para a média anual no futuro oscila entre 1°C e 2°C e desvios padrões baixos principalmente nas simulações RegHadGEM2 e RegMPI onde os valores diferem só 0,1°C. As mudas de temperatura são significativas para todos os casos.

Tabela 3.8.3 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para cluster 3.

<b>Cluster 3</b>	$\bar{x}$ (Média) [°C]	$\sigma$ (Desvio Padrão) [°C]
<b>RegGFDL</b>	3,7	5,4
<b>RegGFDL Futuro</b>	5,6	5,3
<b>RegHadGEM2</b>	3,4	5,5
<b>RegHadGEM2 Futuro</b>	5,8	5,2
<b>RegMPI</b>	4,8	6,2
<b>RegMPI Futuro</b>	8,4	5,3

Em geral, todas as simulações apresentam uma mudança positiva na temperatura média anual. O

incremento de temperatura não é uniforme entre modelo presente e futuro. O maior incremento é no cluster 4 na simulação RegHadGEM2 com um valor de 2,3°C e o menor na simulação RegGFDL no cluster 1 mostrando 1°C.

Tabela 3.8.4 Temperatura média anual e desvio padrão em cenário presente e futuro para o cluster 4.

<b>Cluster 4</b>	$\bar{x}$ (Média) [°C]	$\sigma$ (Desvio Padrão) [°C]
<b>RegGFDL</b>	6,4	3,8
<b>RegGFDL Futuro</b>	8,0	3,7
<b>RegHadGEM2</b>	6,6	3,7
<b>RegHadGEM2 Futuro</b>	8,4	3,6
<b>RegMPI</b>	7,3	4,3
<b>RegMPI Futuro</b>	9,6	4,4

### 3.7. Tendências futuras de precipitação: 2030-2060

Para precipitação média anual foi calculada a tendência percentual futura para o período 2030-2060 e para as três simulações (RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI). A tendência relativa foi obtida considerando a diferença entre o clima futuro (2030-2060) e o presente (1981-2005) dividido pelo clima presente. Destaca-se nas Figuras 3.29 e 3.31 que várias estações situadas quase nas mesmas latitudes mostram diferentes sinais de tendência de chuva (Figura 3.29a).

Para a simulação RegGFDL (Figura 3.29a), a tendência percentual de precipitação mostra sinais positivas e negativas muito marcados entre 12°S e 14°S, onde o sinal positivo atinge valor máximo de 10%. Em seguida, nota-se tendência negativa na faixa de latitude entre 14°S até 16°S, com redução percentual de precipitação mais intensa que -10%, seguida de uma região, entre 16°S e até próximo de 22°S, em que a maior parte das estações indicam tendência positiva de chuva. Finalmente, ao sul existe sinal negativo pequeno mas consistente na maioria das estações. De fato, o cluster 4 (cor verde), que representa uma região com pouca precipitação, em geral apresenta tendência negativa de chuva em quase todas as latitudes, enquanto a maioria das estações do cluster 1 (cor vermelho), caracterizado por precipitações muito altas, mostram tendências positivas de chuva no clima futuro.

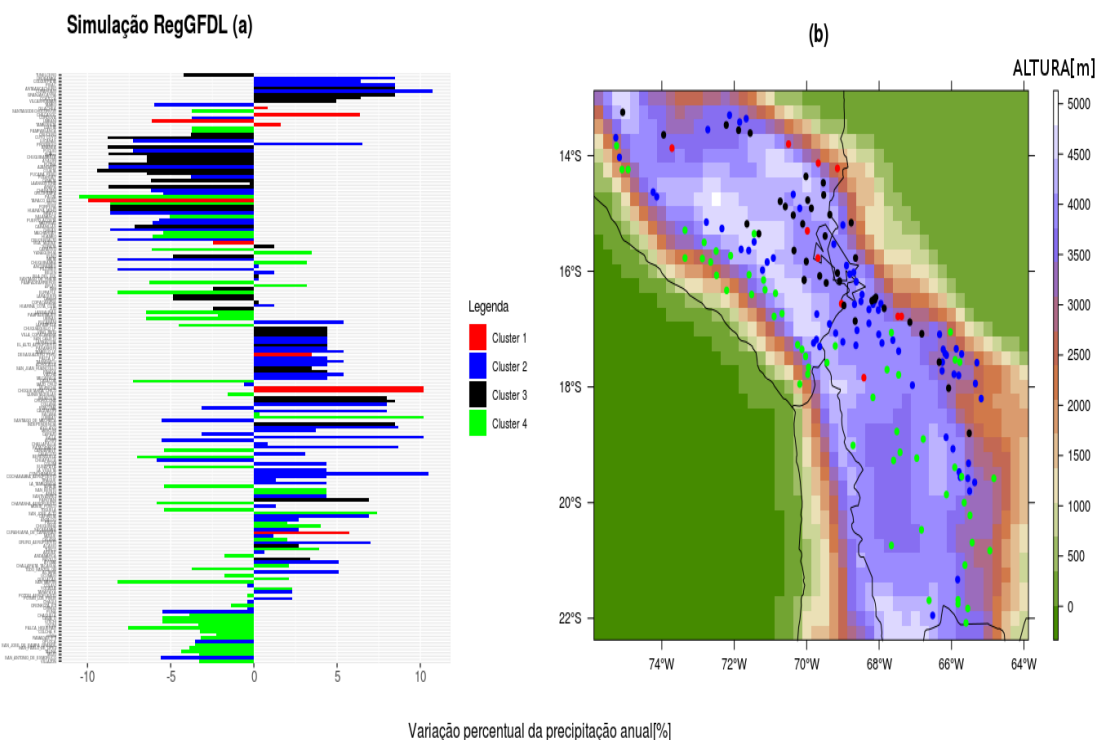


Figura 3.29 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegGFDL. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.

No caso a simulação RegHadGEM2 (Figura 3.30) mostra uma visível predominância de tendência negativa da chuva anual em quase todas as estações meteorológicas, com valores oscilando entre -5% até valores maiores a -20% de redução de precipitação. Estes resultados já haviam sido encontrados por outras análises destas simulações (Bazo, 2014; Llopart, 2014; Dávila, 2016), que mostraram ainda pequenas tendências de aumento da chuva na costa norte do Peru, região que não está sendo avaliada nesse estudo.

Uma tendência positiva de aumento percentual de precipitação para a simulação RegMPI é mostrada na Figura 3.31. O RegMPI o exibe valores muito altos, de até 35%, de aumento da chuva na costa norte do Peru e entre as latitudes 16°S e 14.4°S, sendo a zona de maior tendência de aumento de precipitação. O RegGFDL (Figura 3.29) também indica tendência de aumento de chuva nestas latitudes, porém com intensidade menor do que o RegMPI (Figura 3.31).

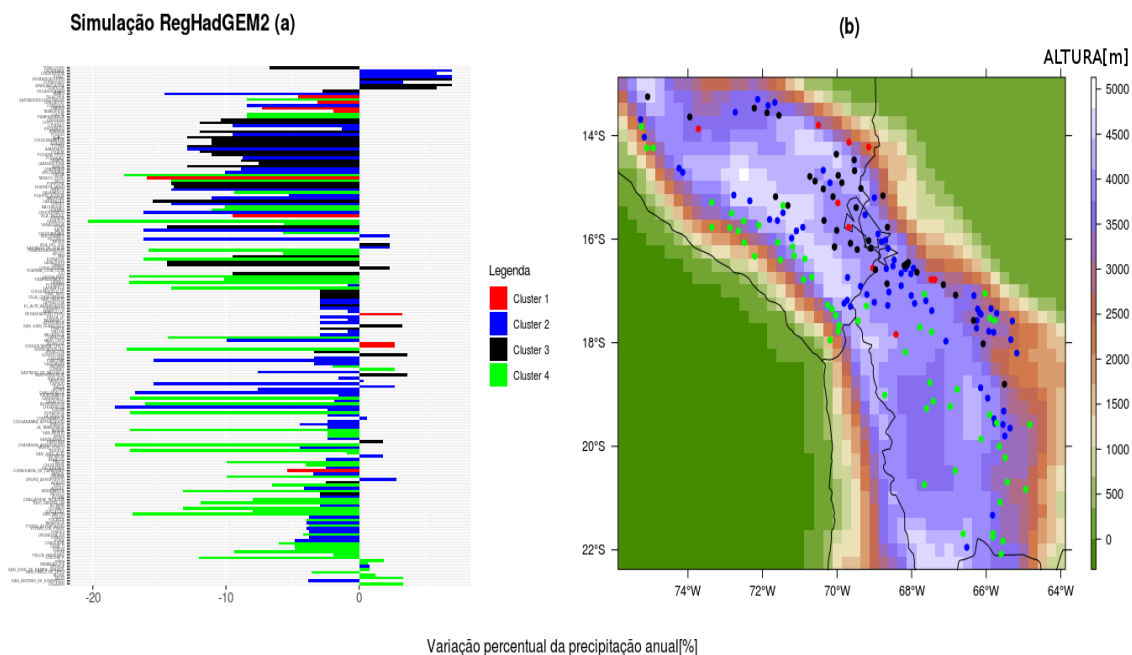


Figura 3.30 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegHadGEM2. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.

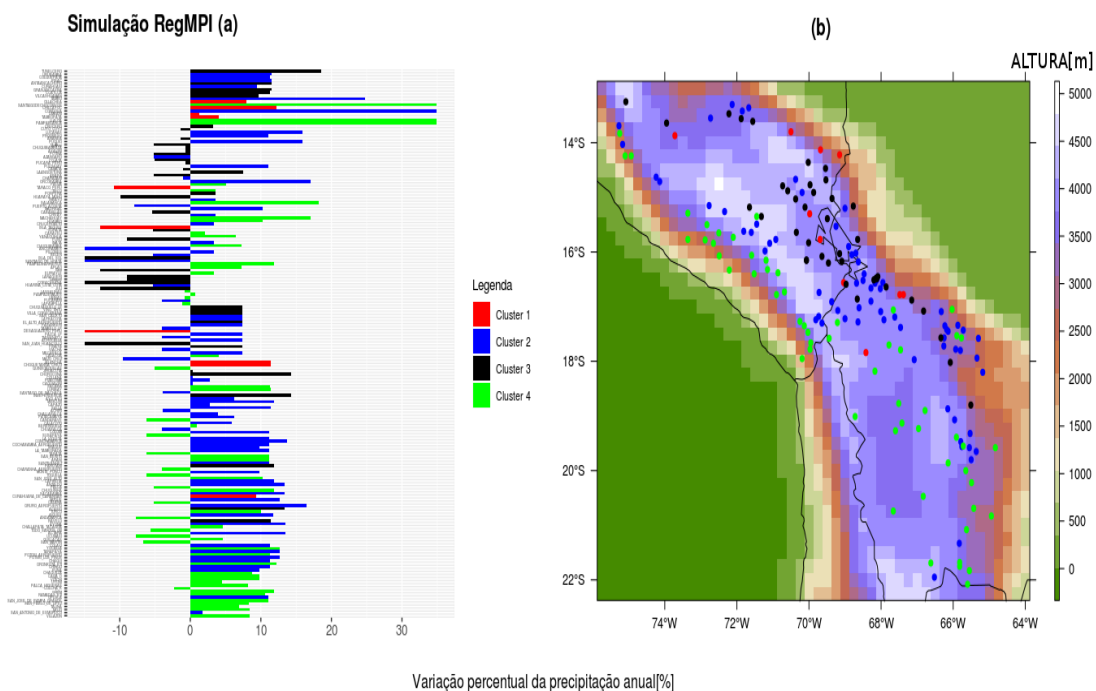


Figura 3.31 Variação meridional da tendência relativa chuva média anual para o período 2030-2060 da simulação RegMPI. (a) Barras indicam a tendência relativa de chuva (%) em função à latitude de cada estação meteorológica e as cores indicam os 4 clusters. (b) Localização das estações meteorológicas.

Nas Figuras 3.29 e 3.31, As tendências de precipitação indicadas entre -10 e -20% seriam equivalentes a uma seca muito forte, como aconteceu no altiplano, e principalmente na Amazônia boliviana, no ano 2010. Além disso, isto poderia resultar em um atraso da época de chuvas, ou seja, estação chuvosa com um período curto e mais intenso (Spracklen et al., 2012).

Comparativamente, os sinais (positivos e negativos) de mudança da chuva apresenta maiores similaridades entre o RegGFDL e RegMPI, enquanto o RegHadGEM2 projeta um forte sinal de decréscimo da chuva em praticamente todo o altiplano da Bolívia e Peru.

### **3.8. Tendências da variabilidade interanual de temperatura: 2006-2096**

A Figura 3.32 apresenta a série de temperatura média mensal filtrada na escala interanual para cada simulação durante o período 2006-2096 e nos 4 clusters. Nota-se bastante similaridade entre os clusters para o sinal interanual de temperatura sobreposto à uma marcada tendência positiva. O RegGFDL (Figura 3.32a) mostra uma tendência positiva mais intensa, onde a regressão linear da média dos 4 cluster, dada pela equação  $(1.25x - 3.72)$ , na qual o valor inicial (se  $y=0$ ) da tendência de temperatura média torna-se em  $-3,72^{\circ}\text{C}$ . Para os 4 cluster projeta-se um aumento de aproximadamente  $2,5^{\circ}\text{C}$  para o final do século (Figura 3.32a). Também, a simulação RegHadGEM2 (Figura 3.32b) indica uma tendência positiva em que a intersecção entre eixos se inicia em  $-4,87^{\circ}\text{C}$ . De fato, a amplitude da variabilidade interanual de temperatura é menor no RegHadGEM2 do que a simulação RegGFDL, como já notado no clima presente (Figura 3.19). Do mesmo jeito, o RegMPI apresenta uma tendência positiva, com variabilidade interanual mais semelhante ao RegGFDL, com o valor de b da regressão linear de  $-4,29^{\circ}\text{C}$ .

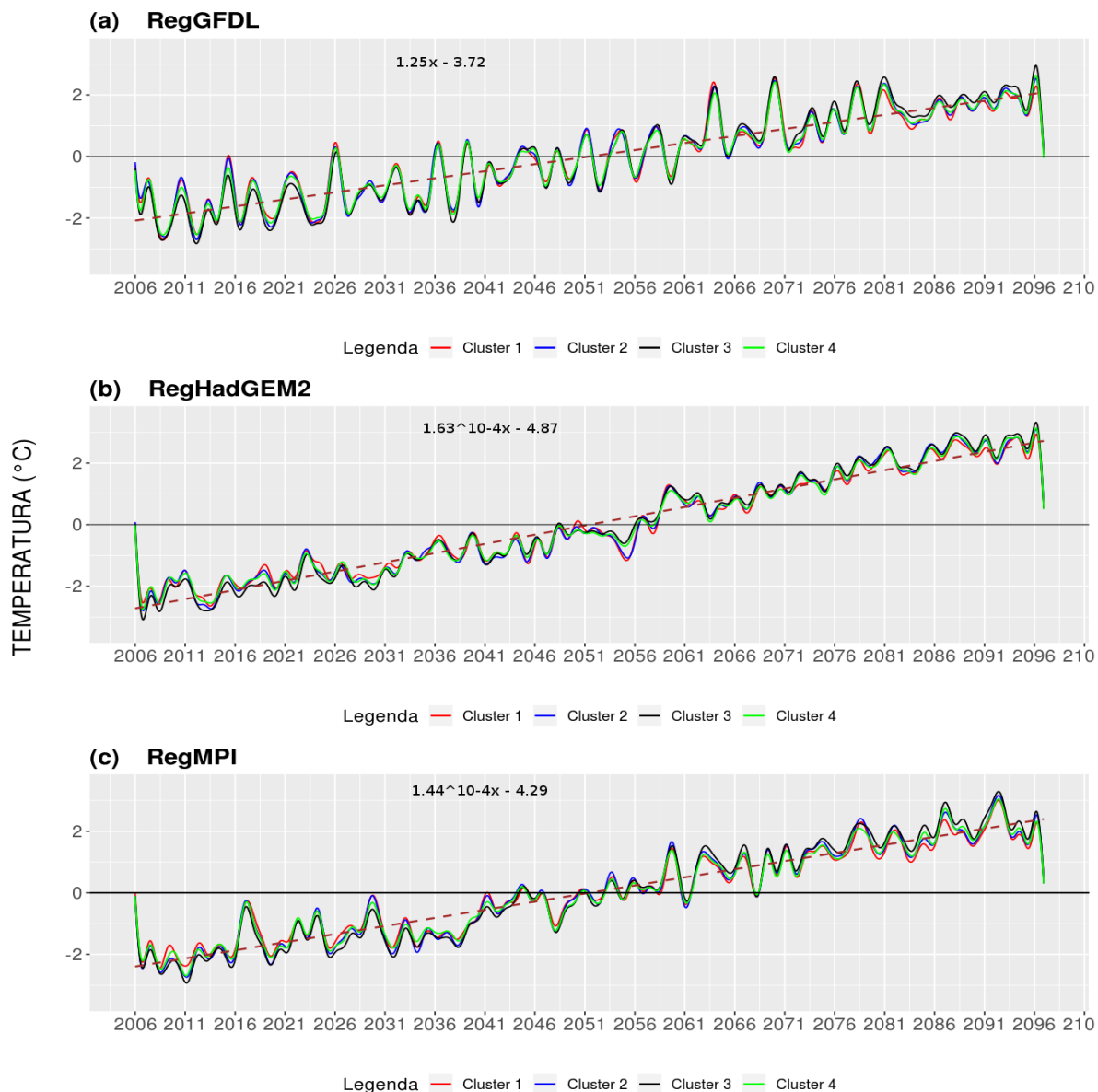


Figura 3.32 Anomalia interanual futura (2006-2096) de temperatura média mensal para as simulações (a) RegGFDL, (b) RegHadGEM2 e (c) RegMPI. Cada painel inclui o cluster 1, Cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4. A linha pontilhada é a regressão linear da média dos 4 clusters.

As simulações apresentam padrões similares na tendência, mas diferente em termos de variabilidade interanual. Focando na tendência, na intersecção entre a regressão linear e o nível zero da temperatura (aproximadamente no ano 2051), a finalidade foi encontrar um período que esteja sem tendência, e assim, facilitar a comparação. No caso da amplitude, o RegGFDL até 2070 apresenta amplitude muito maior do que o RegHadGEM2 e RegGFDL.

### 3.9. Tendências da variabilidade interanual de precipitação: 2006-2096

Em relação a precipitação a Figura 3.33 mostra os valores mensais das anomalias interanuais para as 3 simulações e para os 4 cluster no período 2006-2096. Na média dos 4 clusters, a tendência da simulação RegGFDL (Figura 3.33a) é positiva, mas muito pequena, e amplitude do sinal interanual é maior no cluster 4 do que nos demais. Já o RegHadGEM2 (Figura 3.33b) mostra uma tendência negativa das anomalias interanuais de chuva, com uma maior inclinação da reta de regressão linear. Finalmente a tendência negativa da simulação RegMPI (Figura 3.33c) apresenta uma inclinação também muita pequena, como ocorreu no RegGFDL.

O cluster 4 apresenta maior amplitude nas três simulações, particularmente, no modelo RegGFDL no período 2036-2037 (Figura 3.33a), lembrando que o cluster 4 representa as regiões mais secas nos Andes. Também, é importante destacar que o cluster 4 não está em fase como os demais clusters, apresentando um atraso nas simulações do RegHadGEM2 (Figura 3.33b) e RegMPI (Figura 3.33c) ao longo do século. No entanto, os cluster 1, 2 e 3 na maioria do período e nas três simulações apresentam forte concordância de fase. A simulação RegMPI em geral apresenta um atraso nas fases em comparação às simulações RegMPI e RegHadGEM2.

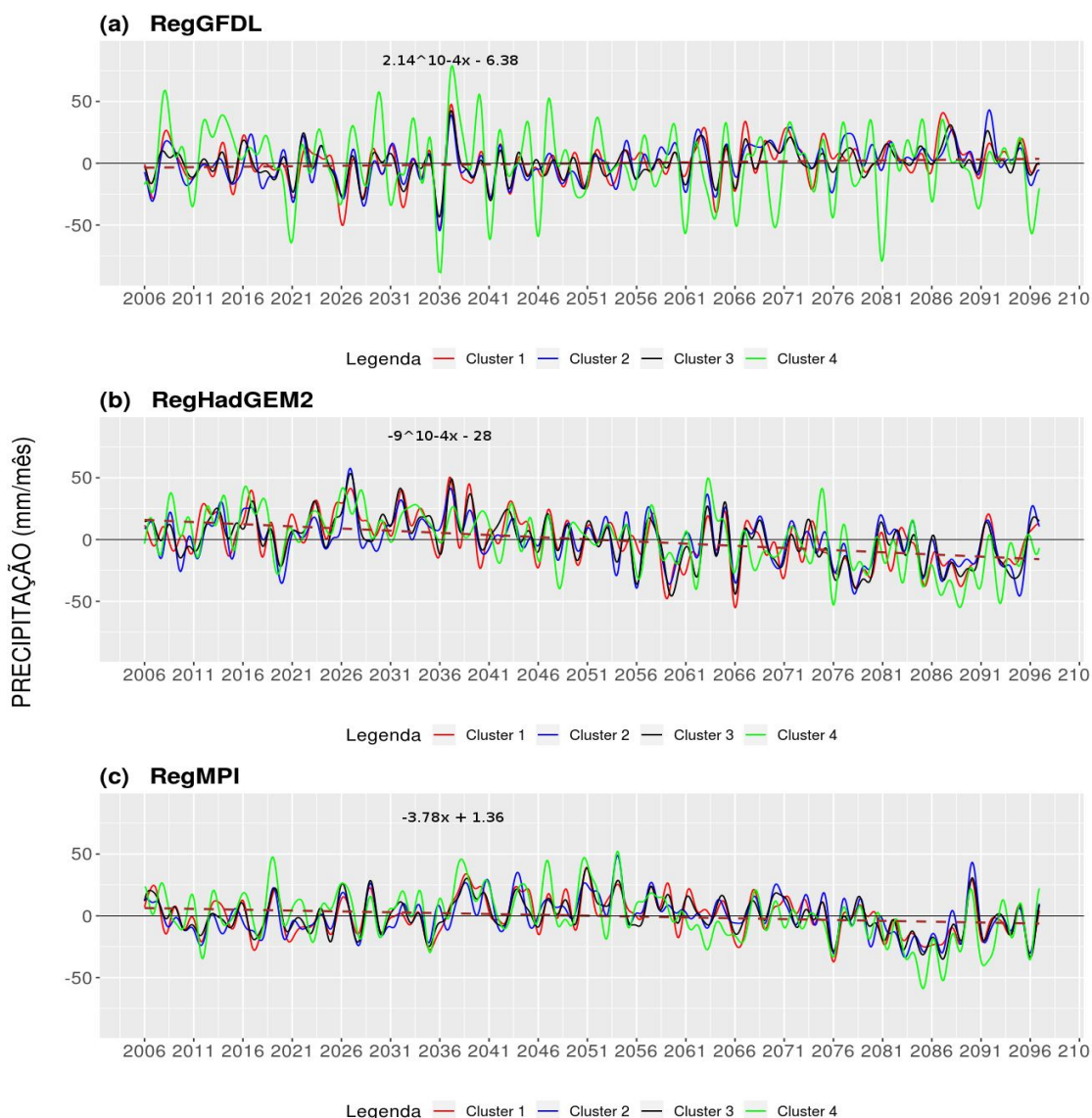


Figura 3.33 Anomalias interanuais futuras (2006-2096) de precipitação para as simulações (a) RegGFDL, (b) RegHadGEM2 e (c) RegMPI. Cada figura corresponde a cluster 1, Cluster 2, Cluster 3 e Cluster 4. A linha pontilhada é a regressão linear da média dos 4 cluster.

O valor inicial (se  $y=0$ ) da reta de tendência de precipitação torna-se em -6,4, -28,0 e 1,4 mm/mês para RegGFDL, RegHadGEM2 e RegMPI, respectivamente. As simulações RegHadGEM2 e RegMPI mostram uma tendência de redução de chuva, enquanto isto não ocorre no RegGFDL. Além disso, o cluster de precipitações baixas (cluster 4) apresenta anomalias de precipitação muito intensas e em alta frequência no RegGFDL (Figura 3.33a).

No futuro, o RegCM4 mostra uma anomalia de precipitação positiva (negativa) que está associada a anos de El nino e La nina. No entanto, a relação desses fenômenos com a precipitação sazonal na



maioria dos membros da RegCM4 é mais fraca no clima futuro distante do que no clima atual (da Rocha et al., 2014).

#### 4. CONCLUSÕES GERAIS

Sobre cenários de mudanças climáticas, as regiões montanhosas poderão sofrer seus efeitos tornando-se importante gerar mecanismos de adaptação e mitigação, o que requer melhorar nosso conhecimento de como variáveis meteorológicas vão mudar (por exemplo, temperatura e precipitação). Levando em conta que, as séries temporais das redes de observações meteorológicas não são longas o suficiente para dar uma resposta, os modelos climáticos podem contribuir para quantificar estas mudanças, mas é necessário primeiro que passem por um processo de validação. Os resultados das projeções dos modelos serão mais confiáveis após conhecer seus erros no clima presente.

Neste trabalho, foram usadas três simulações do modelo RegCM4 nos períodos 1981-2005 (clima presente) e 2006-2096 (clima futuro) para avaliar tendências de temperatura e precipitação sobre os Andes. As simulações foram forçadas pelos modelos globais MPI, GFDL e HadGEM2 e denominadas, respectivamente, de RegMPI, RegGFDL e RegHadGEM2. No clima presente, as simulações foram comparados com observações de estações meteorológicas em 4 clusters obtidos em função do ciclo anual médio de temperatura e a precipitação. Além disso, uma análise da circulação em 850 e 200 hPa foi aplicada para descrever os períodos secos e úmidos

Em termos de circulação, no clima presente observou-se nas simulações um deslocamento da AB para sudoeste e um fortalecimento no lado leste dos Andes do jato de baixos níveis. Existem algumas hipóteses para a superestimativa da precipitação nas simulações sobre os Andes. Esta superestimativa pode resultar de convergência do vento de baixos níveis mais intensa sobre a região e também devido à presença dos Andes favorecendo movimentos ascendentes muito intensos e muita convecção.

No clima presente, as simulações mostram capacidade de reproduzir o comportamento climatológico observado da temperatura média e a precipitação acumulada nas regiões de estudo, embora os valores modelados nunca correspondam com os observados em qualquer modelo. Apesar de não obter valores com precisão, as estações secas (baixa precipitação) e úmidas (alta precipitação)

são claramente simuladas sobre a Bolívia e Peru. Os erros das simulações são mais evidentes através do ciclo anual nos clusters. Esta análise mostra que ao longo do ano a precipitação acumulada é superestimada nas áreas com fortes gradientes de altura, enquanto nota-se que a temperatura média é subestimada, em regiões superiores a 500 metros acima do nível do mar, pelas simulações. A precipitação mostra uma variabilidade espacial muito maior do que a temperatura média, pois a precipitação normalmente apresenta uma forte variabilidade natural. Mas como o modelo funciona com altura de superfície interpolada, uma análise da topografia do modelo versus topografia de estações meteorológicas mostrou uma tendência do RegCM4 em superestimar a altura da topografia complexa dos Andes, exceto no intervalo de 3700-3950 m de altura.

Em termos de variabilidade interanual, as séries filtradas nesta escala mostraram que as simulações são hábeis em reproduzir características observadas desta variabilidade para as variáveis chuva e temperatura do ar sobre os Andes no clima presente. Em termos de intensidade do sinal interanual, o RegMPI em eventos frios (percentil 25%) apresenta valores dos limiares mais próximos aos observados (CRU e estações meteorológicas), especialmente no cluster 1. Em contrapartida, no RegGFDL e RegHadGEM2 os eventos frios são, respectivamente, mais quentes e mais frios do que nas observações. Também para os limiares quentes (percentil 75%) a intensidade do sinal interanual no RegMPI é mais próximo dos observados nas estações meteorológicas. Para a precipitação, também a intensidade dos extremos secos e úmidos do RegMPI são mais próximos das observações do que as demais simulações.

Em termos de tendência climática, todas as projeções futuras (2030-2060) indicam um incremento médio de aproximadamente 2°C na temperatura do ar, enquanto para precipitação existe uma tendência geral de decréscimo entre -10 e -20% sobre os Andes. Estes valores seriam equivalentes à uma seca muito forte, como aconteceu no altiplano, e principalmente na Amazônia boliviana, no ano de 2010. Além disso, isto poderia resultar em um atraso na época de chuvas, ou seja, estação chuvosa com um período mais curto e mais intenso.

Na escala interanual no futuro (2005-2096), sobreposta às tendências positivas de temperatura as projeções indicam sinal interanual de magnitude semelhante ao clima presente. O mesmo é projetado para a chuva, mas com o sinal interanual sobreposto à uma ligeira tendência negativa.

## 5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar o entendimento da superfície em simulações do RegCM4 nos Andes é necessário conhecer melhor a representação de solo e a troca de energia entre a superfície e a atmosfera. Aprofundar o desempenho de outros esquemas de parametrizações físicas sobre a região dos Andes para reduzir este erro é importante.

Todas as simulações analisadas utilizaram a mesma parametrização de convecção e apresentam forte superestimativa de chuva sobre os Andes no verão. Seria importante também aprofundar o conhecimento do desempenho de outros esquemas de convecção sobre a região dos Andes para reduzir este erro.

Projeções climáticas de alta resolução e validação do modelo RegCM hidrostático e não hidrostático nos Andes poderia contribuir para melhorar o estudo das características climáticas em regiões de topografia complexas e as tendências futuras.

Estudar os eventos extremos é importante nos Andes na escala intrasazonal e também para cada estação do ano e ambos seriam um bom aporte para o entendimento do desempenho do modelo, assim como analisar os modelos globais e ver se há adição de valor.

## 6. REFÊRENCIAS

- Andrade F.M. & Luis A. Blacutt B. 2010. **“Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparación con datos de estación. Revista Boliviana de Física”** Vol. 17. Soc. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1562-8232010000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-8232010000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- Andrade, M., 2014. **“Generación de datos meteorológicos de alta resolución para Bolivia in La economía del cambio climático en Bolivia”**. Inter-American Development Bank Climate Change and Sustainability Division, Series IDB-MG-200.
- Andrade, M. F. (Ed.) 2018. **“Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central peru-boliviano / Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981-2010”**. Geographica Bernensia, 188 pp., DOI: 10.4480/GB2018.N01.
- Bazo. 2014. **“Proyecciones Climáticas Sobre Perú Y Su Relación Con El Fenómeno Enso”** Universidad de Vigo, Departamento de Física Aplicada, EPHYSLAB.
- Barry, Roger G. Richard Chorley. 2012. **“Atmosfera, tempo e Clima”**.
- Canedo-Rosso,c, Uvo CB, Berndtsson R, **“Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano”**. Int J Climatol. 2018; 1-12. <https://doi.org/10.1002/joc.5937>.
- da Rocha, Rosmeri Porfirio Da, Santiago Vianna Cuadra, Michelle Simões Reboita, Luiz F. Kruger, Tércio Ambrizzi, and Nisia Krusche. 2012. **“Effects of RegCM3 Parameterizations on Simulated Rainy Season over South America.”** Climate Research 52 (1): 253–65. <https://doi.org/10.3354/cr01065>.
- da Rocha, Rosmeri Porfirio, Michelle Simões Reboita, Lívia Marcia Mosso Dutra, Marta Pereira Llopart, and Erika Coppola. 2014. **“Interannual variability associated with ENSO: present and future projections of RegCM4 for South America–CORDEX domain.”** Climate Change (2014): 125;95-109. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1119-y>
- Chuchón Angúlo, Eleazar, (2016). **“Ciclo diurno da convenção no altiplano Peruano”**. Instituto de Astronomia, Geofísica E Ciências Atmosférica
- Davila, C. 2016. **“Estudo Dos Eventos de Geadas Na Serra Peruana Em Simulações Climáticas**

**Regionais**” Instituto de Astronomia, Geofísica E Ciências Atmosféricas.

Dee, P. P., Uppala, S.M., Reboita, M.S., Simmons, A.J., Berrisford, P., Kobayashi, S., et al. (2011). **“The ERA-Interim reanalysis: Configurations and performance of the data assimilation system,** Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society, 137(April), 553-597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>.

Dichinson Re, Errico RM, Giorgi F, Batet GT (1989), **“A regional climate model for the 522 western United States”** Climatic Change 15: 383-422.

Dirk, Hoffmann y Teresa Torres-Heuchel. 2013. **“Cambio climático en Bolivia”**, Instituto Boliviano de la Montaña- BMI

Duchon C.E. et al. (1979). **“Lanczos Filtering in the one and two dimensions”** Journal of Apply Meteorology, 18-1016-1022.

Dunne J.P. et al. (2012). **“GFDL’s ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics.”** Journal Climate, 25-6646-6665.

Espinoza Villar Jhan Carlo, 2008. **“Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador)”**. International Journal of Climatology” 29: 1574-1594. Doi: 10.1002/joc.1791.

Emanuel KA, Zivkovic-Rothman M (1999) **“Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models”**, Journal Atmospheric Science, 56: 1766–1782.

FAO - Santiago, Chile, 2014, Ortíz, H. y Ramírez,R **“Cordillera de Los Andes, una oportunidad para la integración y desarrollo de América del Sur”**

Funk, C., et al. (2015). **“The climate hazards infrared precipitation with stations a new environmental record for monitoring extremes”**, Scientific Data. Doi: <http://dx.doi.org/10.15780/G2RP4Q>.

Garreaud, René, Mathias Vuille, and Amy C. Clement. 2003. **“The Climate of the Altiplano: Observed Current Conditions and Mechanisms of Past Changes”** Palaeogeography,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology 194 (1–3): 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4).
- Garreaud, René, 2009. **“The Andes climate and weather”** Advances in Geosciences 7,1-9,2009. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>.
- Giorgetta , M.A, et al (2013). **“Climate and Carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5”**. Journal of Advances in Modelling Earth Systems,5,572-597.
- Giorgi, F., E. Coppola, F. Solmon, L. Mariotti, M. B. Sylla, X. Bi, N. Elguindi, et al. 2012. **“RegCM4: Model Description and Preliminary Tests over Multiple CORDEX Domains”** Climate Research 52 (1): 7–29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>.
- Giorgi, F, C Jones, and G R Asrar. 2009. **“Addressing Climate Information Needs at the Regional Level: The CORDEX Framework”** World Meteorological Organization Bulletin 58 (3): 175–83.
- Giorgi,F and G,T. Bates.1989. **“On the climatological skill of a regional model over complex terrain”**, Mon.Wea.Rev 117:2325-2347.
- Hunziker, S., Gubler, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Velarde, F., Ticona, L., Carrasco, G., Castellón, Y., Oria, C., CrociMaspoli, M., Konzelmann, T., Rohrer, M., and Brönnimann, S.: **“Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations”**, Int. J. Climatol., 37, 4131– 4145, <https://doi.org/10.1002/joc.5037>, 2017.
- Hunziker, S., Brönnimann, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade , F., Ticona, L., Carrasco, G., Castellón, A., Huerta and W. Lavado-Casimiro.: **“Effects of undetected data quality issues on climatological analyses”**, Climate of the Past., 14, 1– 20, <https://doi.org/10.5194/cp-14-1-2018>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, secretaria general técnica, Madrid, (2015). **“Cambio Climático: Bases Físicas”**, Guía resumida del quinto informe de evaluación Del IPCC, Grupo de trabajo I, <https://publicacionesoficiales.boa.es/>.
- Luna Vera, José Antonio, Dominguez Mora, Ramón. 2013. **“A method for regional frequency analysis of maximum daily rainfall: application in the Bolivian Andes.”** Ingeniería. Revista

Chilena de Ingeniería, Vol. 21 N°1,2013,pp.111-124.

Llopart, Marta, 2014. **“Impacto da representação solo-planta-atmosfera em simulações climáticas regionais para a ”**, Instituto de Astronomia, Geofísica E Ciências Atmosféricas.

Llopart, Marta, Rosmeri P. da Rocha, Michelle Reboita, and Santiago Cuadra. 2017. **“Sensitivity of Simulated South America Climate to the Land Surface Schemes in RegCM4”** *Climate Dynamics* 49 (11–12). Springer Berlin Heidelberg: 3975–87. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3557-5>.

Marengo, Jose A., Tercio Ambrizzi, Rosmeri P. da Rocha, Lincoln M. Alves, Santiago V. Cuadra, Maria C. Valverde, Roger R. Torres, Daniel C. Santos, and Simone E.T. Ferraz. 2010. **“Future Change of Climate in South America in the Late Twenty-First Century: Intercomparison of Scenarios from Three Regional Climate Models”** *Climate Dynamics* 35 (6): 1089–1113. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0721-6>.

Marengo, Jose A., Soares, W.; Saulo, C; Nicolini, M. 2004. **“Climatology of the low level jet east of the Andes as derived from the NCEP/NCAR reanalyses”**. *Journal of Climate*, v.17, p.2261-2280, 2004.

Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I.D., Halloran, P. R., Hardiman, S.C., et al (2011). **“The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations”**, *Geoscientific Model Development*. 4, 723–757. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011.

Mendonça, Magaly. (2017). **“Monzon Sudamericano: La integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variabilidades climáticas del altiplano andino chileno”**. *Diálogo Andino*, N°54, 2017. Páginas 21-30

Meehl, G.A. (2011). **“Introduction to CMIP5”**, *Clivar Exchanges*, 16(2):4-5

Pingping Xie, NOAA/NWS/NCEP, Camp Springs, MD; and M. Chen and W. Shi. (2010). **“CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation”**. 24th Conference on Hydrology, [https://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper\\_163676.htm](https://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper_163676.htm).

Seiler, Christian, Ronald W A Hutjes, and Pavel Kabat. 2013. **“Likely Ranges of Climate Change in Bolivia”**, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52 (6): 1303–17. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0224.1>.



- Seiler, C., R. W. A. Hutjes, and P. Kabat, 2013: **“Climate variability and trends in Bolivia”**. J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 130–146.
- Spraklen, D., V. S. R. Arnold, and C.M. Taylor, 2012: **“Observations of increased Tropical Rainfall preceded by air passage over forests”**. Nature 489., 282–285 (2012); doi:10.1038/nature11390.
- Sotah, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Chihiro Kodama, Seiki, T., T Noda, A., et al. (2014): **“The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development”**. Progress in Earth and Planetary Science 2014:18 (2014); doi: <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>.
- SENAMHI, 2009: **“Climatología de Bolivia. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Internal”** Rep., 27 pp
- Reboita, Michelle, Nisia Krusche, Tércio Ambrizzi and Rosmeri Porfírio, Da Rocha. 2012. **“Entendendo O Tempo E O Clima Na O Sol Como Fonte de Energia”** Terra E Didática 8 (1): 34–50.
- Taylor, K.E. 2001. **“Summarizing multiple aspect of model performance in a single diagram”**. Journal of Geophysical Research, 106, 7183-7192. <http://doi.org/10.1029/2000JD900719>.
- Vuille, M., et al, 1999. **“Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano During dry and wet period and extreme phases of the Southern Oscillation”**, International Journal Of Climatology, 19, 1579-1600.
- Van Vuuren, James A. Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, John Weyant, 2011. **“A special issue on the RCPs”**, Climate Change (2011), 109: 1-4. DOI: 10.1007/s10584-011-0157-y.
- Urrutia, R. & M. Vuille (2009), **“Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperatura and precipitation for the end of the 21<sup>st</sup> century”**, J. Geophys. Res., 114, D03208, doi:10.1029

Xu Haiming and Yuqing Wang (2003), **“Effects of the Andean on Eastern Pacific Climate: A Regional Atmospheric model study”**, American Meteorological Society, 114, D03208, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0589:EOTAOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0589:EOTAOE>2.0.CO;2)

Ynoue, Rita Yuri, Simões Reboita, Michelle, Ambrizzi Tercio, Gyrlene, Da Silva, (2017), **“Meteorologia noções básicas”**,

Walsh , Kevin, (1994). **“On the influence of the Andes on the General Circulation on the Southern Hemisphere”**, Journal of Climate, 7(6):1019-1025, DOI: 10.1175/1520-0442(1994)007.

Wilks D.S. 2006. **“Statistical Methods in the atmospheric sciences”**, 277-278.

Zhang, Xuebin, Yang Feng, and Rodney Chan. 2015. **“Introduction to RCLimDex”** 1–2.

## APÊNDICE.

## APÊNDICE A:

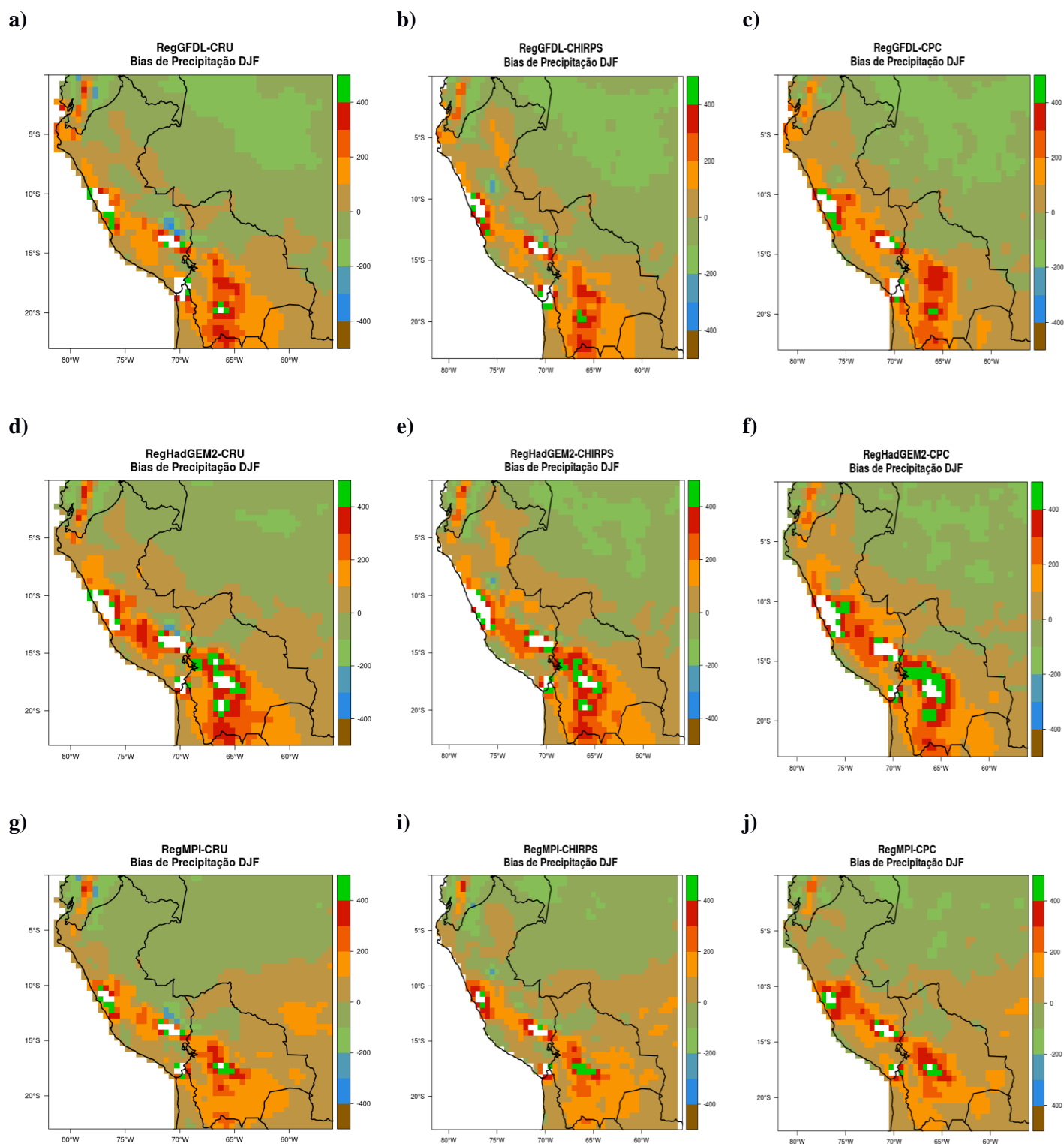


Figura A1 Bias de precipitação presente (1981-2005) no verão entre (a) RegGFDL-CRU, (d) RegHadGEM2-CRU, (g) RegMPI-CRU, (b) RegGFDL-CHIRPS, (e) RegHadGEM2-CHIRPS, (j) RegMPI-CHIRPS, (c) RegMPI-CPC, (f) RegGFDL-CPC, (i) RegHadGEM2-CPC.

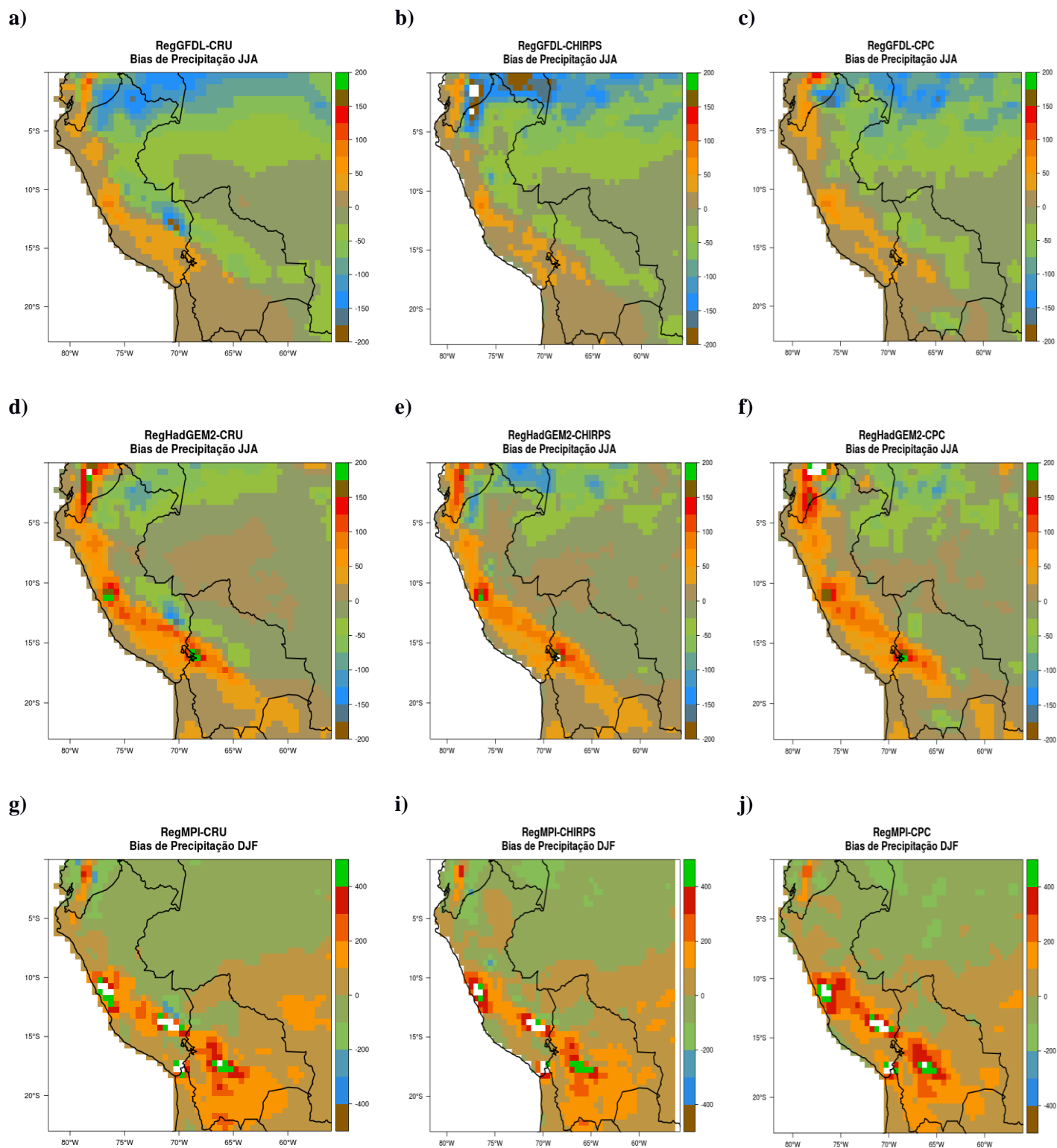


Figura A2 Bias de precipitação presente (1981-2005) no verão entre (a) RegGFDL-CRU, (d) RegHadGEM2-CRU, (g) RegMPI-CRU, (b) RegGFDL-CHIRPS, (e) RegHadGEM2-CHIRPS, (j) RegMPI-CHIRPS, (c) RegMPI-CPC, (f) RegGFDL-CPC, (i) RegHadGEM2-CPC.