



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.10.18.22-TDI

A IMPORTÂNCIA DO ACOPLAMENTO OCEANO-ATMOSFERA PARA A PREVISÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL

Wendell Max Barbosa Fialho

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Paulo Nobre, aprovada em 06 de
setembro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3M8M9SS>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

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

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

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.10.18.22-TDI

**A IMPORTÂNCIA DO ACOPLAMENTO
OCEANO-ATMOSFERA PARA A PREVISÃO DA ZONA
DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL**

Wendell Max Barbosa Fialho

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Paulo Nobre, aprovada em 06 de
setembro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3M8M9SS>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Fialho, Wendell Max Barbosa.

F441i A importância do acoplamento oceano-atmosfera para a previsão da zona de convergência do Atlântico Sul / Wendell Max Barbosa Fialho. – São José dos Campos : INPE, 2017.
xxii + 68 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.10.18.22-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientador : Dr. Paulo Nobre.

1. BESM. 2. MCGA. 3. Precipitações. 4. TSM. 5. ZCAS.
I.Título.

CDU 551.581.2(261)



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

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

Aluno (a): **Wendell Max Barbosa Filho**

Título: "A IMPORTÂNCIA DO ACOPLAMENTO OCEANO-ATMOSFERA PARA A
PREVISÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Dirceu Luis Herdies



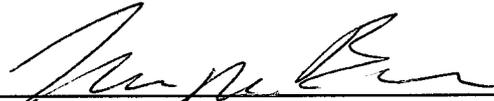
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Paulo Nobre



Orientador(a) / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcus Jorge Bottino



Membro da Banca / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Mario Francisco Leal de Quadro



Convidado(a) / IFSC / Florianópolis - SC

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 06 de setembro de 2016

*A meus avós materno Luiz Venceslau e Maria Ferreira, que
infelizmente não fazem mais parte deste plano, mas por sempre
terem dito que a educação é a forma mais legítima da emancipação
do indivíduo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família em especial à minha mãe por ser exemplo de mulher guerreira. Ao esposo dela, J. Soares que o considero como um verdadeiro pai, que sempre oferece todo o apoio e suporte extra-mestrado. Serei sempre grato a vocês.

A minha eterna companheira, Lidiane Borges por todo apoio incondicional nas horas mais difíceis dessa trajetória. Vale mencionar aqui o meu “filho” Noah que me enche de orgulho.

Meus agradecimentos ao Dr. Paulo Nobre por ter aberto as portas do INPE me dando uma oportunidade de trabalho e logo em seguida como orientador no mestrado.

Agradeço imensamente ao Dr. Marcus Bottino por todo o seu envolvimento neste trabalho e pela imensa ajuda.

Externo minha gratidão a todos do Grupo BESM, principalmente ao Emanuel Girolla e Manoel Baptista.

Ao Dirceu Herdies e também ao Mário Quadro pelas sugestões de grande valia para o enriquecimento científico deste trabalho.

A Fernanda Casagrande por sempre ter me dado ânimo nos momentos difíceis deste trabalho, fazendo acreditar que era possível.

Aos meus amigos da turma do mestrado.

Aos professores da PGMET que contribuíram com a minha formação científica.

A CAPES pela bolsa concedida.

Aos membros da banca examinadora pela pronta disponibilidade em analisar este trabalho.

Enfim, a todos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um importante sistema meteorológico para o Brasil, principalmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste. Com uma orientação clássica de noroeste-sudeste que se inicia no sul da Amazônia e se estende até o Oceano Atlântico Sudoeste. A ausência da ZCAS provoca nessas regiões um efeito direto na agricultura, acarretando em uma baixa produtividade e como consequência um impacto negativo na economia. No setor da indústria, a baixa produção está diretamente associada a geração de energia elétrica, uma vez que a região Sudeste consome boa parte da energia produzida no Brasil devido a sua alta industrialização, bem como ao seu elevado número populacional. Em contrapartida, além dos prejuízos econômicos ocasionados pela ausência da ZCAS, há também prejuízos sociais quando a ZCAS se encontra bem intensa devido aos eventos extremos de precipitação provocados por ela, as grandes cidades por terem uma população maior, acabam sendo ainda mais vulneráveis aos impactos provocados pelas chuvas, tais impactos estão relacionados desde a perda das propriedades como um todo, mas principalmente a perda de vidas humanas. Diante dessa problemática, o objetivo principal deste trabalho foi estudar a capacidade do Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) e do Modelo de Circulação Geral Oceano-Atmosfera (MCGOA), i.e. Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre – BESM, ambos desenvolvidos no CPTEC/INPE, em representar 4 casos de ZCAS que ocorreram durante os anos de 2005, 2006, 2007 e 2013. A fim de avaliar o efeito do acoplamento oceano-atmosfera na formação e manutenção da ZCAS, foram realizados experimentos com o modelo acoplado e com sua componente atmosférica, utilizando a temperatura da superfície do oceano prescrita. Além disso, para cada um dos modelos, os experimentos de cada caso foram realizados com 10 membros. Os resultados foram avaliados de maneira subjetiva (visualmente) sob a análise dos campos meteorológicos bem como de modo objetivo através de índices estatísticos (BIAS e RMSE). O modelo acoplado MCGOA–BESM, foi sensível ao efeito do acoplamento (oceano-atmosfera) reproduzindo uma TSM com taxa de aquecimento menor, apresentando uma sensibilidade ao sombreamento da radiação na região que houve registro de precipitação. Logo esse menor aquecimento é uma consequência da radiação incidente, que modula a temperatura da superfície levando em consideração a presença das nuvens. A diferença de temperatura entre os modelos, o MCGA apresentou um comportamento mais quente do que o MCGOA–BESM. O modelo acoplado reproduziu a banda de precipitação com a orientação noroeste-sudeste próximo ao que foi notado nos dados observados associando-se à ZCAS. Entretanto, a precipitação foi subestimada em todos os casos quando comparado com a observação. Na análise objetiva da precipitação, o RMSE apresentou melhores resultados referentes ao MCGOA–BESM. Os campos compostos tornou evidente o padrão dominante dos casos estudados que caracteriza à ZCAS, principalmente sobre o oceano.

Palavras-chave: BESM. MCGA. Precipitação. TSM. ZCAS.

THE COUPLING IMPORTANCE OF OCEAN-ATMOSPHERE FOR PREDICTION OF SOUTH ATLANTIC CONVERGENCE ZONE

ABSTRACT

The South Atlantic Convergence Zone (SACZ) is a major weather system to Brazil, mainly in the North, Midwest and Southeast. With a classical orientation NW-SE that starts in the southern Amazon and extends to the southwest Atlantic Ocean. The absence of SACZ causes these regions a direct effect on agriculture, resulting in low productivity and consequently a negative impact on the economy. In the industry sector, the low production is directly associated with electricity generation since the Southeast region consumes much of the energy produced in Brazil due to its high industrialization and its high population number. On the other hand, in addition to the economic losses caused by the absence of SACZ, there is also social harm when SACZ is very intense due to extreme precipitation events caused by it, the big cities to have a larger population, end up being even more vulnerable to impacts caused by heavy rains, such impacts are related since the loss of property as a whole, but especially the loss of human lives. Faced with this problem, the main objective of this study is the ability of global atmospheric models (AGCM) and coupled global ocean-atmosphere (CGCM), i.e. Brazilian Earth System Model – BESM, both developed at CPTEC/INPE, in representing 4 cases SACZ that occurred during the years 2005, 2006, 2007 and 2013. in order to evaluate the effect of ocean-atmosphere coupling in the formation and maintenance of SACZ experiments were performed with the coupled model and its atmospheric component, using the temperature of the prescribed ocean surface. In addition, for each of the models, the experiments in each case were carried out with 10 members. The results were evaluated subjectively (visually) in the analysis of meteorological fields as well as in an objective manner using statistical indices (BIAS and RMSE). The coupled model MCGOA–BESM was sensitive to the effect of coupling (ocean-atmosphere) playing a TSM with lower heating rate, with a sensitivity to radiation shading in the region that there was rainfall record. Therefore less heat that is a result of the incident radiation, which modulates the temperature of the surface taking into account the presence of clouds. The temperature difference between the models, the MCGA had a warmer demeanor than MCGOA–BESM. The coupled model reproduced the band of precipitation northwest-southeast orientation close to what was noted in the observed data associating the SACZ. However, precipitation was overestimated in all cases compared to observation. The objective analysis of the precipitation, the RMSE showed better results for the MCGOA–BESM. The compounds fields became apparent the dominant pattern of case studies featuring the SACZ, especially over the ocean.

Keywords: BESM. AGCM. Precipitation. SST. SACZ.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.	25
4.2 Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.	27
4.3 Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.	30
4.4 Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.	32
4.5 Composições média de omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.	35
4.6 Precipitação média ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.	37

4.7	Precipitação média (mm.dia^{-1}) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.	39
4.8	Precipitação média (mm.dia^{-1}) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.	41
4.9	Precipitação média (mm.dia^{-1}) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.	43
4.10	Composições médias da precipitação (mm.dia^{-1}) para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.	45
4.11	Radiação média incidente (W.m^{-2}) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.	47
4.12	Radiação média incidente (W.m^{-2}) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.	48
4.13	Radiação média incidente (W.m^{-2}) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.	50
4.14	Radiação média incidente (W.m^{-2}) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.	51
4.15	Composições médias da radiação incidente (W.m^{-2}) para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.	53

4.16 Série temporal das previsões de TSM na região sobre o oceano para o período a) 11 a 18 de dezembro de 2005, b) 07 a 18 de dezembro de 2006, c) 12 a 21 de fevereiro de 2007 e d) 11 a 28 de dezembro de 2013 para um domínio de 50°W;30°W e 30°S;20°S. As linhas vermelhas (azuis) finas representam os membros do MCGA (MCGOA), a linha vermelha (azul) grossa o conjunto médio do MCGA (MCGOA) e a linha tracejada vermelha (azul) a tendência do MCGA (MCGOA), para o prazo de previsão de 10 dias. 55

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Eventos de ZCAS selecionados de acordo com o Boletim Climanálise. . .	17
4.1 Valores do BIAS e RMSE do ensemble médio da precipitação (mm.dia ⁻¹). Para a área 50°W;30°W e 30°S;20°S.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	–	Alta da Bolívia
AGCM	–	Atmospheric General Circulation Model
ASAS	–	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BESM	–	Brazilian Earth System Model
BESM-OA2.3	–	Brazilian Earth System Model Oceano-Atmosfera Versão 2.3
BRAMS	–	Regional Atmospheric Modeling System with Brazilian Developments
CENAD	–	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CFSR	–	Climate Forecast System Reanalysis
CFSv2	–	Climate Forecast System Versão 2
CGCM	–	Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model
CLP	–	Camada Limite Planetária
CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
$div(Q\vec{V})$	–	Divergência de $Q\vec{V}$ ($\nabla_H \bullet Q\vec{V}$)
DJF	–	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
ENOS	–	El Niño-Oscilação Sul
FMS	–	Flexible Modeling System
FNL	–	Final Analysis
GFDL	–	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GOES	–	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPCP	–	Global Precipitation Climatology Project
HS	–	Hemisfério Sul
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JBN	–	Jato de Baixos Níveis
MCG	–	Modelo de Circulação Geral
MCGA	–	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MCGO	–	Modelo de Circulação Geral do Oceano
MCGOA	–	Modelo de Circulação Geral Oceano-Atmosfera
MCMO	–	Modelo de Camada de Mistura Oceânica
MOM	–	Modular Ocean Model
MOM4p1	–	Modular Ocean Model Versão 4p1
NCEP	–	The National Centers for Environmental Prediction
OA	–	Oceano-Atmosfera
OMJ	–	Oscilação Madden-Julian
PSA	–	Pacific South America
q	–	Umidade Específica
\vec{Q}_u	–	Componente Zonal de $Q\vec{V}$
\vec{Q}_v	–	Componente Meridional de $Q\vec{V}$
$Q\vec{V}$	–	Transporte Vetorial Total de Umidade Integrada Verticalmente
RMSE	–	Root Mean Square Error
ROC	–	Radiação de Onda Curta

ROLE	–	Radiação de Onda Longa Emergente
SSIB	–	Simplified Simple Biosphere
SST	–	Sea Surface Temperature
TIROS	–	Television and Infrared Observation Satellite
TOVS	–	Operational Vertical Sounder
TSM	–	Temperatura da Superfície do Mar
\vec{u}	–	Componente Zonal do Vento Horizontal
\vec{v}	–	Componente Meridional do Vento Horizontal
VCAN	–	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	–	Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	–	Zona de Convergência do Pacífico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS	5
2.2 Influências Remotas sobre a ZCAS	9
2.3 Simulações Numéricas com ZCAS	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 Dados	15
3.2 Modelos	16
3.2.1 Modelo de Circulação Geral da Atmosfera – MCGA	16
3.2.2 Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera – BESM-OA2.3	16
3.3 Metodologia	17
3.3.1 Escolha dos Casos	17
3.3.2 Método de Composição para Avaliar a Evolução da TSM na Região da ZCAS sobre o Oceano	18
3.3.3 Cálculo da Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente	19
3.3.4 Descrição dos Experimentos	20
3.3.5 Métodos Estatísticos de Avaliação	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1 Padrões Espaciais dos Eventos de ZCAS	23
4.1.1 Omega e Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente .	23
4.1.1.1 Análise dos Episódios de ZCAS	23
4.1.1.2 Análise dos Campos Compostos de Omega e Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente	33
4.1.2 Precipitação	36
4.1.2.1 Análise dos Episódios de ZCAS	36
4.1.2.2 Análise dos Campos Compostos de Precipitação	44
4.1.3 Radiação Solar	46
4.1.3.1 Análise dos Episódios de ZCAS	46

4.1.3.2	Análise dos Campos Compostos de Radiação Solar	52
4.2	Comportamento da TSM na ZCAS sobre o Oceano	53
4.3	Avaliação Objetiva da Precipitação	56
5	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um fenômeno atmosférico intrasazonal e de escala sinótica que ocorre durante o verão austral, sendo o principal sistema meteorológico de baixa-frequência que ocorre durante a estação chuvosa da região Sudeste do Brasil, tanto é que no ano de 2014 durante a sua ausência culminou-se em uma crise hídrica sem precedentes. Fato semelhante ocorreu durante o verão de 2001, onde o déficit de precipitação nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil causou uma séria crise energética em boa parte do Brasil [Taschetto e Wainer \(2008a\)](#). Além disto, a ausência da ZCAS tem efeito direto na agricultura significando uma menor produção, implicando no aumento do preço dos alimentos e gerando um impacto negativo na economia. Na indústria, a baixa produtividade está diretamente associada à geração de energia, já que por sua vez o Sudeste do Brasil caracteriza-se por ser a região do país mais industrializada, e sendo assim, a maior consumidora de água e energia elétrica.

Por outro lado, além dos prejuízos econômicos com a ausência da ZCAS, há prejuízos sociais quando a ZCAS está bem ativa, através dos eventos extremos de precipitação ocasionadas por ela. As grandes cidades, por terem uma concentração populacional maior acabam se tornando vulneráveis, principalmente nos danos às propriedades, bem como a perda de vidas humanas. Segundo o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – [CENAD \(2012\)](#), o evento ocasionado pela ZCAS na região serrana do Estado do Rio de Janeiro entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011 provocou cerca de 912 mortes e deixou mais de 45.000 desabrigados e desalojados, caracterizando-se como o maior desastre registrado no Brasil e consolidando, infelizmente, a Serra Fluminense como a região brasileira com o maior quantitativo de vítimas fatais provocadas por desastres naturais (40% do total nacional entre 1988 e 2012). De acordo com [Ferraz \(2000\)](#), foi feita uma comparação para os períodos que ocorreram deslizamento de terra no Estado de São Paulo e eventos extremos que tiveram relação com a ZCAS. Notou-se que grande parte dos episódios de deslizamentos estão relacionados a máximos de precipitação na ZCAS antecedendo ou durante o desastre.

Segundo [Sampaio e Dias \(2014\)](#), dentre os diversos avanços científicos que ocorreram no último século está a habilidade em simular complexos sistemas físicos utilizando modelos numéricos que constituem uma representação matemática aproximada da realidade. A habilidade de prever o tempo e o clima aumentou muito nas últimas décadas em função do avanço no entendimento dos processos que controlam a evo-

lução do estado da atmosfera e dos métodos de solução numérica das equações que representam cada parte do sistema climático bem como da notável evolução da capacidade de processamento dos computadores. Assim, os modelos atmosféricos e acoplados oceano-atmosfera também possibilitam prever as condições do tempo para vários dias, dependendo da região e do estado da atmosfera.

De acordo com [Mendoza e Bonatti \(2004\)](#), a técnica de previsão de tempo por ensemble possibilita a geração de diversos produtos meteorológicos para auxiliar a previsão de tempo. O produto mais comum e de fácil interpretação é o ensemble médio, pois ele consiste basicamente da média do conjunto de previsões. Outra importante informação que resulta da previsão por ensemble é o espalhamento previsto pelo modelo. Em condições ideais, o espalhamento permitiria avaliar, antecipadamente, se uma previsão possui maior ou menor confiabilidade. Apesar da fácil interpretação do ensemble, existe todo um princípio físico/estatístico para geração destes conjuntos a partir de condições iniciais distintas.

Esta dissertação divide-se em 5 capítulos. Além do Capítulo 1 referente a introdução, no Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre a ZCAS no tocante a sua definição, a variabilidade espacial e temporal, as influências remotas, bem como estudos com a ZCAS através de simulações numéricas. No Capítulo 3 é apresentada a descrição dos dados e dos modelos utilizados, assim como a metodologia adotada na escolha dos casos de ZCAS e as equações para a obtenção da divergência e fluxo de umidade integrados verticalmente. Por fim os índices estatísticos utilizados para avaliar objetivamente as simulações numéricas. Os resultados deste estudo são discutidos no Capítulo 4 e as conclusões são apresentadas no Capítulo 5.

1.1 Motivação

A fim de prevenir desastres ocasionados pela precipitação associada à ZCAS, faz-se necessário a utilização de modelos numéricos com capacidade prognóstica desses eventos. Portanto, para possibilitar um melhor entendimento da ZCAS, um modelo acoplado oceano-atmosfera pode ser de extrema importância, já que possibilita estudar o fenômeno com um maior detalhamento físico envolvendo a atmosfera e o oceano, e assim, permitindo a compreensão dos processos físicos e dinâmicos envolvidos na ZCAS.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é compreender a capacidade dos Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera – Brazilian Earth System Model (MCGOA-BESM) e do Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) desenvolvidos no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em representar 4 eventos de ZCAS que ocorreram nos anos de 2005, 2006, 2007 e 2013. Além disso, entender o comportamento na evolução da temperatura da superfície do mar (TSM) nas regiões sob influência da ZCAS no Oceano Atlântico Sul. A hipótese abordada neste estudo baseia-se na importância do acoplamento oceano-atmosfera para a previsão de eventos de ZCAS. Para investigar tal questão propõe-se os seguintes pontos:

- Utilizar modelos numéricos atmosféricos (MCGA/CPTEC) e acoplado oceano-atmosfera (MCGOA-BESM-OA2.3) a fim de realizar experimentos para 4 eventos de ZCAS ocorridos nos anos de 2005, 2006, 2007 e 2013;
- Analisar de forma subjetiva os campos meteorológicos observados e os gerados por ambos os modelos;
- Avaliar estatisticamente os resultados dos experimentos numéricos para os 4 eventos de ZCAS através de métricas estatísticas como o BIAS e RMSE;
- Analisar o comportamento da evolução da TSM na região da ZCAS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda as características gerais da ZCAS do ponto de vista de estudos observacionais quanto de estudos numéricos.

2.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS

A ZCAS é um fenômeno atmosférico que afeta de forma direta a América do Sul subtropical e parte do Oceano Atlântico Sudoeste, podendo ser definida como uma banda de convecção ativa com elevadas taxas de precipitação em uma faixa com orientação noroeste-sudeste. Este fenômeno se prolonga do centro-sul da Amazônia, regiões Centro-Oeste e Sudeste, centro-sul da Bahia, norte do Estado do Paraná e prolonga-se até o Oceano Atlântico sudoeste (KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; FERREIRA et al., 2004; JORGETTI, 2008).

A ZCAS é possível ser observada nos campos de precipitação (NOGUÉS-PEAGLE; MO, 1997) e de radiação de onda longa emergente (ROLE) (KODAMA, 1992; LIEBMANN et al., 1999). Em campos médios mensais de ROLE no topo das nuvens, a ZCAS caracteriza-se por uma banda convectiva com valores mínimos de ROLE ligada a Amazônia, onde a convecção é mais intensa nos meses de verão [dezembro, janeiro e fevereiro (DJF)]. Em imagens de satélite é observada através do canal infravermelho como sendo uma banda frontal situada sobre os Estados da região Sudeste do Brasil e parte do Oceano Atlântico Sul durante um período de 4 a 20 dias (FIGUEROA et al., 1995; FIGUEROA, 1997; CARVALHO et al., 2002; NINOMIYA, 2007).

Além das imagens de satélite e dos campos de ROLE, existe também um critério dinâmico para a definição da ZCAS com eventos, cujo o tempo mínimo são 4 dias de duração. Esse critérios são: 1) convergência de umidade em 850 hPa; 2) um cavado em 500 hPa a oeste da região de convergência na superfície; 3) ventos de sul, ao sul da zona de convergência na superfície e 4) nebulosidade persistente em imagens de satélite (QUADRO, 1994; AMBRIZZI; FERRAZ, 2015).

A formação da ZCAS acontece quando existe a ocorrência de um acoplamento entre a Alta da Bolívia (AB) que se trata de um processo termodinâmico resultante do aquecimento do continente tendo como consequência a liberação de calor latente, liberado nos movimentos verticais ascendentes e a incursão de sistemas frontais do Hemisfério Sul (HS). Uma vez que a AB é estabelecida, os sistemas frontais do Hemisfério Sul, que entram no Brasil Central, são “ancorados” pela AB permanecendo semi-estacionários e sendo intensificado pela convergência do fluxo de umidade ad-

vectado pelos ventos alísios (ANDRADE, 2007).

De acordo com Kodama (1992), a ZCAS se forma ao longo do jato subtropical a leste de um cavado quase permanente situado no sudeste da banda de convecção associada à monção. Carvalho et al. (2004), mostrou que a intensidade da ZCAS pode ser considerada independente da sua extensão sobre o oceano, isto é, pode-se observar intensa e persistente atividade convectiva sobre o continente, sem necessariamente haver uma atividade convectiva sobre o oceano. Também é possível acontecer o contrário, ou seja, a ocorrência de uma atividade convectiva sobre o oceano independentemente do que é observado sobre o interior do continente. Além disso, podem ser precedidas de propagação de distúrbios sinóticos nas latitudes médias, tais como as frentes frias.

Kodama (1992), Kodama (1993), Barreiro et al. (2002) sugeriram que a ZCAS bem como outras zonas de convergências subtropicais, como é o caso da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), aparecem quando duas condições necessárias na circulação de latitudes médias são satisfeitas: 1) o escoamento do jato subtropical em latitudes subtropicais (30° – 35° S), e 2) o escoamento no sentido dos pólos em baixos níveis que prevalece ao longo da borda oeste das altas subtropicais. Caso essas condições não forem satisfeitas, a zona de convergência é enfraquecida, portanto, havendo uma baixa taxa de precipitação. Isso se deve ao escoamento em baixos níveis no sentido dos pólos que intensifica a convergência de umidade juntamente com o jato subtropical que leva a uma condição favorável ao desenvolvimento da frontogênese e da instabilidade convectiva. Essas condições geralmente são satisfeitas no verão austral juntamente com o desenvolvimento de uma baixa termicamente quente (Baixa do Chaco) intensificando o escoamento em direção aos pólos no lado leste do continente.

Herdies et al. (2002), estudando o transporte de umidade associado com o padrão bimodal da circulação de verão sobre a América do Sul, concluiu que o enfraquecimento do Jato de Baixos Níveis (JBN) está associado com a presença da ZCAS. A umidade é transportada através do JBN, da Bacia Amazônica para as latitudes subtropicais da América do Sul, favorecendo a precipitação sobre a Bacia do Prata, norte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil. Por esse motivo, a intensificação do JBN pode estar associada com o enfraquecimento da ZCAS, enquanto que a presença dos ventos de noroeste estão relacionados a intensa atividade convectiva sobre a região da ZCAS. Durante o regime de ZCAS, o JBN que traz o ar tropical quente e úmido da região da Amazônia, esteve intensificado e posicionado mais a leste do que durante

o período de não-ZCAS. Traduzindo em um fluxo de umidade mais concentrado e uma forte convergência próximo ao sudeste do Brasil, favorecendo a convecção que está associada à ZCAS. Além disso, no regime de ZCAS, foi notado que os ventos alísios mostram uma forte componente de norte sobre o norte da Amazônia caracterizando a intensificação do transporte de umidade dos trópicos para os extratropicais. De acordo com [Herdies et al. \(2002\)](#), em baixos níveis, os ventos provenientes do Atlântico equatorial penetram na região da Amazônia fazendo o transporte de vapor d'água a leste da Cordilheira dos Andes para as regiões subtropicais da América do Sul, esse transporte ocorre de forma mais eficiente durante o regime de ZCAS. Uma vez que já é reconhecida a importância do papel desempenhado pelo transporte de umidade da Bacia Amazônica para latitudes extratropicais a exemplo do Sul do Brasil, Paraguai e norte da Argentina. Para [Newell et al. \(1992\)](#), a América do Sul é umas das regiões mais importantes no Hemisfério Sul onde o transporte de umidade dos trópicos para os extratropicais ocorrem. Segundo [Marengo \(1992\)](#), as regiões central e sul da Amazônia exibem uma maior concentração de umidade integrada, especialmente durante o verão. Sendo que a maior parte do total anual da precipitação sobre a região ocorre durante o verão austral.

[Doyle e Barros \(2002\)](#), constataram um padrão de circulação na existência de anomalias negativas de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico subtropical, onde há uma circulação anticiclônica com um escoamento de leste provocado por um aumento no gradiente de temperatura oceano-continente. Na influência dessas condições, o escoamento do continente tropical em direção ao sul é bloqueado. Assim, esse escoamento é desviado em direção à ZCAS, convergindo com o escoamento que se dirige para o sul favorecendo a intensificação da ZCAS e o seu confinamento mais ao norte. No caso de anomalias positivas de TSM, o padrão de circulação inclui um escoamento médio dos trópicos para o sudeste em 10°S convergindo com um escoamento em 35°S, esse padrão favorece a localização da ZCAS mais ao sul e com intensidade fraca.

Para o período de verão entre janeiro e fevereiro de 2003 no sudeste da América do Sul, [Cerne et al. \(2007\)](#) observou que a ZCAS exerce uma influência significativa sobre a evolução de ondas de calor. Durante algumas semanas que antecedem o desenvolvimento da onda de calor, com a intensificação da ZCAS sobre a América do Sul tropical, foi notado um aumento da temperatura nos subtropicais principalmente devido a subsidência e processos diabáticos. Este último está relacionado a transferência de calor sensível devido a absorção de energia solar por parte da superfície.

Barros et al. (2000) concluíram que a precipitação durante o verão no sudeste da América do Sul, principalmente no mês de janeiro, está relacionada com a intensidade e posição da ZCAS, bem como a TSM no Atlântico sul. Não há independência entre o deslocamento meridional da ZCAS e a sua intensidade. Uma vez que o seu deslocamento para o sul apresenta uma tendência de se enfraquecer, corroborando com o que foi exposto por Doyle e Barros (2002). A TSM ao sul da ZCAS está relacionada com a sua posição, em uma situação onde a presença de anomalias positivas (negativas) nesse setor, associa-se com o deslocamento da ZCAS mais ao sul (norte). As anomalias positivas (negativas) de TSM ao sul da ZCAS estão associadas além do deslocamento, estão relacionadas com anomalias positivas (negativas) de precipitação no sul da Argentina subtropical. Portanto, o deslocamento meridional para norte (sul) feito pela ZCAS pode inibir (favorecer) a precipitação no sul da Argentina subtropical por causa do aumento (diminuição) da subsidência.

Quadro (1994), observou que a ZCAS pode apresentar variações quanto ao seu posicionamento dentro de uma mesma estação. Geralmente, durante o início do verão austral a ZCAS estaciona em regiões mais ao norte do continente, e até o final do verão, ela tende a estacionar mais ao sul. Acredita-se que variações na localização da AB, do cavado do Nordeste e do cavado a sotavento dos Andes em médios níveis podem também influenciar no posicionamento da ZCAS. Sugere-se ainda que variações, em termos de mudanças de posicionamento, nestes três sistemas podem provocar não só o deslocamento como também o rompimento da ZCAS (QUADRO, 1994).

Concordando com Barros et al. (2000), Barreiro et al. (2002) mostraram que a TSM exerce uma influência na variabilidade da precipitação sobre o oceano, podendo influenciar na estabilidade da atmosfera e no fornecimento de umidade para a convecção, portanto, desempenhando um papel importante na variabilidade da ZCAS sobre o oceano, não havendo influência significativa sobre a ZCAS no continente. Segundo Robertson e Mechoso (2000), sobre o Atlântico Sudoeste, as anomalias de TSM são acompanhadas da intensificação interanual da ZCAS, havendo anomalias negativas (positivas) ao norte (sul) de 40°S (região localizada no Atlântico Sudoeste). Além disso, os autores mostraram que a precipitação associada à ZCAS é negativamente correlacionada com anomalias de TSM no Atlântico subtropical oeste corroborando os resultados encontrados por Nobre et al. (2012). Porém, Figueroa et al. (1995), argumentou que a TSM quente não desempenha um papel muito importante na geração da ZCAS, uma vez que a língua quente da TSM no Atlântico Sul não coincide com a localização da ZCAS.

2.2 Influências Remotas sobre a ZCAS

O Oceano Pacífico exerce remotamente uma influência na convecção sobre a região da ZCAS, principalmente através de teleconexões de escalas intrasazonais. Grimm e Dias (1995), notaram que a convecção sobre a região da ZCPS, associada a uma das fases da oscilação de 30-60 dias, pode influenciar a convecção na ZCAS através da propagação de ondas de Rossby. Tal fato é consistente com estudos feitos por Liebmann et al. (1999), onde os autores encontraram evidências de que a variação na atividade da ZCAS em escala de tempo submensal (6-30 dias) é influenciada pela propagação das ondas de Rossby na região extratropical.

De acordo com Madden e Julian (1994), a Oscilação Madden-Julian (OMJ) é um mecanismo de escala intrasazonal capaz de controlar a relação entre as anomalias de TSM no Pacífico e a ZCAS. Esta oscilação cujo período é de 40-50 dias, consiste de células de circulação de grande escala orientada no plano equatorial movendo-se para leste, do Oceano Índico em direção ao Pacífico (JORGETTI, 2008).

Segundo Nogués-Peagle e Mo (1997), a intensificação da ZCAS está relacionada à fase da OMJ, onde há ocorrência de convecção sobre os setores leste e centro do Pacífico com condições secas sobre o oeste do Pacífico. Por outro lado, a convecção é inibida na região da ZCPS, sobre o Golfo do México e na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Atlântico Norte.

Cerne et al. (2007), em um estudo de caso sobre ondas de calor na América do Sul subtropical, notou que a atividade da ZCAS estava associada com um trem de ondas que se estendia entre a Austrália e a América do Sul, sugerindo assim uma variabilidade intrasazonal tropical no desenvolvimento da onda de calor.

Cunningham e Cavalcanti (2006), investigou a influência de teleconexões nas regiões tropical e extratropical na convecção da ZCAS e mostrou que a posição da ZCAS mais ao sul pode estar sob influência do padrão de teleconexão *Pacific South America* (PSA), por outro lado, durante eventos onde a ZCAS se encontra mais ao norte, podem ser influenciados pela OMJ, podendo engatilhar um trem de ondas sobre os Oceanos Atlântico Sul e Índico. Ainda sugere-se que quando os sistemas de alta frequência (sistemas frontais) e de frequência intrasazonal (PSA e OMJ) estão em fase, eles são capazes de estabelecer condições apropriadas para o desenvolvimento de um episódio de ZCAS.

Barreiro et al. (2002), cujo estudo teve o propósito de investigar a variabilidade da

ZCAS nas escalas interanual a decadal, concluíram que a circulação em altos níveis na região da ZCAS em escala de tempo interanual é remotamente influenciada pelo El Niño Oscilação Sul (ENOS), e que os eventos quentes de ENOS aumenta a atividade convectiva na região da ZCAS. Segundo [Ferreira et al. \(2004\)](#), em um estudo de padrões atmosféricos dos eventos de ZCAS utilizando técnica de composição para os meses DJF entre 1980 e 2000, nas quais os fenômenos El Niño e La Niña estavam em atividades, concluíram que durante o período de El Niño a atividade convectiva sobre o oceano na região da ZCAS é mais intensa. Em períodos de La Niña, a atividade convectiva em comparação a anos de El Niño, tem maior intensidade sobre a parte continental da ZCAS, corroborando com o que foi encontrado por [Carvalho et al. \(2004\)](#).

2.3 Simulações Numéricas com ZCAS

[Figuroa et al. \(1995\)](#) investigou a formação da ZCAS com um modelo numérico de equações primitivas, com coordenada vertical η , incluindo o efeito da liberação de calor latente. O estudo demonstrou a concordância entre a convergência em baixos níveis e a localização da ZCAS observada por [Kodama \(1993\)](#), evidenciando claramente que o mecanismo para a geração da ZCAS é de fato uma ação combinada da fonte de calor latente por parte da Amazônia e a elevada altura da Cordilheira dos Andes.

[Gandu e Dias \(1998\)](#) através de simulações numéricas notaram que a fonte de calor horizontalmente simétrica da Amazônia gera uma assimetria no campo do movimento vertical ascendente acima da região, localizado à sudeste da fonte associada com a ZCAS, bem como o aumento da subsidência do lado sul da ZCAS. [Lenters e Cook \(1995\)](#) a fim de compreender a climatologia da precipitação na América do Sul durante o verão austral, utilizou um Modelo de Circulação Geral (MCG) de alta resolução espectral com espaçamento de grade de $3,75^\circ$ de longitude e $2,25^\circ$ de latitude, com 22 níveis verticais e fez uma comparação entre as observações e as simulações da precipitação, convergência de umidade e os ventos em baixos níveis. Os autores notaram uma boa concordância nas regiões da Amazônia e da ZCAS, sugerindo que os efeitos da “continentalidade” e da baixa térmica são importantes na precipitação nessas duas regiões. Além disso, a topografia é fundamental para estabelecer os máximos de precipitação na América do Sul. Porém, a posição e a intensidade de alguns desses máximos são totalmente sensíveis a TSM e as condições de superfície, particularmente na Amazônia. A precipitação na ZCAS é também intensificada por um aumento no transporte de umidade para o sul entre a Baixa do

Chaco e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). De acordo com Tomaziello (2010), em baixos níveis, a ASAS, ao longo da sua porção oeste, transporta vapor d'água em direção a ZCAS e ao longo de sua porção sudoeste a zona de convergência é mantida quase-estacionária durante o período de verão austral.

Barreiro et al. (2002), investigaram a variabilidade em escalas interanual e decadal por meio de experimentos numéricos com um MCGA. Os resultados das simulações produziram uma resposta local à anomalias de TSM no Atlântico Sul, com uma estrutura de dipolo em torno de 25°S, porém, próximo da ausência de sinal sobre a parte continental e consistindo em uma estrutura de dipolo na precipitação próxima a costa da América do Sul, associada a uma circulação ciclônica dos ventos em superfície. Esta variabilidade indica um aumento da precipitação na parte norte da ZCAS e uma supressão da precipitação na parte sudoeste do sistema, associados a anomalias de TSM positivas entre a região do equador e aproximadamente 25°S. Os experimentos feito por Cavalcanti et al. (2002) com MCGA, mostraram que o excesso de precipitação no setor sul da ZCAS contribui para a deficiência do modelo em simular a chuva sobre a Amazônia. Barreiro et al. (2005) mostrou que os resultados das simulações do MCGA apresentaram um deslocamento e fortalecimento da ZCAS em direção as águas anormalmente quentes presentes no Atlântico entre 0 e 30°S.

Com um modelo de camada de mistura oceânica (MCMO) acoplado ao modelo regional denominado como *Regional Atmospheric Modeling System with Brazilian Developments* (BRAMS), Jorgetti (2008) fez simulações para compreender a interação entre Oceano Atlântico e ZCAS. Os resultados mostraram que as anomalias de TSM no Atlântico tropical e subtropical exercem influências no posicionamento e intensidade da ZCAS, porém, foram detectadas na simulações, uma tendência de subestimar a precipitação na região da ZCAS. Já Tomaziello (2010), encontrou nos resultados das simulações de precipitação realizada com o BRAMS na região da ZCAS, que o melhor desempenho do modelo se deu na região amazônica, enquanto que o pior desempenho aconteceu na região oceânica.

Concordando com Barreiro et al. (2005) em um estudo com modelo atmosférico regional, Teixeira et al. (2002) com o interesse de simular a ZCAS e verificar sua sensibilidade à TSM do Atlântico sudoeste, concluiu através dos resultados que o posicionamento e a intensidade da precipitação da ZCAS simulada tiveram a influência da TSM, deslocando a ZCAS em direção da região das águas mais quentes. Portanto, esse sistema acabou produzindo mais (menos) precipitação sobre as regiões que tiveram aumento (diminuição) de TSM.

Procurando compreender os efeitos das anomalias de TSM sobre o Atlântico Sudoeste no intervalo de tempo de até uma semana, Nobre et al. (2002) utilizando um MCGA constatou que o efeito hidrostático é dominante na modulação da intensidade e posição da ZCAS no modelo, ou seja, as anomalias positivas de TSM favorecem o aumento da convecção e dos movimentos ascendentes sobre as águas quentes, por outro lado, há um aumento da subsidência compensatória que ocorre principalmente ao norte da banda de nebulosidade mais intensa associada à ZCAS. Além disso, em uma situação favorável a formação da ZCAS, os efeitos das anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Sudoeste implicam no decaimento da pressão, logo em seguida há aumento da convergência em baixos níveis, portanto, acarretando em movimentos ascendentes sobre as regiões mais aquecidas, favorecendo o desenvolvimento de eventos de ZCAS mais intensos ao invés da presença de águas mais frias sobre o Atlântico Sudoeste. Nobre et al. (2012), estudaram a capacidade do MCGA e do Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera (MCGOA) em simular a precipitação sobre as águas frias do Atlântico tropical, e concluíram que o MCGOA é capaz de representar a precipitação sobre águas frias do Atlântico tropical, que nitidamente contrasta com a incapacidade do MCGA em produzir precipitação intensa sobre tais regiões. Sendo assim, o MCGOA tem a capacidade de simular o regime de precipitação da ZCAS, com a convecção sobre as águas frias, tendo como consequência o controle da temperatura da superfície pelos fluxos radiativos atmosféricos. Portanto, atestando a importância das interações da radiação solar-nuvens-TSM no feedback negativo associado com a dinâmica da ZCAS, onde a temperatura da superfície modula a atmosfera na região da ZCAS.

Com o *Brazilian Earth System Model Oceano-Atmosfera versão 2.3* (BESM-OA2.3), Nobre et al. (2013) mostraram uma melhoria na representação da ZCAS quando comparado com as versões anteriores do modelo acoplado oceano-atmosfera, tal melhoria se atribui como uma consequência direta do aperfeiçoamento da parametrização de convecção profunda, além de outros aprimoramentos.

O acoplamento entre a ZCAS e o Oceano Atlântico Sul também foi explorado por Chaves e Nobre (2004), através de experimentos numéricos com um MCGA e um Modelo de Circulação Geral do Oceano (MCGO). Os resultados apresentados sustentam a hipótese de que a variabilidade da ZCAS tem uma componente forçada pela TSM. Sendo assim, a existência de anomalias quentes de TSM sobre o Atlântico Sul tende a intensificar e deslocar a ZCAS para norte, entretanto as anomalias frias de TSM implicam em uma tendência de enfraquecer a esse sistema sobre o continente e o oceano no MCGA. Por outro lado, os resultados dos experimentos com

o MCGO sugerem que as anomalias de TSM negativas frequentemente observadas abaixo da ZCAS sobre o Atlântico Sul como observado por Robertson e Mechoso (2000), pode ser resultado do processo radiativo, com a ZCAS forçando o oceano termodinamicamente. Com a intensificação da ZCAS, a TSM abaixo do sistema se resfria ou causa o enfraquecimento das anomalias quentes de TSM já pré-existentes, principalmente devido ao bloqueio da entrada de radiação de onda curta (ROC) incidente à superfície associada com o aumento da cobertura de nuvens. Além disso, os resultados mostraram que o feedback termodinâmico (nuvens-ROC-TSM) predomina sobre o feedback dinâmico (bombeamento de Ekman), sendo esse último com eficácia somente durante eventos intensos de ZCAS. Em estudo que investigou o feedback negativo ($TSM+ \Rightarrow ZCAS+ \Rightarrow TSM-$) entre a ZCAS e as anomalias de TSM no Atlântico Sul durante o verão austral, Almeida et al. (2007) observou que esse feedback consiste em uma resposta inicial da atmosfera a TSM local. No caso de anomalias quentes de TSM, a resposta consiste na intensificação e migração da ZCAS para norte, seguido por um relaxamento das anomalias oceânicas devido ao bloqueio da entrada de radiação solar de onda curta pelo aumento da cobertura de nuvens.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita uma descrição dos dados e modelos utilizados no desenvolvimento deste estudo. Além disso, na metodologia consta quais os critérios que levaram as escolhas dos casos de ZCAS. Apresenta também o método de avaliação da evolução da TSM na região da ZCAS sobre o oceano. Além disso, são apresentados: o método do cálculo da divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente, a descrição dos experimentos para os eventos de ZCAS e os índices estatísticos para avaliar objetivamente os resultados das simulações numéricas fornecidas pelos modelos.

3.1 Dados

Os dados atmosféricos que foram utilizados neste estudo como: vento, umidade específica, omega são provenientes das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) *Climate Forecast System* (CFS) versão 2 (CFSv2) (SAHA et al., 2014) e *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (SAHA et al., 2010) provindas do modelo global do NCEP, esses dados possuem uma resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de latitude-longitude, disponível para todo o globo, com uma frequência de 6 em 6 horas, em 37 níveis isobáricos.

Ainda foram utilizados dados diários de precipitação do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitude-longitude (ADLER et al., 2003). A precipitação diária é estimada a partir de produtos de satélites no canal infravermelho, microondas e sondagens do *Television and Infrared Observation Satellite* (TIROS) e *Operational Vertical Sounder* (TOVS), sendo posteriormente ajustados com as análises da versão 2 do GPCP mensal (HUFFMAN et al., 2001; CARVALHO, 2011; HUFFMAN; BOLVIN, 2012).

Utilizou-se dados de irradiância solar incidente à superfície do modelo GL/CPTEC/INPE. O modelo GL de radiação solar por satélite foi desenvolvido no CPTEC, estima irradiância incidente à superfície sobre a América do Sul, rodando operacionalmente a partir de imagens do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) (sensor Imager). A área de cobertura adotada para o GOES 12 se estende desde 100°W até 28°W , e desde 50°S até 22°N . Os arquivos horários têm resolução espacial de $0,04^\circ$, aproximadamente 4,4 km, no ponto subsatélite (CEBALLOS; BOTTINO, 2007).

Os dados de precipitação (GPCP), radiação (GL) e as reanálises dos conjuntos CFSR

e CFSv2 que se diz respeito as variáveis de umidade específica, vento horizontal e omega, daqui em diante serão considerados como sendo as “observações”.

Vale ressaltar que os dados de precipitação do GPCP, de radiação do modelo GL/CPTEC e todos os dados de reanálises do CFSR/CFSv2 aqui descritos, foram interpolados para a grade do MCGA ($1.875^\circ \times 1.875^\circ$) de resolução espacial, visando uma melhor comparação entre modelo e observação, além da obtenção do cálculo do Viés (BIAS em inglês) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE sigla em inglês para *Root Mean Square Error*). As métricas estatísticas citadas são detalhadas na seção 3.3.5.

3.2 Modelos

3.2.1 Modelo de Circulação Geral da Atmosfera – MCGA

O modelo global atmosférico utilizado neste estudo foi o MCGA desenvolvido no CPTEC com truncamento T62L28, onde T significa truncamento triangular, 62 o número máximo de onda zonal e 28 o número de camadas na vertical, correspondendo a um espaçamento de grade horizontal de aproximadamente $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ no equador com coordenada vertical sigma e dinâmica euleriana. As parametrizações físicas do MCGA inclui esquemas de convecção profunda e rasa conforme Grell e Devenyi (2002) e Tiedtke (1984) respectivamente, a radiação de onda curta é parametrizada pelo *Solar Radiative Transfer Model* (CLIRAD-SW-M) de Chou e Suarez (1999) modificado por Tarasova et al. (2006), o esquema de radiação de onda longa é parametrizado por Harshvardhan et al. (1987). A camada limite planetária (CLP) foi parametrizada por Mellor e Yamada (1982) utilizando o fechamento no nível 2. A superfície continental é representada pelo modelo *Simplified Simple Biosphere* (SSiB) de acordo com Xue et al. (1991). (CAVALCANTI et al., 2002; MACIEL, 2009; KUBOTA, 2012; NOBRE et al., 2012; GIAROLLA et al., 2015).

3.2.2 Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera – BESM-OA2.3

A versão do modelo acoplado oceano-atmosfera no presente estudo é a BESM-OA2.3, cuja, componente oceânica é o *Modular Ocean Model* (MOM) versão 4p1 (MOM4p1) do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) (GRIFFIES, 2009), acoplado ao MCGA/CPTEC. O MOM4p1 possui resolução de 1° de longitude, onde o espaçamento de grade varia uniformemente de $1/4^\circ$ de latitude na região tropical (entre o equador e 10°), de 1° de latitude entre 10° e 45° e de 2° entre 45° e 90° , em ambos

os hemisférios. Com relação à resolução vertical, 50 níveis são adotados, com uma resolução de 10 metros acima de 220 metros, aumentando gradualmente até cerca de 370 metros em regiões mais profundas (NOBRE et al., 2012; GIAROLLA et al., 2015).

A estratégia de acoplamento inclui o uso do acoplador do GFDL chamado *Flexible Modeling System* (FMS) para acoplar o MCGA/CPTEC ao MOM4p1/GFDL. O MCGA recebe albedo do oceano e TSM do modelo oceânico de hora em hora. O MOM4p1 por sua vez, além dos ventos a 10 metros, recebe também do MCGA informação da precipitação (líquida e sólida), umidade específica, fluxos radiativos, difusão vertical da componente da velocidade e pressão à superfície, também de hora em hora.

3.3 Metodologia

3.3.1 Escolha dos Casos

Os eventos de ZCAS foram selecionados através de uma análise visual (subjetiva) caso a caso dentro de um período de 16 anos (1998-2013) a partir dos campos meteorológicos disponíveis no Boletim Climanálise tais como: temperatura de brilho, omega (no nível de 500hPa), linhas de corrente e divergência horizontal do vento, ambos em 200 hPa e precipitação acumulada. Além disso, os dados de radiação do modelo GL do CPTEC também foram utilizados nas escolhas dos casos. Foram escolhidos 4 eventos de ZCAS nos anos de 2005, 2006, 2007 e 2013. Esses episódios são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Eventos de ZCAS selecionados de acordo com o Boletim Climanálise.

Ano	Período do Evento de ZCAS
2005	11 a 16 de Dezembro
2006	07 a 16 de Dezembro
2007	12 a 19 de Fevereiro
2013	11 a 26 de Dezembro

Embora o episódio de ZCAS tenha ocorrido entre os dias 11 e 26 de dezembro de 2013 conforme a Tabela 3.1, porém, de acordo com os dados de radiação incidente na superfície, foi entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013 que a nebulosidade associada à ZCAS esteve mais intensa. Sendo assim, o período utilizado nas análises é de 14/12/2013 até 24/12/2013.

Para encontrar as características associadas com a presença da ZCAS nos casos estudados, foram utilizados os parâmetros de identificação baseados nos trabalhos de (SATYAMURTY; RAO, 1988; QUADRO, 1994; SANCHES; DIAS, 1996; SANCHES, 2002; CORREIA, 2013; AMBRIZZI; FERRAZ, 2015):

- Permanência de uma banda de nebulosidade observada por no mínimo 4 dias orientada na direção noroeste-sudeste, semi-estacionária, estendendo-se do sul da Amazônia até o Oceano Atlântico sudoeste, cobrindo grande parte do Brasil Central, a partir dos campos de temperatura de brilho e ROLE com mínimos na área em que o sistema esteja atuando;
- Convergência do fluxo de umidade na baixa troposfera com permanência mínima de 4 dias;
- Faixa uniforme no campo de omega em 500 hPa com movimentos ascendentes orientados na mesma posição da ZCAS;
- A presença da Alta da Bolívia (AB) em altos níveis, um cavado sobre a região Nordeste do Brasil, ou em determinadas situações um VCAN, um cavado semi-estacionário a leste dos Andes e uma faixa uniforme com valores positivos de divergência de massa sobre a banda de nebulosidade.

3.3.2 Método de Composição para Avaliar a Evolução da TSM na Região da ZCAS sobre o Oceano

Segundo Santos (2006), um campo composto de uma variável x é o campo médio de casos ocorridos desta variável em uma determinada área. A fim de avaliar a evolução da TSM na região da ZCAS sobre o oceano, foi necessário fazer algumas ponderações (SANCHES, 2002; SANTOS, 2006):

- Foi escolhido um setor de referência, que compreendesse todos os eventos de ZCAS analisados neste estudo. Onde esse setor é de $50^{\circ}\text{W};30^{\circ}\text{W}$ e $30^{\circ}\text{S};20^{\circ}\text{S}$;
- Assim como Kodama (1992), que estudou o comportamento da ZCAS na parte oceânica, no presente estudo filtrou-se somente a presença do oceano;
- Foram consideradas regiões com precipitação sobre o oceano;

- Para avaliar o comportamento da TSM na ZCAS sobre o oceano, foi utilizada a média dos membros do conjunto conforme (MENDOÇA; BONATTI, 2004), e também fez-se necessário a análise da tendência linear da média dos membros.

O cálculo da tendência linear foi obtido através da equação (3.1) (ARAUJO et al., 2009; SCOTTÁ, 2013):

$$Y_t = mX + b \quad (3.1)$$

Onde Y_t é o valor observado da série temporal, b é o ponto de interseção da linha de tendência com o eixo dos Y_t , m é a inclinação da linha de tendência e X é o período (tempo). Para que a reta se ajuste no conjunto de dados, o ajuste por mínimos quadrados é um dos métodos que podem ser utilizados para o cálculo de tendência linear. Para estimar os parâmetros m e b utiliza-se as equações (3.2) e (3.3) (SCOTTÁ, 2013):

$$m = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.2)$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} \quad (3.3)$$

Onde n é o numero de pontos (x, y) da série.

3.3.3 Cálculo da Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente

Foi analisada também a divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente da baixa troposfera em uma camada entre 1000 hPa (base) e 700 hPa (topo), sendo esta a região da troposfera onde a umidade se encontra em maior concentração. Além disso, o jato de baixos níveis está compreendido nessa camada, sendo o responsável pelo transporte de umidade dos trópicos para os extratropicos à leste dos Andes (MARENGO et al., 2004; ZOMEREN; DELDEN, 2007).

A divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente $div(\vec{Q}\vec{V})$ é calculada apenas em coordenadas horizontais segundo a equação (3.7) e mostra em que região onde há divergência ou convergência de umidade. Em análises de $div(\vec{Q}\vec{V})$, valo-

res negativos (positivos) estão associados a convergência (divergência) do fluxo de umidade. Portanto, de acordo com Veiga et al. (2005), regiões onde o acumulado de precipitação é alto (baixo) estão associadas com convergência (divergência) de umidade integrada verticalmente. Porém, para se obter $div(\vec{Q}\vec{V})$ é necessário calcular o fluxo de umidade integrado verticalmente em componentes horizontais (\vec{Q}_u e \vec{Q}_v). \vec{Q}_u e \vec{Q}_v são obtidos através da umidade específica, que se trata da razão entre a massa de vapor d' água e a massa total de ar (ar úmido + ar seco) entre dois níveis isobáricos, conforme as equações (3.4) e (3.5). Portanto, o transporte total integrado verticalmente ($\vec{Q}\vec{V}$) é dado pela equação (3.6). $\vec{Q}\vec{V}$ é utilizado para calcular a divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente (ARRAUT, 2007; SOARES; MARENGO, 2008; SATYAMURTY; COSTA, 2010; SATYAMURTY et al., 2010; QUADRO et al., 2012).

$$\vec{Q}_u = \frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{u})dP \quad (3.4)$$

$$\vec{Q}_v = \frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{v})dP \quad (3.5)$$

$$\vec{Q}\vec{V} = (Q_{\vec{u}} + Q_{\vec{v}}) = \frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{u})dP + \frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{v})dP \quad (3.6)$$

$$div(\vec{Q}\vec{V}) = \nabla_H \bullet \vec{Q}\vec{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{u})dP \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{g} \int_{1000}^{700} (q\vec{v})dP \right] \quad (3.7)$$

Onde \vec{u} e \vec{v} são as componentes do vento horizontal em $m s^{-1}$ e q a umidade específica dada em $kg kg^{-1}$. As unidades de $Q_{\vec{u}}$, $Q_{\vec{v}}$ e $\vec{Q}\vec{V}$ são dadas em $kg m^{-1} s^{-1}$. As unidades de $div(\vec{Q}\vec{V})$ são em $kg s^{-1}$.

3.3.4 Descrição dos Experimentos

As condições iniciais utilizadas para inicializar o MCGA são: os dados das análises do NCEP do conjunto *Final Analysis* (FNL) (KALNAY et al., 1996; NCEP, 1997) e os dados de TSM mensal observada durante o mês em que o evento ocorreu, tais dados pertencem ao conjunto *Optimum Interpolation SST* (OISST) do NCEP (REYNOLDS et al., 2002; REYNOLDS et al., 2007). Já o modelo acoplado BESM-OA2.3, além das condições iniciais atmosféricas do NCEP também foram utilizadas as condições iniciais oceânicas *restarts*, geradas pelo modelo oceânico MOM4p1 forçado por condições

atmosféricas observada. O *spin up* do MOM4p1 foi obtido rodando o modelo por 13 anos sendo forçado por campos atmosféricos climatológicos (vento, temperatura, pressão atmosférica, umidade, radiação), em seguida foi rodado por mais 58 anos (1950-2007) com campos interanuais do Large e Yeager (2009). Com isso os resultados do *spin up* do MOM4p1 foram utilizados para inicializar o BESM-OA2.3 (NOBRE et al., 2012; GIAROLLA et al., 2015). Neste estudo foram realizados experimentos utilizando o MCGA e MCGOA para cada um dos quatro eventos de ZCAS selecionados, em um total de 8 experimentos. Além disso, cada um dos modelos foi integrado com 10 membros tendo de 1 a 10 dias de prazo de previsão para o início do evento. Cada experimento tem um período de integração de 1 mês, portanto, compreendendo todo o evento de ZCAS.

3.3.5 Métodos Estatísticos de Avaliação

Várias medidas de desempenho podem ser utilizadas para comparar resultados e seus erros associados entre variáveis medidas/observadas e simuladas/previstas cada uma com suas vantagens e desvantagens. No que segue, será dada preferência ao uso de siglas em língua inglesa para a identificação dos diversos erros, obtendo uma melhor conformação com a literatura científica disponível atualmente. As métricas calculadas são: a diferença (d), Viés (BIAS em inglês) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE sigla em inglês).

A diferença d é uma quantidade fundamental para o estudo de erros entre o simulado e o observado para uma mesma variável. Basicamente, $d = 0$ significa simulação perfeita, enquanto que $d \gg 0$ ou $d \ll 0$, indica simulação imperfeita. Portanto, quanto mais distante de 0 o valor de d , mais imperfeita é a simulação. d , é representada pela equação (3.8):

$$d = P_{sim} - P_{obs} \quad (3.8)$$

P_{sim} e P_{obs} são os valores das variáveis simuladas e observadas respectivamente, onde P é uma variável qualquer (HALLAK; FILHO, 2011).

O BIAS mede a tendência de o modelo superestimar ou subestimar uma variável qualquer em relação a sua observação. Os valores positivos (negativos) indicam superestimativa (subestimativa). Esta tendência, também é chamada de erro sistemático, conforme a equação (3.9):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{sim} - P_{obs}) \quad (3.9)$$

O BIAS pode ter qualquer valor real, onde os valores mais próximos de zero, por definição, representam menor erro. É medido com a mesma unidade utilizada nas séries e N é o período de tempo (LIMA; ALVES, 2009; HALLAK; FILHO, 2011).

O RMSE que é comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos. É muito sensível a grandes desvios entre os valores das séries comparadas, o que se torna mais relevante quando se trata de avaliação de grandes erros. Pode assumir qualquer valor não negativo. É maior a semelhança entre as séries simulada/prevista e a observada quanto mais próximo de zero for o seu valor. É medido também com a mesma unidade utilizada nas séries. (HALLAK; FILHO, 2011). O RMSE é expressa conforme a equação (3.10):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{sim} - P_{obs})^2} \quad (3.10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados simulados pelos modelos MCGA e MCGOA, através de uma análise subjetiva confrontando visualmente a localização da ZCAS simuladas pelos modelos com o posicionamento da zona de convergência observada nos campos de precipitação, omega, radiação incidente e divergência de umidade integrada verticalmente. Também é apresentada uma avaliação do comportamento da TSM na ZCAS sobre regiões com registro de precipitação somente no oceano e por fim a análise objetiva onde através das métricas estatísticas (BIAS e RMSE) é diagnosticado a habilidade de cada modelo em prever os eventos de ZCAS.

4.1 Padrões Espaciais dos Eventos de ZCAS

4.1.1 Omega e Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente

4.1.1.1 Análise dos Episódios de ZCAS

De acordo com o campo médio de omega observado (Figura4.1a), nota-se através dos movimentos verticais ascendentes a ZCAS estabelecida com sua orientação clássica (noroeste-sudeste) que se estende do sul da Amazônia, passando pelo Centro-Oeste e Sudeste do Brasil até o Atlântico sudoeste. É possível constatar a ocorrência de uma subsidência compensatória ao sul da ZCAS conforme [Gandu e Dias \(1998\)](#), além disso percebe-se ao norte da região dos movimentos ascendentes associados à zona de convergência, movimentos descendentes compensatórios como visto em [Nobre et al. \(2002\)](#).

No campo observado da divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente (Figura4.1b), observa-se a intensa convergência do fluxo de umidade sobre a região da Bacia Amazônica, região Sudeste e Central do Brasil caracterizando a ocorrência da ZCAS. Essa convergência se estende sobre o Oceano Atlântico sudoeste em um padrão muito próximo ao observado no campo de omega (Figura4.1a). A presença de umidade pode propiciar um ambiente favorável à convecção, pois a liberação de calor latente pode instabilizar a atmosfera, uma vez que através do aquecimento do oceano, tem-se mais evaporação ocorrendo e conseqüentemente maior fornecimento de umidade em baixos níveis para a zona de convergência. Além disso, o maior aquecimento instabiliza as camadas mais baixas da atmosfera, favorecendo a ocorrência da precipitação convectiva, portanto, podendo contribuir na intensificação de movimentos ascendentes favorecendo a convergência de massa na

superfície e como consequência o decaimento da pressão com o tempo. Além disso, ainda é possível constatar que tanto ao norte quanto ao sul da zona de convergência, há ocorrência de divergência de umidade que junto com a subsidência observada no campo de omega (Figura4.1a) provoca a inibição da convecção sobre essas regiões.

Através do campo de omega simulado pelo MCGA (Figura4.1c), nota-se que a convecção associada à ZCAS é representada somente sobre o oceano em torno de 25°W;30°S, não se estendendo até o continente como sendo uma característica espacial da ZCAS. Ainda é possível perceber a ocorrência de subsidência ao sul dos movimentos ascendentes associados à zona de convergência, porém, a subsidência ao norte da zona de convergência não é observada como no campo das observações (Figura4.1a). A partir do campo de $div(QV)$ do MCGA (Figura4.1d), observa-se a ZCAS através da convergência de umidade, porém, o MCGA a coloca de forma zonal quando comparada com a observação (Figura4.1b).

Entretanto, na Figura4.1e, que corresponde ao campo de omega simulado pelo MCGOA, a zona de convergência possui uma orientação espacial menos zonal e mais próxima da sua orientação clássica quando comparada com a simulada pelo MCGA (Figura4.1c). É de se notar ainda que os movimentos ascendentes associados à ZCAS se estendem desde o continente até o Atlântico sudoeste. Uma vez que o MCGA não reproduziu esse padrão de similaridade com a zona de convergência. Além disso, observa-se características semelhantes apresentadas na observação (Figura4.1a) que se trata das subsidências compensatórias ao sul como indicado por [Gandu e Dias \(1998\)](#) e ao norte da ZCAS como constatado por [Nobre et al. \(2002\)](#), já que esta última não foi simulada pelo MCGA. Também constatou-se na Figura4.1e, a presença de um núcleo intenso sobre o sul de Minas Gerais, nordeste de São Paulo e sul do Rio de Janeiro de movimentos ascendentes que leva a instabilidade da atmosfera.

De acordo com o campo de $div(Q\vec{V})$ do MCGOA (Figura4.1f), a convergência de umidade que está associada a ZCAS é apresentada com um padrão espacial mais próximo da observação (Figura4.1b) do que o MCGA (Figura4.1d), percebe-se ainda que tanto ao norte quanto ao sul da ZCAS há divergência de umidade, fator responsável assim como a subsidência pela supressão da convecção na região. Constata-se um núcleo intenso de convergência de umidade sobre o sul de Minas Gerais, nordeste de São Paulo e sul do Rio de Janeiro favorecendo a atividade convectiva sobre a região. Esse núcleo de convergência de umidade foi simulado por ambos os modelos.

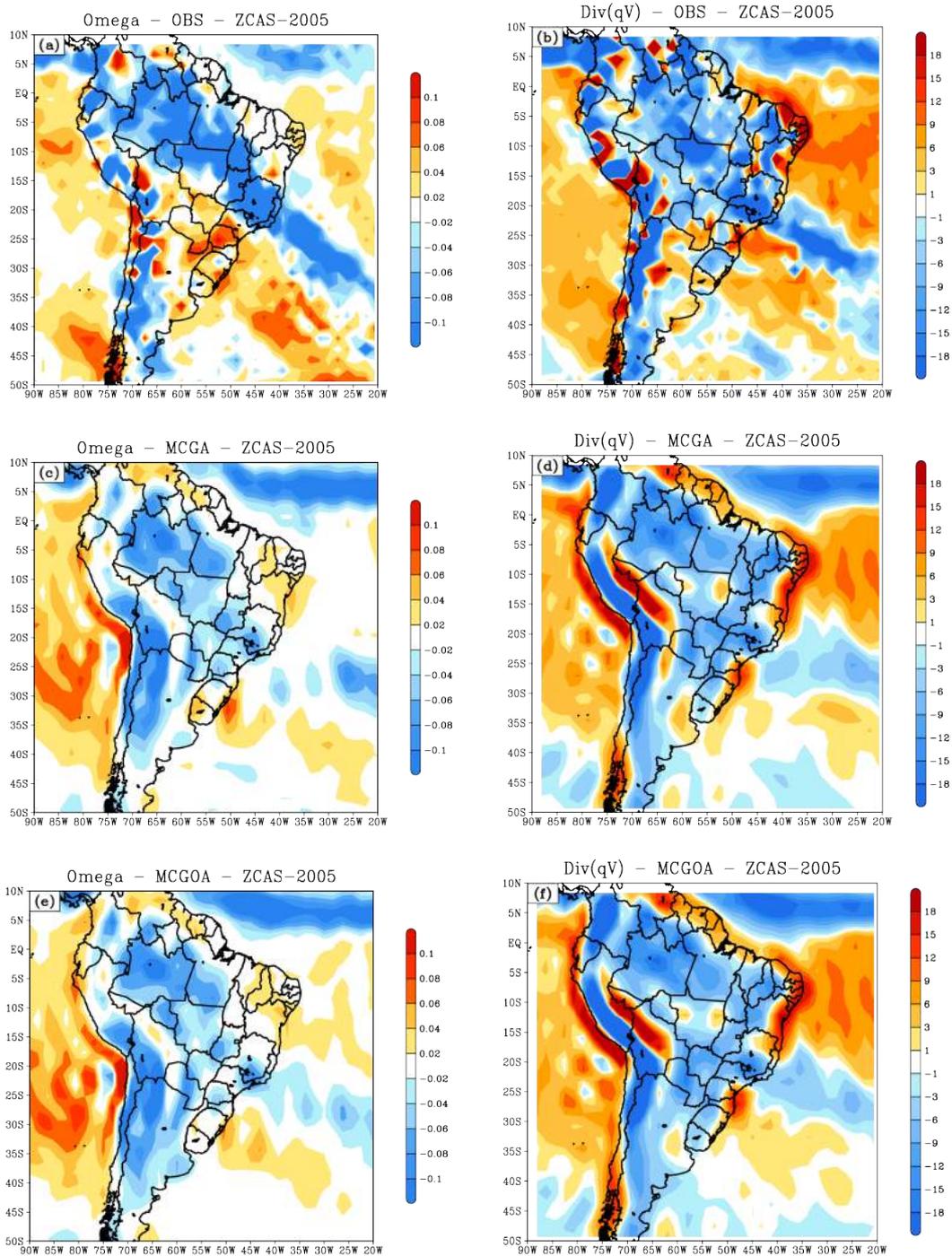


Figura 4.1 - Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa-700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.

A partir do campo médio de omega observado no nível de 500 hPa (Figura4.2a), nota-se a ZCAS em sua clássica orientação (noroeste-sudeste) indicada por valores

negativos de omega (movimentos ascendentes), este fator está associado a convecção presente na zona de convergência. Tal aspecto induz consequências dinâmicas como é o caso dos movimentos verticais descendentes compensatórios ao sul da ZCAS conforme Gandu e Dias (1998). A subsidência ao sul da zona de convergência promove a inibição dos processos convectivos tornando a atmosfera mais estável nessa região. De acordo com o campo médio observado de $div(\vec{Q}\vec{V})$ integrado na vertical (Figura4.2b), a convergência do fluxo de umidade que se estende desde o sul da Amazônia até o Atlântico adjacente, caracteriza a ocorrência da ZCAS. Esta convergência associa-se a um padrão muito próximo ao observado no campo de omega (Figura4.2a), representando uma área de convecção. Ainda observa-se que tanto ao sul quanto ao norte da zona de convergência, são regiões sob influência da divergência do fluxo de umidade favorecendo a supressão da convecção. Em ambas as regiões, a atmosfera é estável devido ao efeito dos movimentos verticais descendentes.

Na (Figura4.2c), o MCGA apresenta os movimentos ascendentes que se associam à zona de convergência com uma orientação zonal quando comparado com o que foi observado na (Figura4.2a). Nota-se ainda que uma descontinuidade na ZCAS entre o oceano e o continente. Através do campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ simulado pelo MCGA (Figura4.2d), constatou-se uma região de convergência de umidade similar a orientação da ZCAS. A divergência de umidade é notada ao sul da zona de convergência, porém, não tão intensa quanto no setor norte.

Por meio do campo médio apresentado pelo MCGOA (Figura4.2e), percebe-se através dos movimentos ascendentes que a ZCAS possui um padrão espacial semelhante ao que foi simulado pelo MCGA (Figura4.2c), entretanto a zona de convergência simulada pelo MCGOA não apresenta a descontinuidade entre o oceano e o continente mostrada pelo MCGA. Observa-se ainda que ambos os modelos para este caso, não reproduziram a subsidência compensatória ao norte e ao sul da ZCAS conforme vista no campo médio de omega observado (Figura4.2a).

De acordo com o campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ (Figura4.2f), a ZCAS apresenta-se no MCGOA bem estabelecida através de uma região de convergência que se estende do continente até o Atlântico adjacente. Assim como o MCGA, o MCGOA mostrou ao norte da ZCAS uma intensa divergência de umidade sobre o oceano, como visto no campo observado de $div(\vec{Q}\vec{V})$ (Figura4.2b). Além disso, ambos os modelos possui semelhanças no padrão espacial no que se diz respeito a zona de convergência.

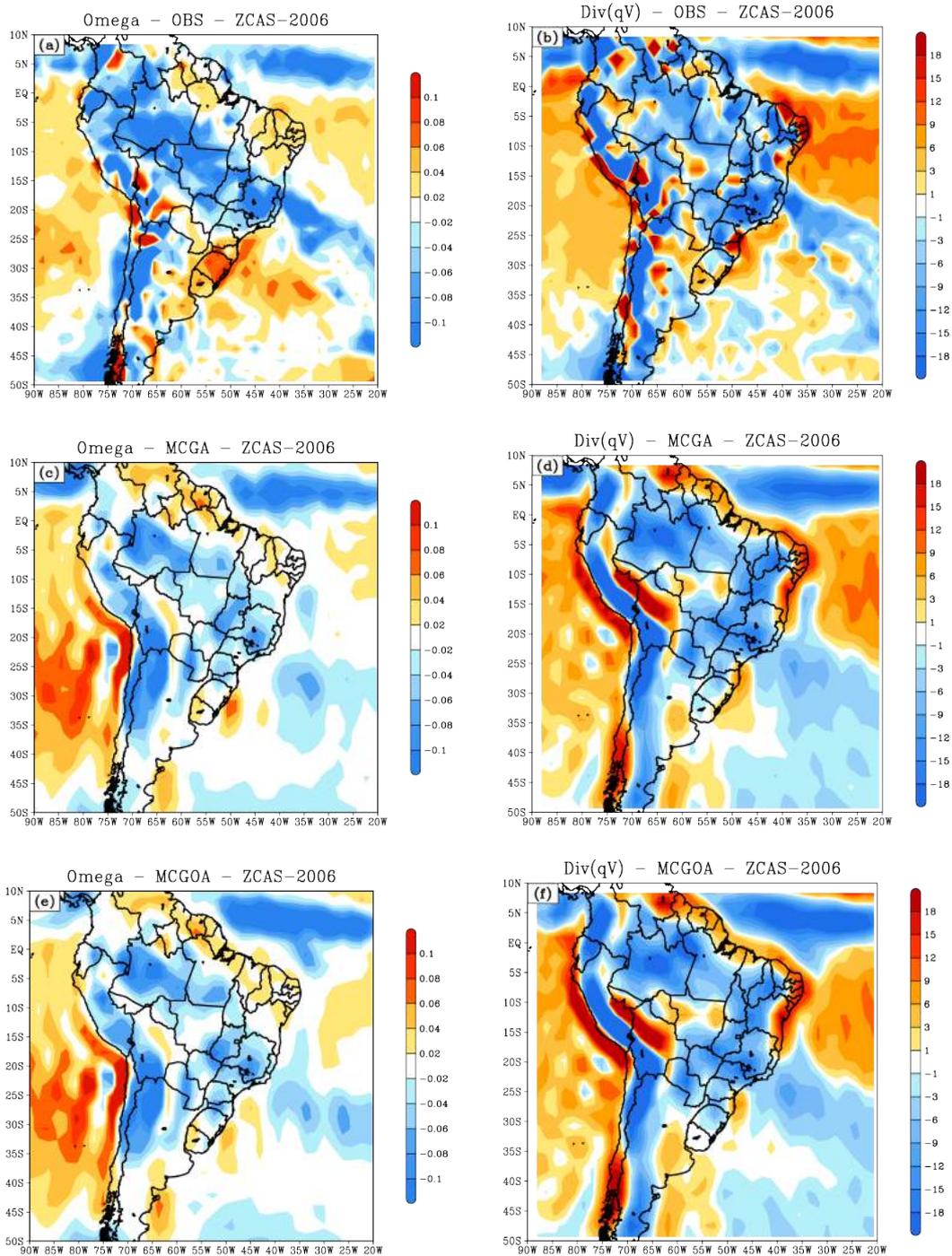


Figura 4.2 - Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.

De acordo com o campo médio observado de omega (Figura4.3a), percebe-se que a zona de convergência está estabelecida na região dos movimentos verticais ascen-

dentos, se estendendo desde o continente até o Atlântico adjacente. Ainda é possível constatar que tanto ao sul quanto ao norte da ZCAS, nota-se que há movimentos descendentes como apontado por Gandu e Dias (1998) e Nobre et al. (2002) respectivamente. Através do campo médio observado de $div(\vec{Q}\vec{V})$ (Figura4.3b), percebe-se a presença da faixa de convergência de umidade alinhada na direção noroeste-sudeste semelhante ao padrão espacial da ZCAS. As regiões de subsidência no campo observado de omega (Figura4.3a), coincidem com as áreas de divergência de umidade, promovendo um ambiente desfavorável ao desenvolvimento de convecção na região. Por outro lado, a região da ZCAS que está associado aos movimentos verticais ascendentes, coincidem com a área de convergência de umidade, esse aporte de umidade é necessário para a manutenção da zona de convergência.

No campo de omega simulado pelo MCGA (Figura4.3c), a região dos movimentos ascendentes associados à ZCAS se apresenta em um padrão espacial zonal, diferentemente do que foi constatado no campo observado (Figura4.3a). Além disso, nota-se a ocorrência de uma certa descontinuidade na zona de convergência entre o continente e o oceano e de que a subsidência ao sul da ZCAS restringe-se a uma área mais a leste ($25^{\circ}\text{W};35^{\circ}\text{S}$). No campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ mostrado pelo MCGA (Figura4.3d), observa-se que a região de convergência de umidade associada à ZCAS apresenta uma descontinuidade entre o oceano e o continente provocada pela divergência de umidade sobre o Rio de Janeiro. Ainda é possível perceber que assim como omega (Figura4.3a), a área mais a leste ($25^{\circ}\text{W};35^{\circ}\text{S}$) concentra a divergência de umidade ao sul da ZCAS.

Embora o MCGA (Figura4.3c) tenha apresentado uma descontinuidade entre o oceano e o continente na região dos movimentos ascendentes relacionados à zona de convergência, no entanto, apesar do MCGOA (Figura4.3e), também ter simulado a ZCAS com um padrão espacial diferente do que foi apresentado pelos dados observados (Figura4.3a), o MCGOA não apresenta a descontinuidade mostrada pelo MCGA, uma vez que no campo médio observado, a zona de convergência é mostrada de forma contínua. Também nota-se que os movimentos descendentes ao sul da ZCAS se estende desde o oceano até o continente (Rio Grande do Sul), já que o MCGA se restringem somente a área mais a leste ($25^{\circ}\text{W};35^{\circ}\text{S}$). Embora que os dados observados de $div(\vec{Q}\vec{V})$ representem a região de convergência de umidade relacionadas à ZCAS, orientada de noroeste-sudeste e contínua, o MCGOA (Figura4.3f), coloca a região de convergência de umidade associada à ZCAS com uma orientação zonal, porém, de forma contínua desde o Atlântico Sudoeste até o continente (Rio de Janeiro). Diferentemente ao resultado simulado pelo MCGA (Figura4.3d), onde

há uma descontinuidade na região da ZCAS entre continente e oceano ocorrida pela divergência de umidade. Além disso, assim como o campo de omega do MCGA (Figura 4.3c), a divergência ao sul da ZCAS se restringe a área ($25^{\circ}\text{W};35^{\circ}\text{S}$). Enquanto que a divergência de umidade ao sul da zona de convergência estende-se desde o oceano até o continente.

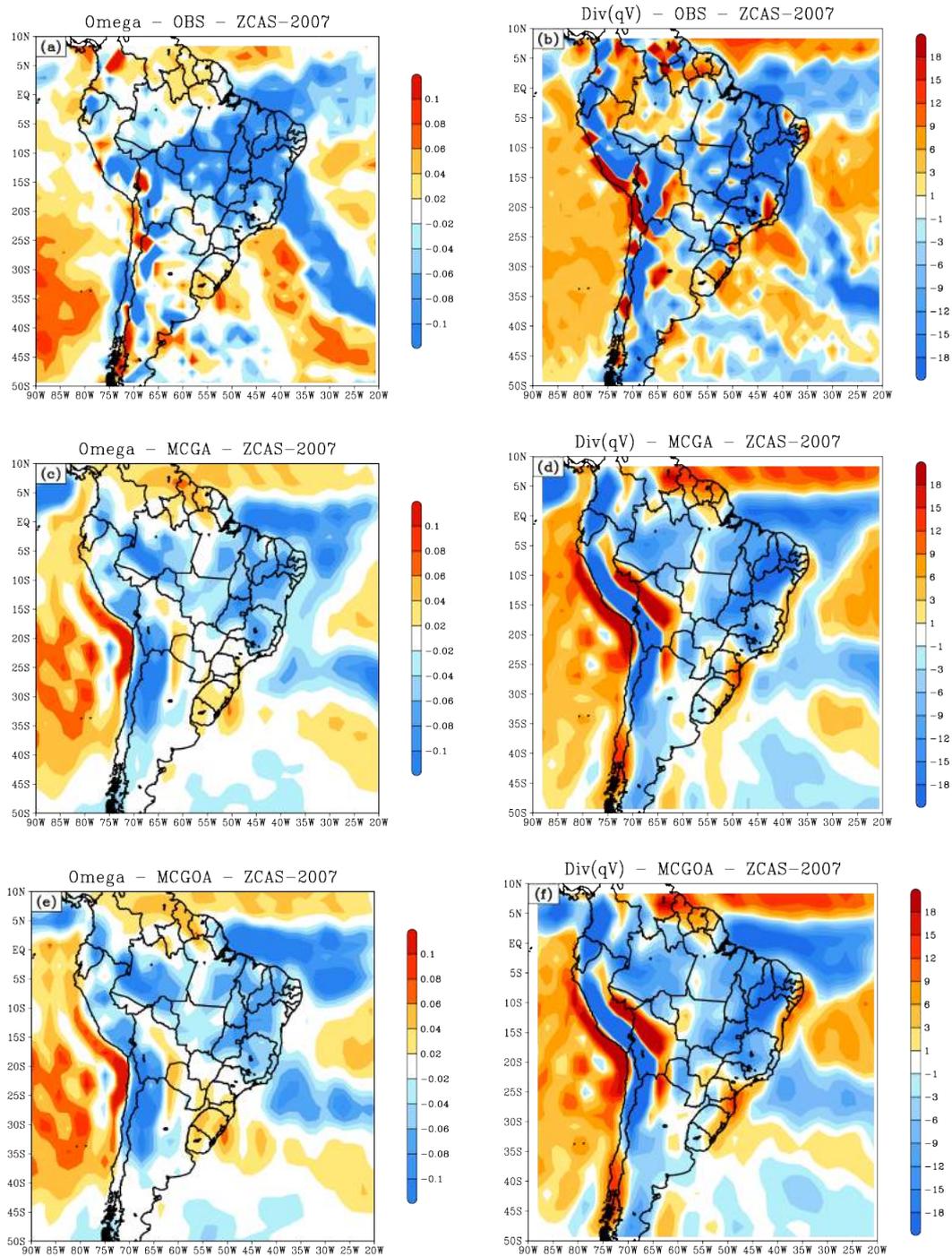


Figura 4.3 - Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.

Por meio do campo médio de omega observado (Figura 4.4a), é possível notar a ZCAS através dos movimentos verticais ascendentes que se estendem desde o sul da Amazônia-

nia até o Atlântico Sudoeste na orientação noroeste-sudeste. Além disso, percebe-se que o leste de Minas Gerais assim como o Espírito Santo e o Oceano Atlântico adjacente, estão sob a influência de intensos valores negativos de omega (movimentos ascendentes). Foi constatado também a presença de uma subsidência compensatória nas regiões norte e ao sul da ZCAS conforme Nobre et al. (2002) e Gandu e Dias (1998) respectivamente. Coincidindo com o campo observado de omega (Figura4.4a) em termos de posicionamento do sistema, a região em que a ZCAS se apresenta é caracterizada pela convergência de umidade que vai do sul da Amazônia até o Atlântico Sudoeste, como vista no campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ (Figura4.4b). Onde houve a presença dos movimentos descendentes tanto no lado tropical, quanto do lado polar da ZCAS, constatou-se uma intensa divergência de umidade, mas sobretudo no lado tropical da zona de convergência.

Mesmo havendo uma descontinuidade com subsidência na ZCAS, algo que não é vista nos dados observados, o MCGA (Figura4.4c) simulou a zona de convergência com uma alinhamento (noroeste-sudeste) próximo ao que foi notado no campo médio observado de omega (Figura4.4a). Além disso, vale ressaltar a subsidência ao sul da zona de convergência. No campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ simulado pelo MCGA (Figura4.4d), a ZCAS mostra uma descontinuidade apresentando uma divergência de umidade nesta região. Ainda nota-se que a divergência de umidade age nos setores norte e sul da zona de convergência.

O MCGOA (Figura4.4e), coloca os movimentos ascendentes associados à ZCAS sobre o oceano de forma muito próxima ao que foi constatado no campo de omega observado da Figura4.4a. Em relação ao campo de omega do MCGA (Figura4.4c), o MCGOA obteve um padrão próximo no que se diz respeito a localização dos movimentos ascendentes relacionados à zona de convergência, porém, não representa a descontinuidade entre o continente (Rio de Janeiro e Espírito Santo) e o Atlântico adjacente com a subsidência observada no campo de omega do MCGA (Figura4.4c). Além disso, observa-se que os movimentos descendentes nas porções norte e sul da ZCAS sobre o oceano conforme notado na Figura4.4a, foram representados por ambos os modelos. No campo médio de $div(\vec{Q}\vec{V})$ do MCGOA (Figura4.4f) é possível constatar que a convergência de umidade associada à ZCAS, possui orientação similar aos dados observados da Figura4.4b. Percebe-se ainda que há divergência de umidade sobre o Rio de Janeiro e Espírito Santo, representando uma descontinuidade na ZCAS sobre essa região, embora que a divergência de umidade que age sobre essa área continental é menos intensa quando comparada com a observada no MCGA (Figura4.4d). Assim como o MCGA, o MCGOA também simulou a diver-

gência de umidade nos setores norte e sul da zona de convergência sobre o oceano conforme as observações da Figura 4.4b.

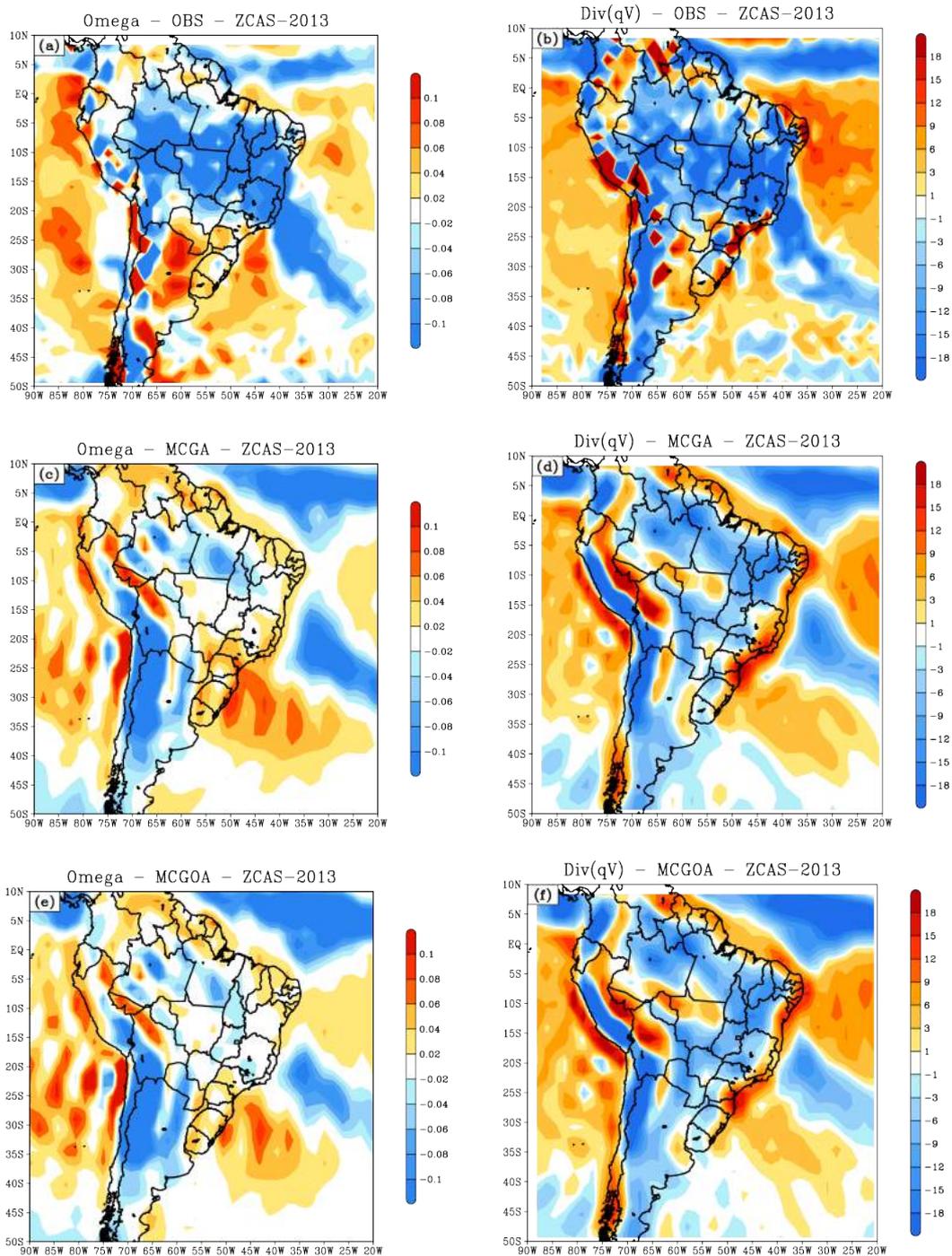


Figura 4.4 - Omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa–700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.

4.1.1.2 Análise dos Campos Compostos de Omega e Divergência do Fluxo de Umidade Integrada Verticalmente

Através da análise dos campos compostos para todos os casos estudados, é possível tornar evidente o comportamento atmosférico dominante nos eventos de ZCAS, filtrando qualquer fenômeno que não esteja diretamente relacionado a este. De acordo com o composto de omega observado (Figura4.5a), um aspecto predominante nos casos é a faixa com movimentos ascendentes na orientação noroeste-sudeste que se associa a ZCAS. Percebe-se ainda sobre o oceano, a presença das subsidências compensatórias que causam a supressão da convecção nas regiões ao sul Gandu e Dias (1998) e norte Nobre et al. (2002) da ZCAS.

Sobre o oceano, o MCGOA (Figura4.5e) apresenta uma característica espacial da zona de convergência que é mais próxima do composto observado (Figura4.5a) quando comparado ao MCGA (Figura4.5c). Além disso, o MCGOA assim como os dados observados, representa a ZCAS de forma contínua e exhibe a subsidência ao norte da zona de convergência. Uma vez que o MCGA mostra uma descontinuidade na interface continente-oceano e não reproduz a subsidência ao norte da ZCAS como vista nas observações.

Vale ressaltar que ambos os modelos apresentaram a existência de um erro sistemático sobre a região dos Andes que gera movimentos ascendentes espúrios e como consequência, uma subsidência compensatória sobre o Pacífico, mas sobretudo na costa oeste da América do Sul, onde os movimentos descendentes são mais intensos do que mostrado no composto observado de omega. Portanto, o MCGA e MCGOA apresentam um padrão semelhante como uma resposta ao erro sistemático que causa excesso de precipitação espúria sobre os Andes que está relacionado a coordenda vertical σ e a deficiência espectral da representação da orografia por parte dos modelos conforme Cavalcanti et al. (2002).

Na análise do campo composto de $div(Q\vec{V})$, nota-se nos dados observados (Figura4.5b) a convergência de umidade na orientação noroeste-sudeste caracterizando o padrão dominante da zona de convergência conforme visto em todos os casos estudados. Ainda observa-se a presença nos setores norte e sul da ZCAS, a divergência de umidade que age inibindo a atividade convectiva em ambas as regiões.

Sobre o oceano, o MCGA (Figura4.5d) representa a ZCAS, cujo a banda de convergência de umidade está alinhada no sentido noroeste-sudeste. Porém, nota-se a descontinuidade entre o continente e o oceano. Por outro lado, além do MCGOA

representar o padrão espacial da zona de convergência mais próximo do campo composto observado (Figura 4.5b), percebe-se que a faixa de convergência de umidade se mostra contínua como a observação, portanto, se diferenciando ao que é visto na interface oceano-continente pelo MCGA. Ambos os modelos representam a divergência de umidade ao norte da ZCAS, característica comum em todos os eventos.

Ressalta-se que assim como nos campos compostos de omega, o erro sistemático inerente aos modelos sobre a região dos Andes se repete com a convergência de umidade representada de forma espúria. Além disso, a oeste e leste dos Andes, a divergência de umidade é mais intensa nos modelos do que no campo composto observado. Portanto, em ambos os lados dos Andes ocorre uma simetria com relação a divergência de umidade no MCGA e MCGOA devido ao erro sistemático.

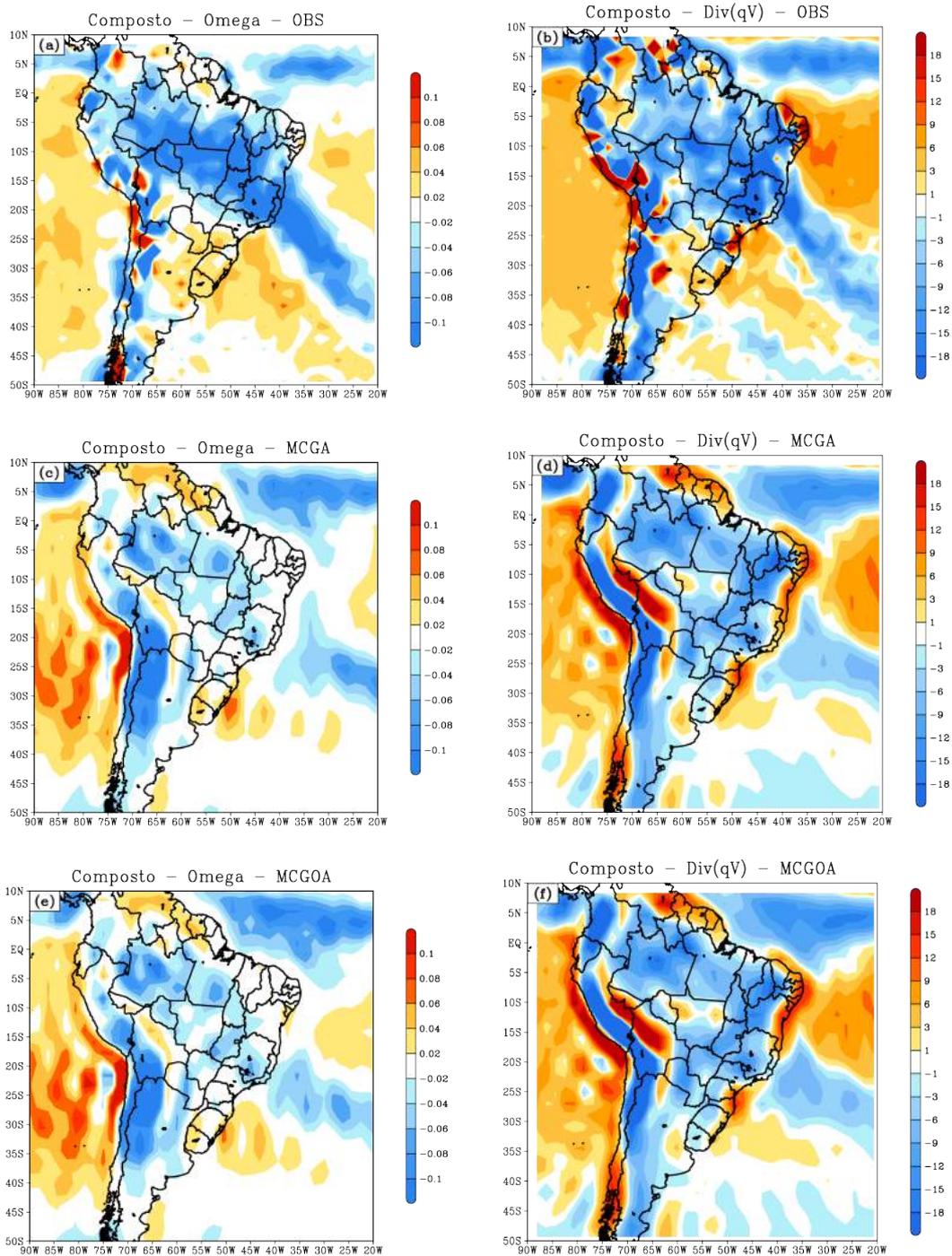


Figura 4.5 - Composições média de omega ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) médio no nível de 500 hPa para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (c) MCGA e (e) MCGOA. Divergência média do fluxo de umidade integrado verticalmente entre 1000hPa-700hPa em ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (b) observação, (d) MCGA e (f) MCGOA. Fonte dos dados observados: CFSR/NCEP.

4.1.2 Precipitação

4.1.2.1 Análise dos Episódios de ZCAS

De acordo com o campo médio de precipitação observada (Figura4.6a), a ZCAS se apresenta estabelecida com sua orientação clássica (noroeste-sudeste), com núcleos de precipitação intensa sobre o leste de Minas Gerais, norte do Rio de Janeiro e o Espírito Santo. Além disso, nota-se um núcleo significativo de precipitação sobre o oceano. A intensa convergência de umidade (Figura4.1b) juntamente com os movimentos verticais ascendentes (Figura4.1a) em ambas as regiões (continente e oceano) levaram as condições favoráveis para a intensa precipitação sobre as áreas já mencionadas.

Por meio do campo de precipitação simulada pelo MCGA (Figura4.6b), é possível constatar que a ZCAS é representada pelo modelo com uma orientação zonal, diferente do que é apresentada pelo campo de precipitação observada conforme a Figura4.6a. Também é possível perceber que o modelo reproduziu o núcleo de precipitação sobre o sul de Minas. Entretanto, o campo de precipitação simulado pelo MCGOA (Figura4.6d) apresenta em termos de padrão espacial uma semelhança maior com o campo de precipitação observada, ou seja, a ZCAS reproduzida pelo MCGOA possui uma leve orientação diagonal como é o caso da zona de convergência do campo observado (Figura4.6a) quando se compara com o campo de precipitação do MCGA (Figura4.6b). Conta desfavoravelmente ao MCGOA, o fato de que este evento ZCAS-2005 ter um período relativamente curto (6 dias) para que o modelo acoplado seja sensível a presença da nebulosidade. Portanto, o tempo necessário para que o MCGOA imprima o efeito do acoplamento fica prejudicado. Uma vez que nesse curto espaço de tempo a temperatura do oceano ainda se encontra praticamente na inércia.

De acordo com o campos das diferenças entre o MCGA e observação (Figura4.6c) e MCGOA e observação (Figura4.6e), nota-se que ambos os modelos apresentaram uma certa semelhança entre si, tanto o MCGA, quanto o MCGOA subestimaram a precipitação com relação a observação (Figura4.6a) nas mesmas regiões comentadas anteriormente (continente e oceano). Ambos os modelos não representam de forma bem detalhada os núcleos intensos de precipitação conforme visto na Figura4.6a, possivelmente devido a sua baixa resolução.

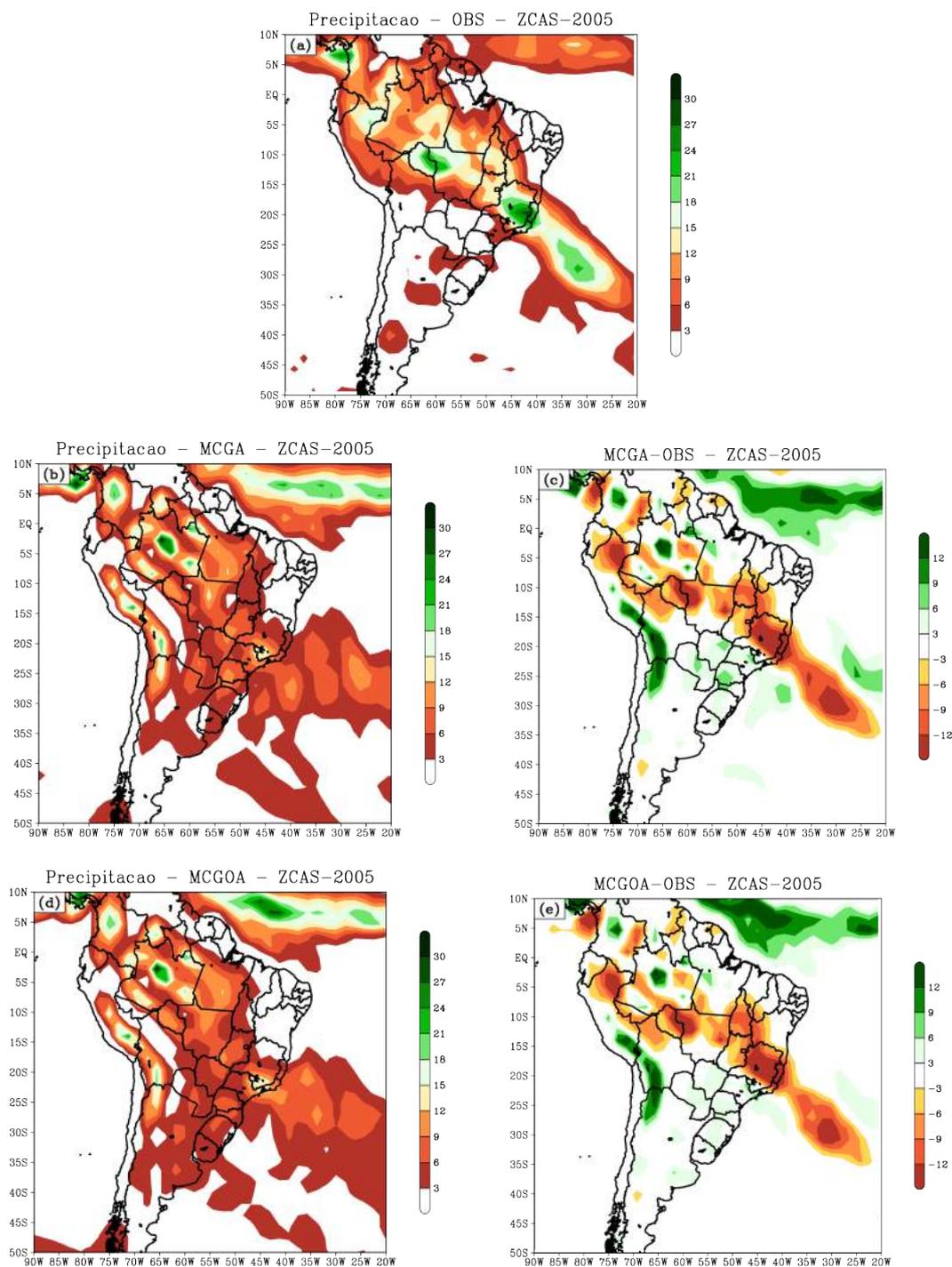


Figura 4.6 - Precipitação média ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.

No campo médio da precipitação observada (Figura 4.7a), a ZCAS se apresenta estabelecida com a típica característica que é a sua orientação (noroeste-sudeste), desde

o sul da Amazônia passando pelo Centro-Oeste e Sudeste do Brasil até o Atlântico sudoeste. Nota-se que há um núcleo significativo de precipitação sobre o Minas Gerais associado aos movimentos ascendentes (Figura4.2a) bem como a convergência de umidade (Figura4.2b) sobre a região, promovendo um ambiente favorável para uma atmosfera instável e o efeito disso é a atividade convectiva ocasionando a precipitação.

Na Figura4.7b, a precipitação simulada pelo MCGA associada à ZCAS, abrange uma área maior no oceano quando comparado com a precipitação observada (Figura4.7a). O núcleo de precipitação sobre Minas Gerais é simulado pelo modelo, porém, em uma menor intensidade. Na (Figura4.7d), a precipitação associada à zona de convergência mostrada pelo MCGOA apresenta um padrão muito próximo ao que o MCGA simulou (Figura4.7b). O núcleo de precipitação significativo mostrado no campo médio observado (Figura4.7a) sobre Minas Gerais, é subestimado tanto pelo MCGA (Figura4.7c) quanto pelo MCGOA (Figura4.7e), conforme visto nos campos da diferenças de precipitação entre modelo e observação.

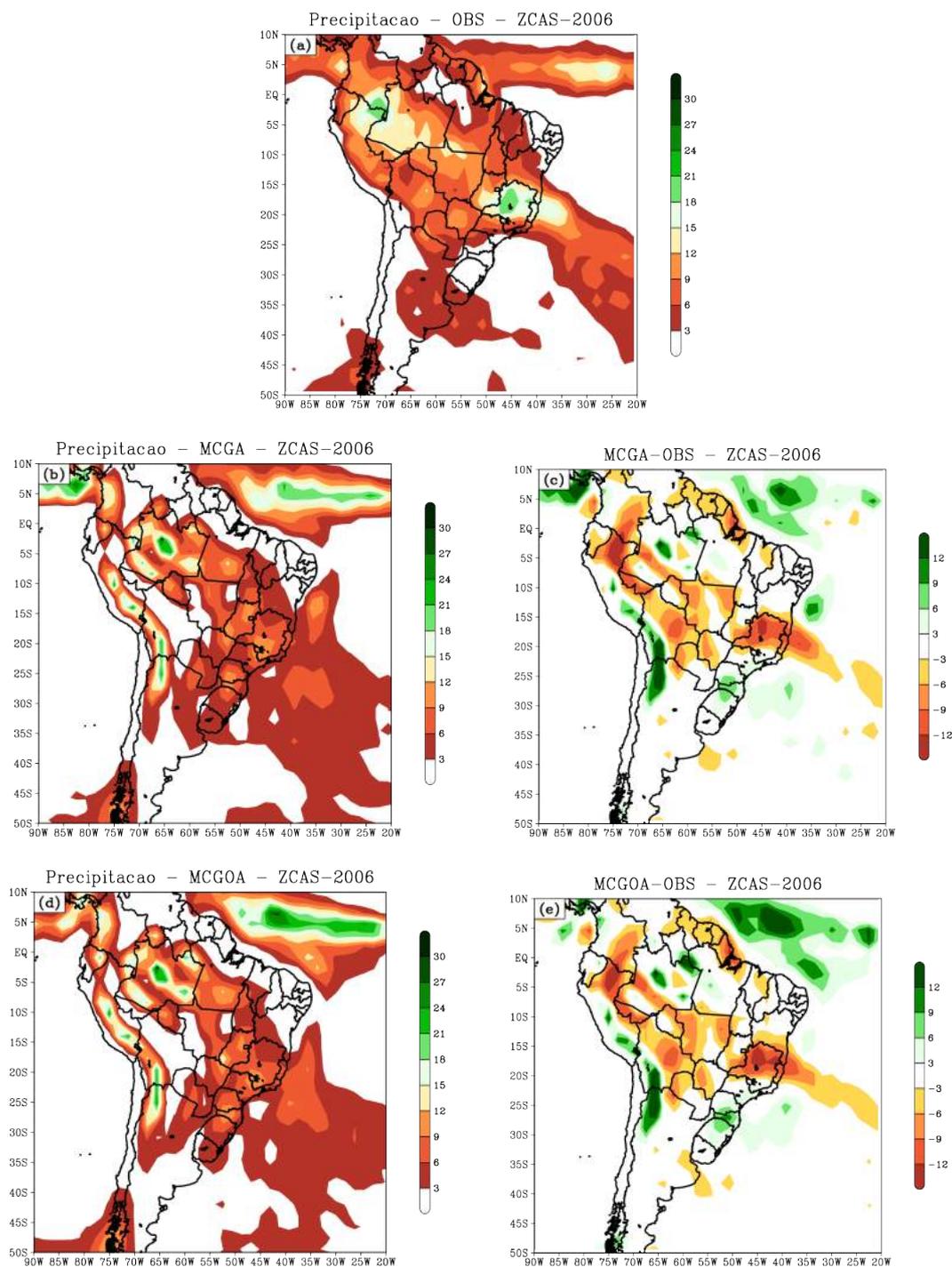


Figura 4.7 - Precipitação média ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.

De acordo com o campo médio de precipitação observada (Figura 4.8a), a zona de convergência se apresenta na orientação noroeste-sudeste, com uma área de precipi-

tação significativa sobre o norte de Minas Gerais e a Bahia. Essa área coincide onde os movimentos verticais ascendentes e a convergência de umidade foram intensos, promovendo condições favoráveis para o estabelecimento da ZCAS. Ressalta-se que este evento foi ocorrido em fevereiro de 2007, portanto, segundo Kousky (1988), a zona de convergência diminui de intensidade e a convecção se restringe à porção mais ao norte. Sendo assim, a região mais ao sul da ZCAS experimenta um decréscimo na precipitação.

Porém, no campo de precipitação representado pelo MCGA (Figura4.8b), o modelo simulou a zona de convergência com um padrão diferente ao constatado no campo médio da precipitação observada (Figura4.8a). Assim como o MCGA, o MCGOA (Figura4.8d), simulou a ZCAS com uma orientação zonal, o que não condiz com o padrão espacial que foi notado nos dados observados de precipitação, ou seja, o alinhamento noroeste-sudeste da zona de convergência. Embora a precipitação observada mais intensa tenha se concentrado sobre a região norte de Minas Gerais e na Bahia, ambos os modelos subestimaram a precipitação nessas áreas, mas sobretudo é possível perceber que tanto o MCGA (Figura4.8c) quanto o MCGOA (Figura4.8e), subestimaram a precipitação sobre o oceano.

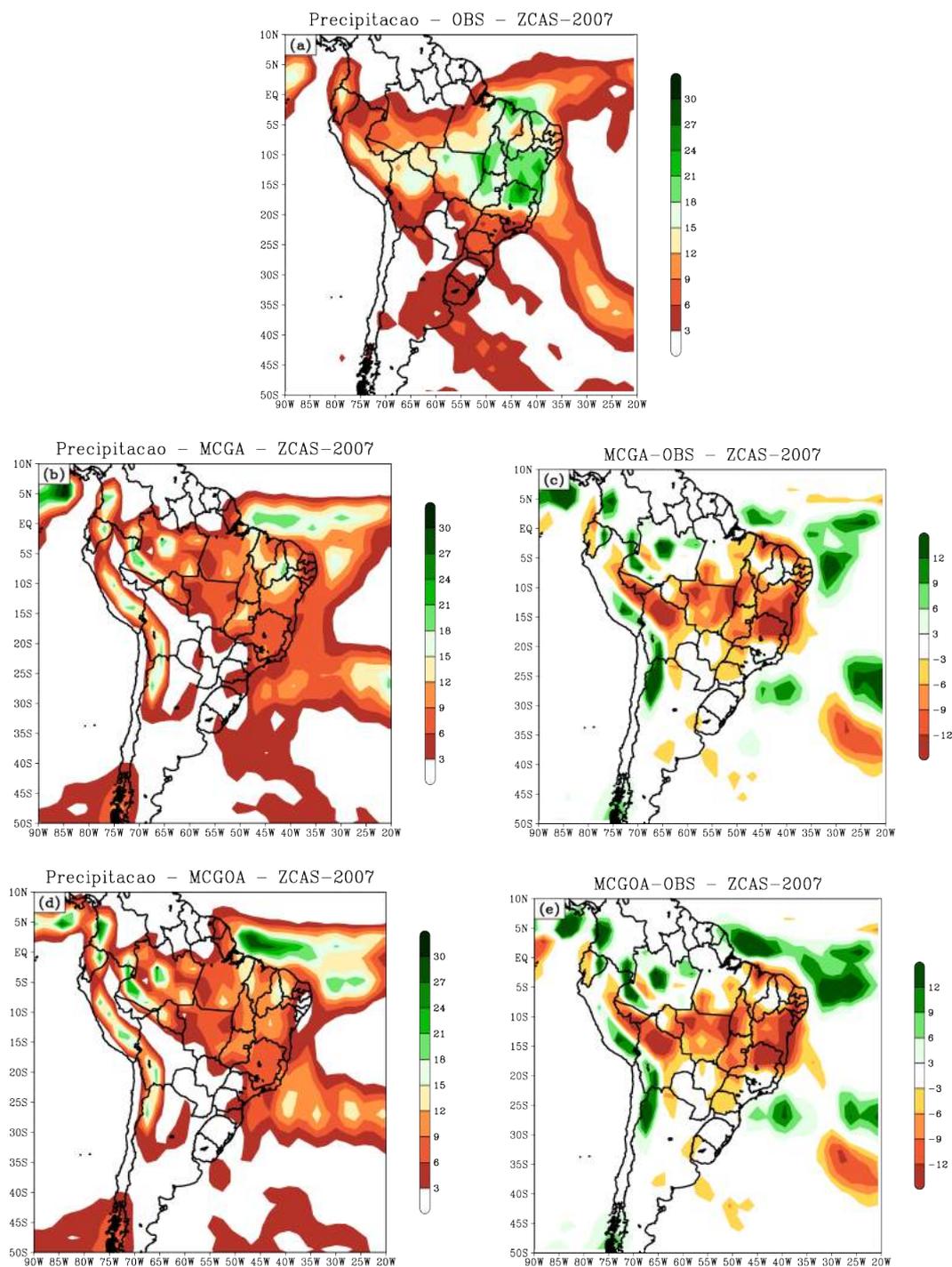


Figura 4.8 - Precipitação média ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.

Através do campo médio de precipitação observada (Figura 4.9a), nota-se uma banda de precipitação que se estende a partir da Bacia Amazônica, boa parte da região

Sudeste e alcançando o Atlântico Sudoeste adjacente. A mesma banda com o alinhamento noroeste-sudeste, o que caracteriza a atuação da ZCAS, pode ser notado na média dos campos observados de omega (Figura4.4a) e da divergência do fluxo de umidade (Figura4.4b). Observa-se ainda que os valores significativos de precipitação estão localizados no leste de Minas Gerais e Espírito Santo, mas sobretudo no Atlântico adjacente próximo as costas do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

De acordo com o campo médio de precipitação simulada pelo MCGA (Figura4.9b), o modelo apresenta sobre o oceano, a banda de precipitação com uma orientação (noroeste-sudeste) característica da zona de convergência, mas apresentando também uma ligação entre a convecção subtropical ocorrida na ZCAS com a precipitação no Atlântico equatorial associada à ZCIT. Também é possível verificar na Figura4.9a, a zona de convergência se mostrando contínua desde o continente (sul da Amazônia) até o Atlântico Sudoeste adjacente, algo que não é visto no MCGA, que apresenta uma descontinuidade na interface oceano-continente. Ressalta-se ainda no campo de precipitação do MCGA, nota-se a ausência da precipitação no oeste e norte de Minas Gerais, fato que é constatado no campo observado da precipitação conforme a Figura4.9a.

Entretanto, no campo de precipitação do MCGOA (Figura4.9d), percebe-se que a banda de precipitação aparece com a orientação típica de ZCAS e contínua, diferentemente ao que foi verificado na precipitação simulada pelo MCGA. Vale salientar que o MCGOA coloca a precipitação mesmo que em uma menor intensidade sobre o oeste de Minas Gerais, uma vez que o MCGA não representou a precipitação sobre essa região. No campo das diferenças entre o MCGA e observação (Figura4.9c), constatou-se que o modelo subestima a precipitação associada à ZCAS, mas sobretudo a precipitação mais significativa localizada no oeste de Minas Gerais e no Atlântico adjacente próximo a costa do Espírito Santo. Porém, o MCGA superestimou de forma significativa a precipitação na região ao norte da zona de convergência.

No campo das diferenças entre MCGOA e observação (Figura4.9e), apresenta um padrão semelhante ao BIAS do MCGA, com a precipitação subestimada na região onde a ZCAS está localizada conforme os dados do campo observado da Figura4.9a, porém, o MCGOA não mostra no setor norte da zona de convergência a precipitação que foi superestimada pelo MCGA.

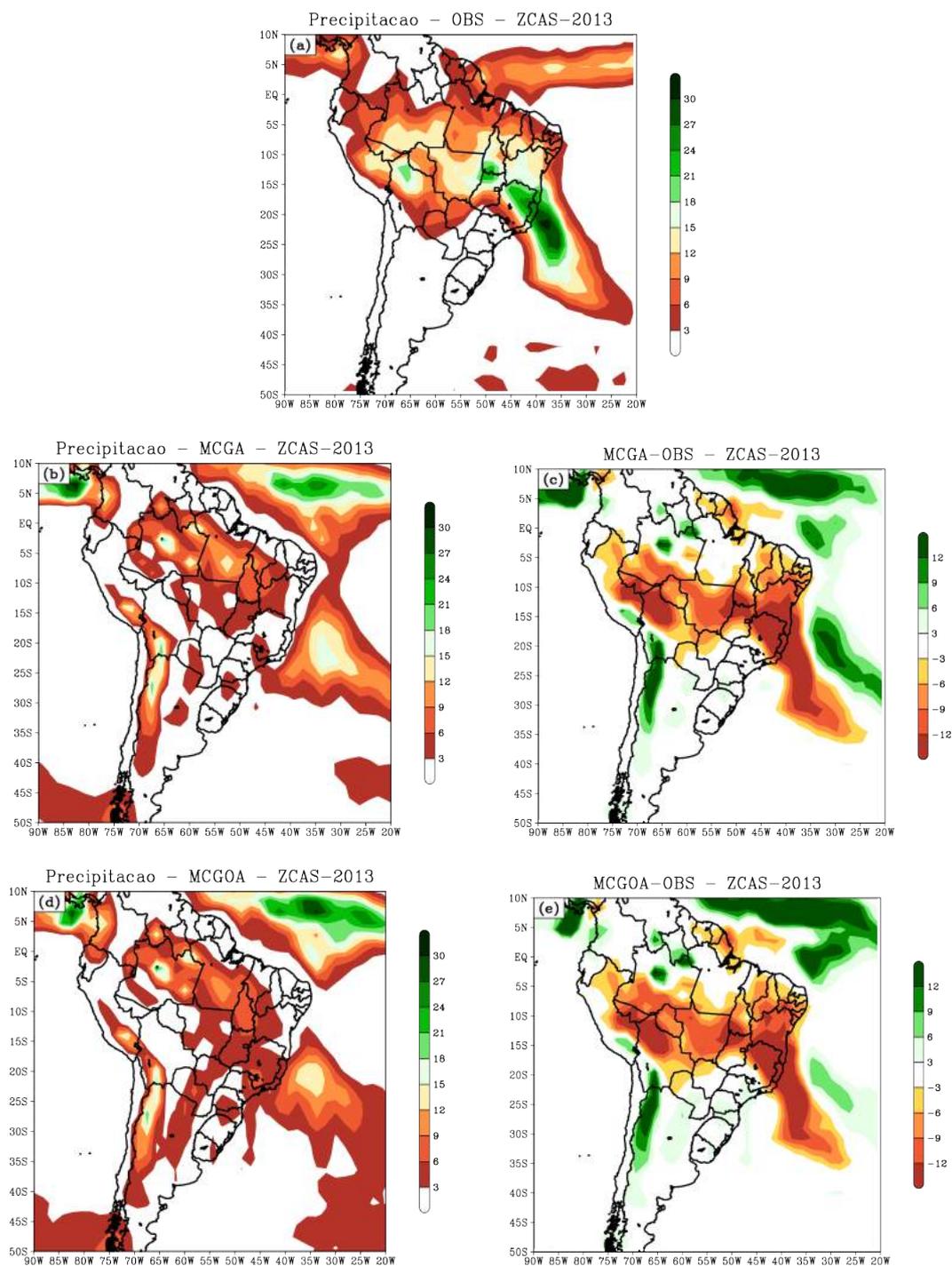


Figura 4.9 - Precipitação média ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.

4.1.2.2 Análise dos Campos Compostos de Precipitação

De acordo com o campo composto da precipitação observada (Figura 4.10a), a banda de precipitação se manteve dominante com sua clássica orientação noroeste-sudeste caracterizando a ZCAS. Sobre o oceano, o MCGA (Figura 4.10b) manteve a zona de convergência com um alinhamento zonal. Um outro fato a ser notado, é que a precipitação associada com a ZCAS, apresenta uma ligação com a precipitação da ZCIT, aspecto esse, que não é notado no MCGOA (Figura 4.10d), o tornando mais próximo ao que é notado no campo observado de precipitação. Portanto, principalmente sobre o oceano, o padrão dominante da banda de precipitação associada à ZCAS vista nos casos estudados é exibida nas composições de precipitação. Através do campo composto da diferença entre modelo e observação, em ambos os modelos (Figura 4.10c,e) de forma semelhantes entre si, subestimaram a precipitação associada à ZCAS.

Vale ressaltar que sobre os Andes, a intensa convergência de umidade e os fortes movimentos verticais ascendentes gerados de forma espúria devido a um erro sistemático inerente aos modelos, tem um efeito no excesso de precipitação na região dos Andes, como aponta os campos compostos da diferença entre modelo e observação. Esse excesso de precipitação segundo [Cavalcanti et al. \(2002\)](#), está associado a deficiência da representação espectral da orografia e a circulação associada nesta região.

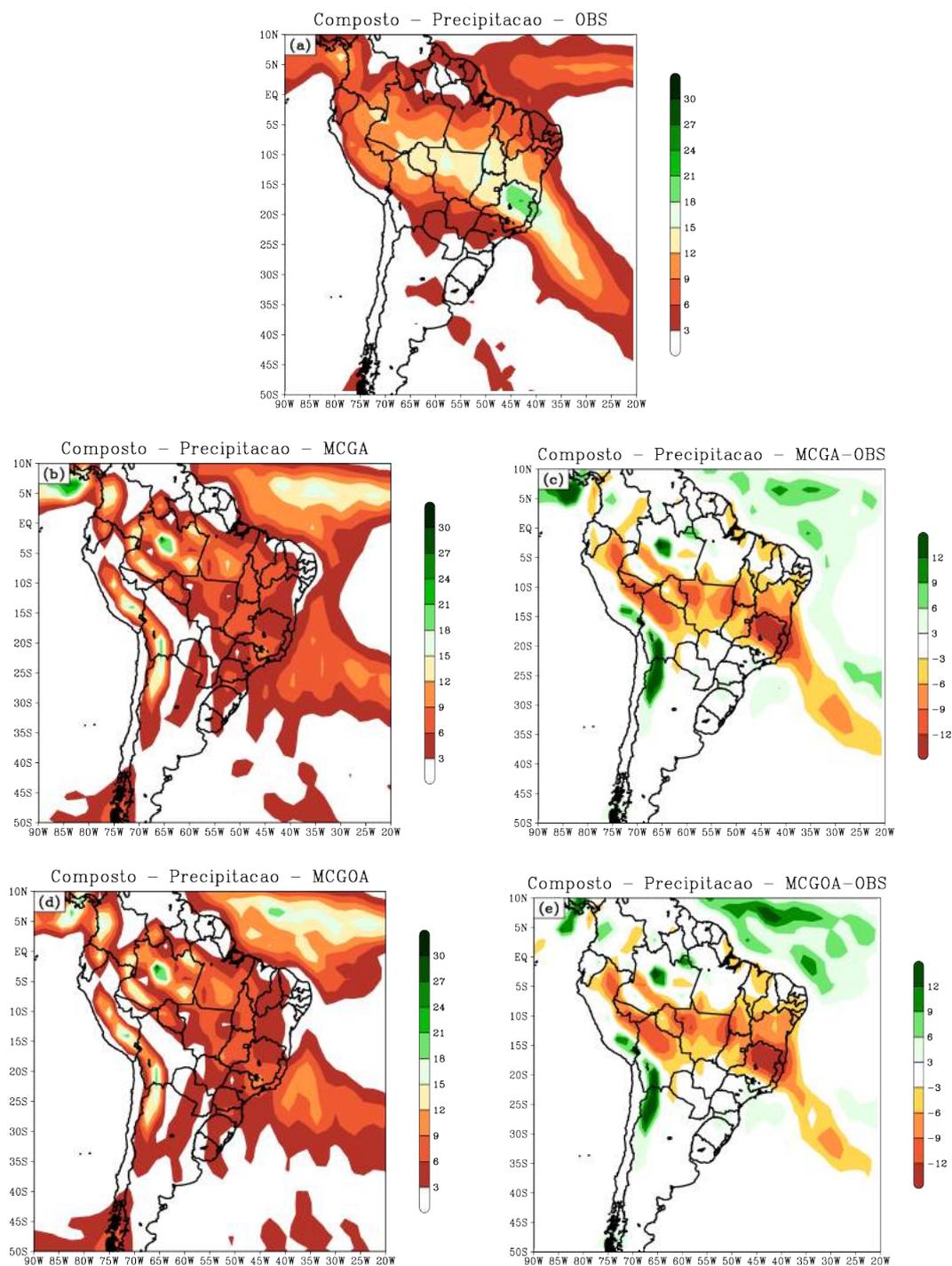


Figura 4.10 - Composições médias da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (b) MCGA, (c) diferença entre MCGA e observação, (d) MCGOA e (e) diferença entre MCGOA e observação. Fonte dos dados observados: GPCP.

4.1.3 Radiação Solar

4.1.3.1 Análise dos Episódios de ZCAS

Através do campo médio de radiação solar incidente à superfície (Figura 4.11a), é possível notar que os mínimos de radiação estão associadas à ZCAS. Esses mínimos nessa região em que o sistema está atuando, ocorre devido ao fato de que a cobertura de nuvens associada à zona de convergência age atenuando a incidência de radiação de onda curta na superfície. Ainda percebe-se que tanto ao norte quanto ao sul da ZCAS, há máximos de radiação de onda curta que associa-se a uma atmosfera estável em ambas as regiões.

Embora que no campo médio de radiação incidente do MCGA (Figura 4.11b), o modelo apresente a zona de convergência com um posicionamento zonal em relação ao campo dos dados observado (Figura 4.11a), além de que a nebulosidade associada à ZCAS não é tão intensa quanto à observação, esse efeito contribui para que ocorra uma incidência maior de radiação de onda curta até a superfície, logo a precipitação associada à zona de convergência fica abaixo dos valores observados.

A ZCAS é notada no campo médio de radiação incidente do MCGOA (Figura 4.11c), através dos mínimos de radiação, onde a zona de convergência assim como no MCGA (Figura 4.11b) se apresenta com uma orientação zonal quando comparado com a observação (Figura 4.11a). Nota-se que ambos os modelos mostram um núcleo com mínimo de radiação mais intenso sobre o sul de Minas Gerais, Vale do Paraíba paulista e sul do Rio de Janeiro indicando que a nebulosidade nessa região estivesse intensa. Portanto, a precipitação mais intensa apresentada pelos modelos nessa região, está associada a este núcleo de mínimo de radiação incidente devido ao efeito da cobertura de nuvens.

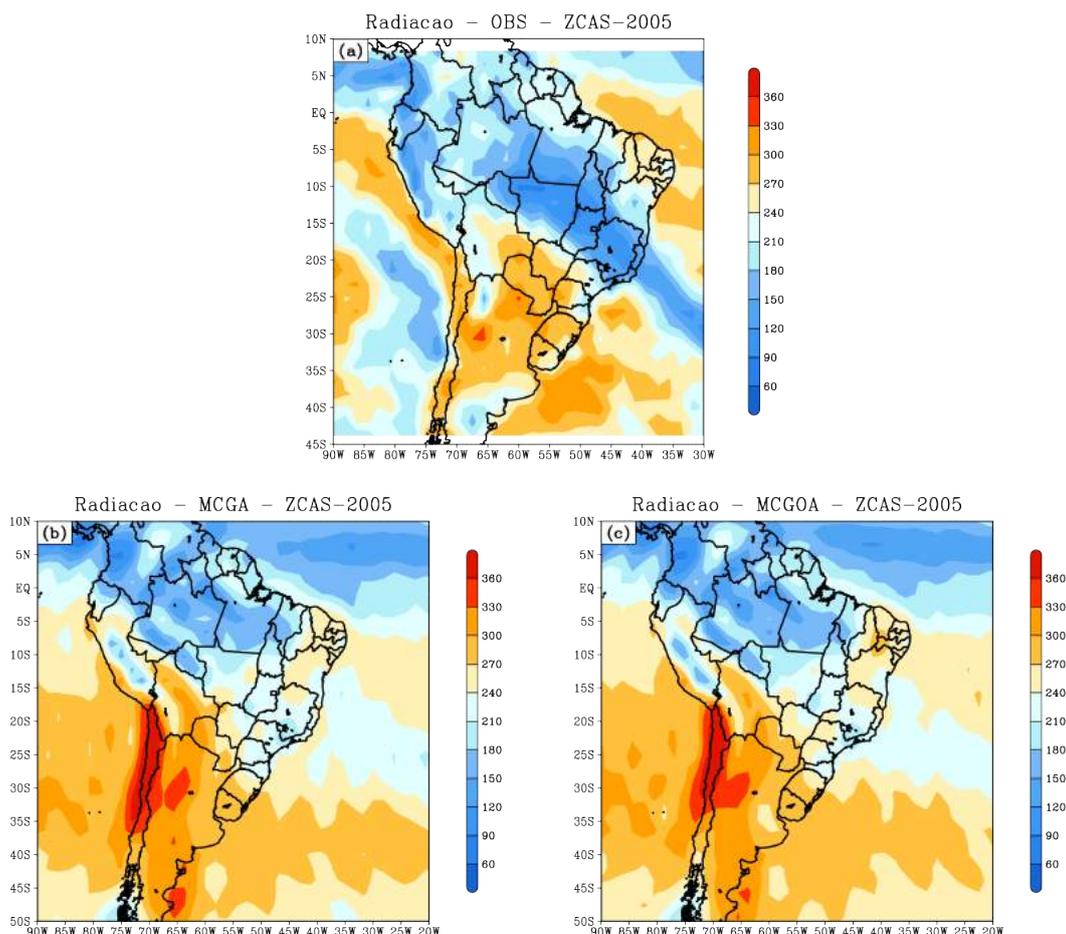


Figura 4.11 - Radiação média incidente ($W.m^{-2}$) entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2005. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.

A partir do campo médio de radiação incidente observada (Figura4.12a), percebe-se que a ZCAS está estabelecida através dos valores mínimos de radiação, uma vez que os mínimos de radiação incidente estão associados a presença de cobertura de nuvens. Os mínimos mais intensos localizam-se sobre o leste de Minas Gerais, Rio de Janeiro e sua costa litorânea. Essas regiões coincidem com a área onde precipitação observada foi mais significativa (Figura4.7a). Por outro lado, nos setores norte e sul da zona de convergência, nota-se a presença de máximos de radiação, havendo um efeito na supressão da convecção, tornando assim a atmosfera estável. Em ambos os setores, o efeito da radiação incidente chegando até à superfície, a divergência de umidade e a subsidência implica na ausência da precipitação nas regiões (norte e sul) da ZCAS.

O MCGA através do campo de radiação incidente (Figura4.12b), mostra a região

com mínimos de radiação não tão intenso quanto ao campo observado (Figura 4.12a), sugerindo que a nebulosidade na região não foi intensa o suficiente para atenuar a incidência da radiação na superfície. Além disso, o padrão espacial é diferente ao apresentado pelos dados observados. Sendo assim, com a nebulosidade associada à ZCAS não estando intensa, a precipitação é menor na região de atuação da zona de convergência.

O campo de radiação solar incidente do MCGOA (Figura 4.12c), apresentou características espaciais semelhantes ao que o MCGA simulou (Figura 4.12b). Além disso, observa-se que os mínimos de radiação sobre a região em que ocorre a atuação da zona de convergência é menos intenso quando comparada com o campo médio observado de radiação (Figura 4.12a). Dessa forma, a nebulosidade torna-se com uma intensidade menor em relação aos dados observados.

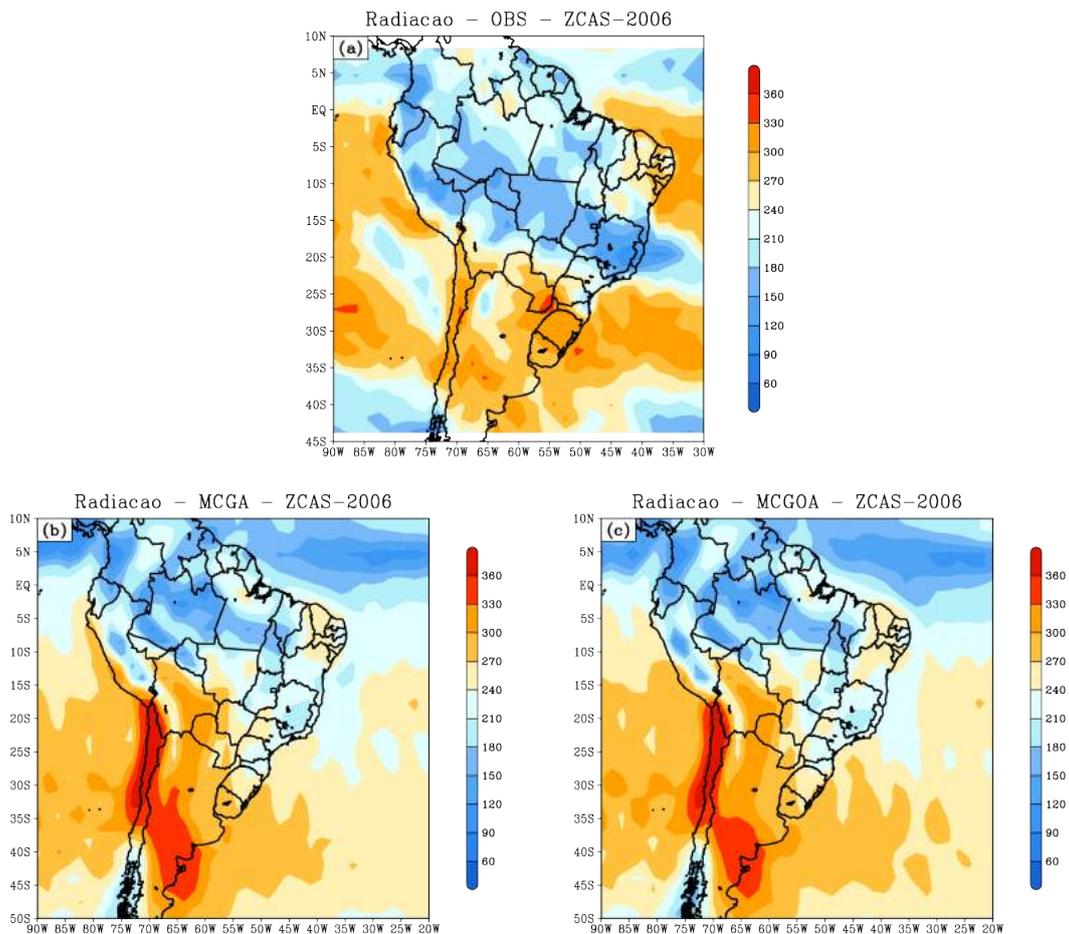


Figura 4.12 - Radiação média incidente ($W.m^{-2}$) entre os dias 07 e 16 de dezembro de 2006. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.

A zona de convergência apresenta-se definida através dos mínimos valores de radiação incidente observada (Figura4.13a), devido a nebulosidade associada a ZCAS, ocorre a inibição da radiação até a superfície. Ainda levando em conta o período de ocorrência deste evento (fevereiro/2007), a zona de convergência teve seu posicionamento mais ao norte (KOUSKY, 1988), portanto, o que se observa no setor sul do sistema, é a supressão da atividade convectiva pelos máximos valores de radiação incidindo sobre a superfície desta região conforme os dados observados de precipitação (Figura4.8a). Além dos máximos de radiação incidente à superfície na porção sul da ZCAS, a divergência de umidade combinada com os movimentos descendentes, propicia um ambiente favorável a ausência de precipitação nesta região.

O MCGA (Figura4.13b) simulou uma área abrangente com nebulosidade em relação ao dados observados (Figura4.13a), porém, a convecção associada à ZCAS restringiu-se a uma área mais a leste do continente (25°S;25°W) região da zona de convergência onde o modelo apresentou a precipitação mais significativa. Entretanto, ao sul da ZCAS, não foi notado os máximos de radiação visto na Figura4.13a. Já a radiação do MCGOA (Figura4.13c), possui um padrão semelhante ao simulado pelo MCGA (Figura4.13b), porém, diferindo com o que foi notado no campo médio de radiação incidente observada (Figura4.13a). Ao contrário do MCGA, que concentrou a convecção associada à ZCAS a leste do continente (25°S;25°W), o MCGOA mostra a nebulosidade relacionada à zona de convergência, tal nebulosidade assim como nos dados observados, se estende de forma contínua do Atlântico Sudoeste até o continente.

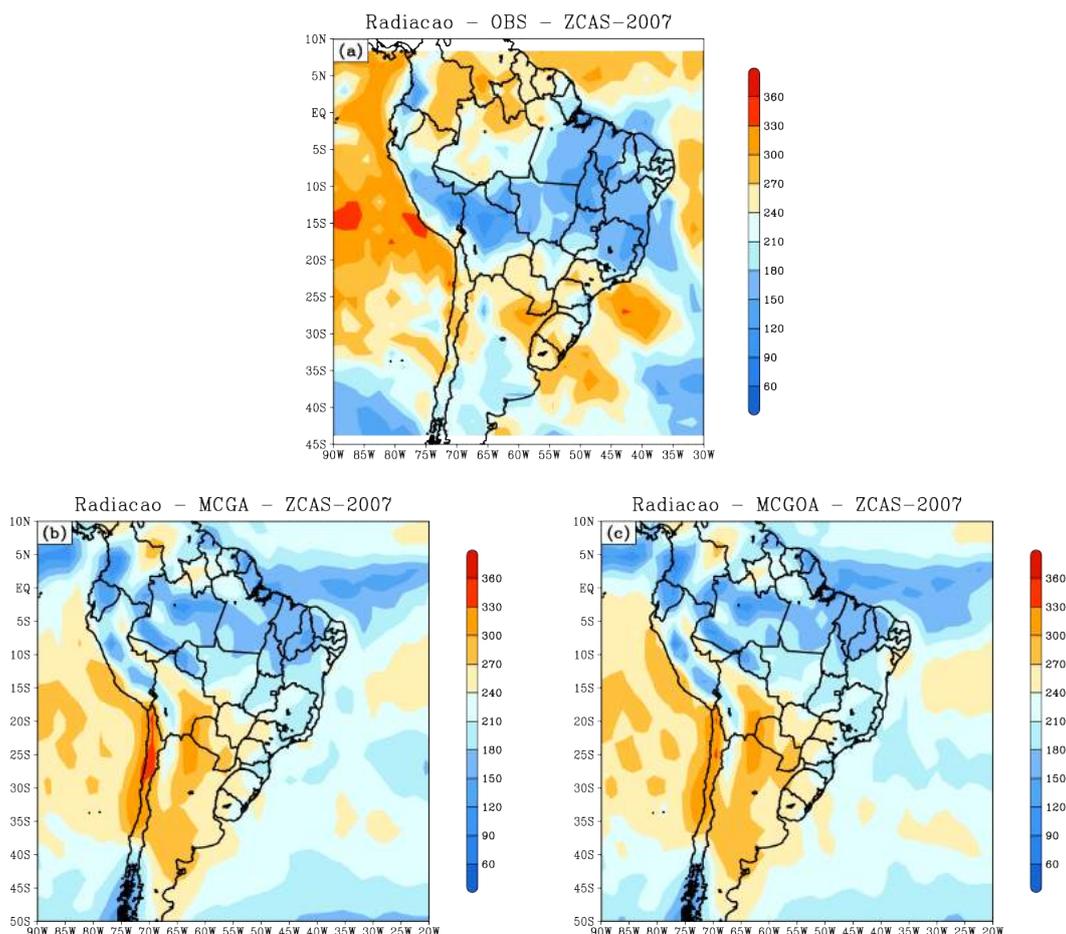


Figura 4.13 - Radiação média incidente ($W.m^{-2}$) entre os dias 12 e 19 de fevereiro de 2007. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.

Assim como o campo médio de precipitação observada (Figura4.9a), onde constatou-se uma banda de precipitação que se estende desde o sul da Bacia Amazônica até o Oceano Atlântico Sudoeste adjacente. A mesma banda com orientação noroeste-sudeste, caracterizando a atuação da ZCAS, pode ser notada no campo médio de radiação incidente observada (Figura4.14a), através dos mínimos valores na região da zona de convergência associados à cobertura de nuvens. Nessa região onde a ZCAS está localizada, os movimentos ascendentes (Figura4.4a) juntamente com o aporte de umidade (Figura4.4b) promoveram as condições favoráveis para a manutenção do sistema. Entretanto, as regiões norte e sul da zona de convergência, apresentaram incidência de radiação, mas sobretudo no setor polar da ZCAS, onde é notado valores máximos de radiação, indicando a ausência de nebulosidade na região, além do aumento da temperatura provocado na superfície. Portanto, além da radiação incidente, a subsidência (Figura4.4a) e a divergência do fluxo de umidade (Figura4.4b)

favoreceram para que ambas as regiões (norte e sul) experimentaram a ausência de precipitação.

De acordo com o MCGA (Figura 4.14b), a região com os mínimos de radiação sobre o oceano, é apresentada com a orientação clássica da ZCAS, porém, mais zonal quando comparada com o padrão espacial do sistema conforme a Figura 4.14a. Ressalta-se que na região da zona de convergência, o MCGA subestimou a radiação incidente, isso significa que a cobertura de nuvens associada à ZCAS não é tão profunda quanto aos dados do campo observado da Figura 4.14a, portanto, a precipitação tende também a ser menos intensa. Além disso, em ambos os setores, ou seja, norte e sul da zona de convergência, o MCGA também subestimou a radiação incidente e nesse caso, os máximos valores de radiação torna-se menos intensos. O MCGOA (Figura 4.14c), possui um padrão espacial semelhante ao que foi notado no MCGA, tanto nas regiões onde a ZCAS está estabelecida quanto nas suas adjacências.

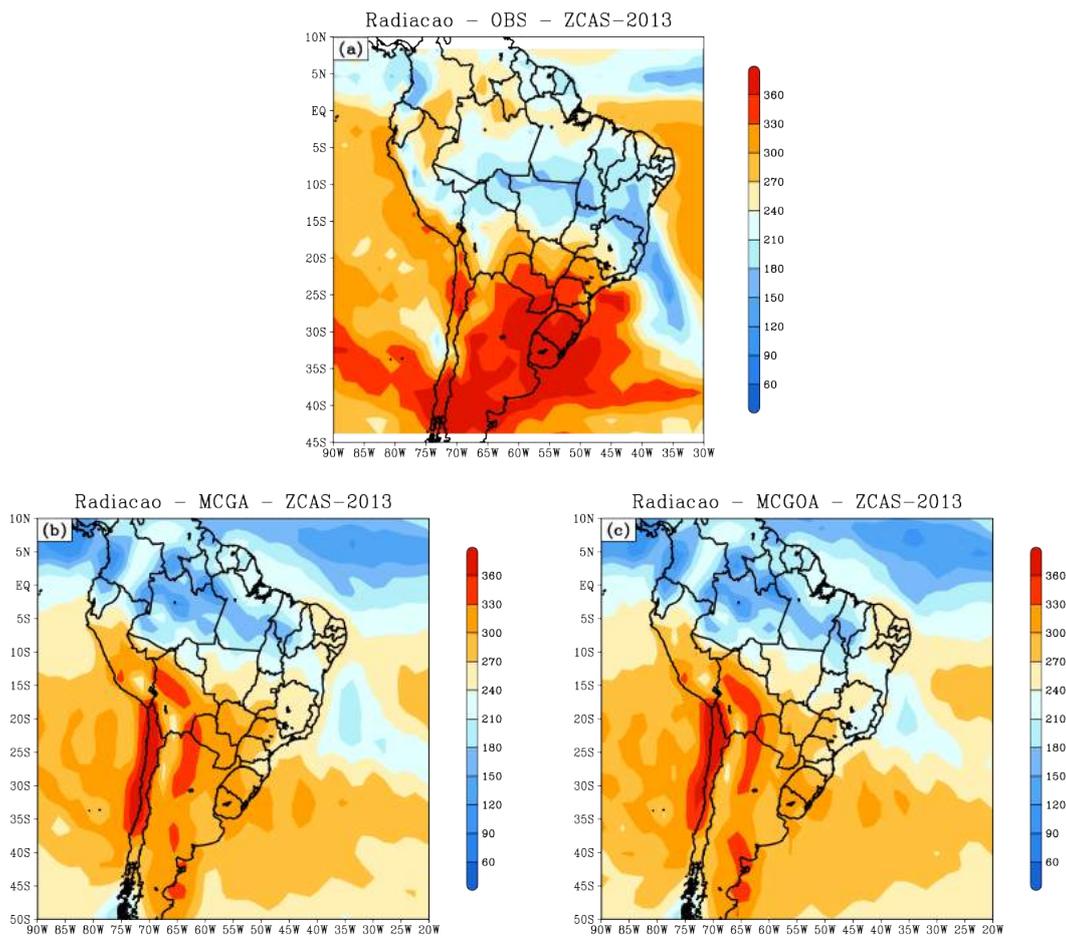


Figura 4.14 - Radiação média incidente ($W.m^{-2}$) entre os dias 14 e 24 de dezembro de 2013. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.

4.1.3.2 Análise dos Campos Compostos de Radiação Solar

Através do campo de composição de radiação solar observada (Figura4.15a), percebe-se que o padrão dominante da ZCAS é apresentado, cuja região caracteriza-se pelos mínimos valores de radiação na orientação noroeste-sudeste. Constata-se ainda valores máximos de radiação incidente nas regiões norte e sul da zona de convergência. Os modelos atmosférico quanto o acoplado (Figura4.15b,c) respectivamente, representam a zona de convergência sobre o oceano com características espaciais semelhantes entre si.

Entretanto, nota-se que devido ao erro sistemático de ambos os modelos, é observado um máximo espúrio de radiação sobre o Chile, bem como a leste dos Andes, e esses máximos não são mostrados na composição dos dados observados de radiação. No Pacífico, é possível perceber nas composições apresentadas pelos modelos, que a radiação é mais intensa do que exibida pela composição observada, portanto, esse fato é possivelmente atribuído ao erro sistemático inerente aos modelos, devido a dificuldade dos modelos atmosféricos em representarem nuvens estratus.

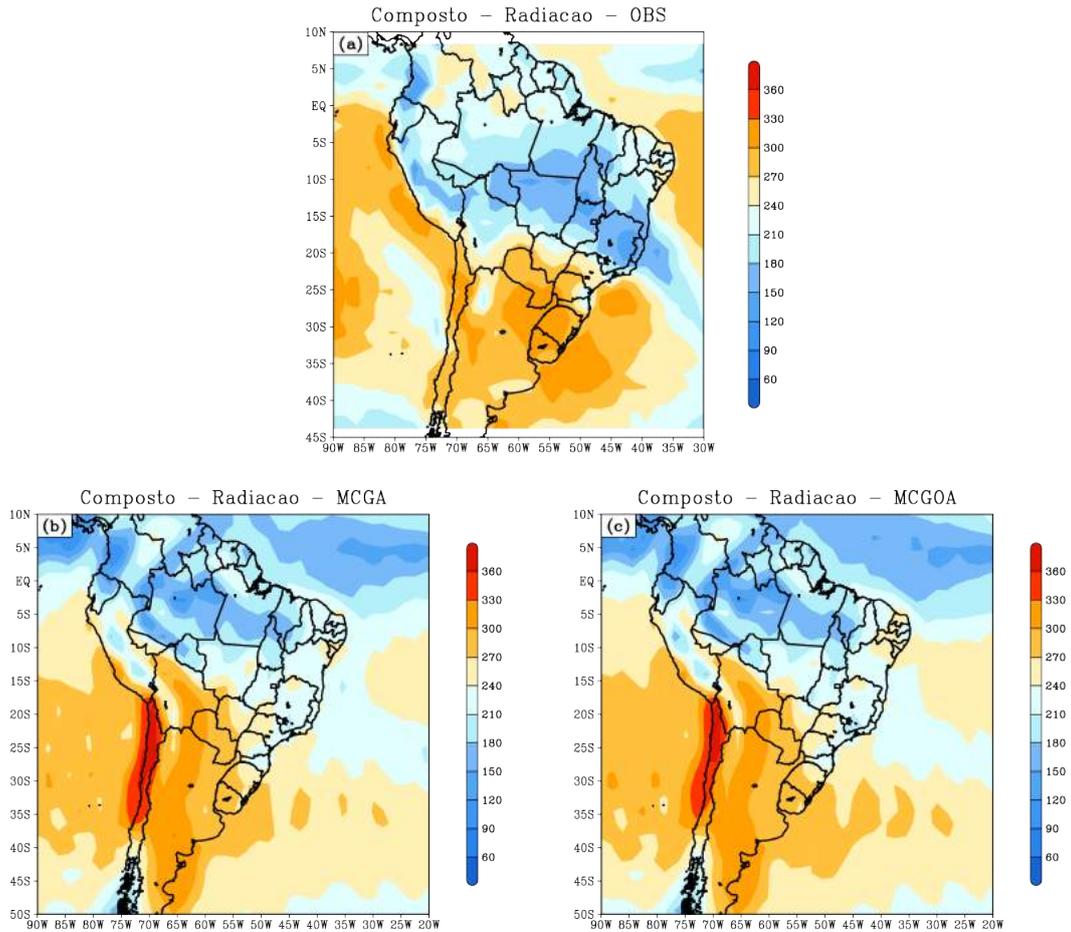


Figura 4.15 - Composições médias da radiação incidente ($W.m^{-2}$) para todos os eventos de ZCAS. (a) observação, (b) MCGA e (c) MCGOA. Fonte dos dados observados: Modelo GL/CPTEC.

4.2 Comportamento da TSM na ZCAS sobre o Oceano

A (Figura 4.16a,b,c,d), descreve o comportamento médio da TSM na região da ZCAS somente sobre o oceano. Nota-se que o MCGOA (linha azul tracejada), apresenta temperatura inicial maior do que o MCGA (linha vermelha tracejada). Justifica-se tal fato pelo motivo de que o *spin up* utilizado neste estudo e que foi gerado pelo modelo oceânico (MOM4p1) tem nas datas de inicialização uma temperatura mais elevada do que quando comparada com a TSM observada que é utilizada no MCGA. Embora mesmo estando mais quente, o MCGOA sente o efeito do acoplamento (oceano-atmosfera) e passa a reproduzir uma TSM com taxa de aquecimento menor, se mostrando sensível ao sombreamento da radiação na região da ZCAS sobre o oceano. O motivo de todos os membros do modelo atmosférico estarem sobrepostos na média e na tendência é devido ao fato de que a mesma TSM observada foi

utilizada em todos os membros dos experimentos.

Constatou-se ainda que através da diferença de temperatura (dT), avaliada pela reta de tendência, o MCGA se mostrou mais quente nos eventos ZCAS-2005, ZCAS-2007 e ZCAS-2013 (Figura4.16a,c,d), mas sobre tudo no evento ZCAS-2013 (Figura4.16d) onde esse aquecimento foi de $1,33^{\circ}\text{C}$. Essa diferença é feita entre as temperaturas do último dia de previsão de cada episódio de ZCAS do primeiro membro e o primeiro dia do evento para cada modelo.

O MCGOA no evento ZCAS-2005 (Figura4.16a), chegou a apresentar uma diferença de temperatura negativa (resfriamento) de $-0,035^{\circ}\text{C}$, enquanto que o MCGA apresentou um aquecimento de $0,37^{\circ}\text{C}$. Em relação a diferença entre os modelos, o MCGA se tornou mais quente $0,4^{\circ}\text{C}$ do que o MCGOA. Já no evento ZCAS-2013 (Figura4.16d), onde se registrou a menor diferença entre os modelos com um valor de $0,31^{\circ}\text{C}$, nesse evento o MCGA e o MCGOA registraram um aquecimento de $1,15^{\circ}\text{C}$ e $0,84^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Durante o evento ZCAS-2006 (Figura4.16b), o MCGOA apresentou um aquecimento de $0,92^{\circ}\text{C}$ que é inferior relativo ao aquecimento de $1,36^{\circ}\text{C}$ apresentado pelo MCGA. Com relação a diferença de temperatura entre os modelos, observa-se que o MCGA se tornou mais quente $0,44^{\circ}\text{C}$ em relação ao MCGOA.

A diferença entre o dT dos modelos atmosférico e acoplado é positiva (entre $0,52^{\circ}\text{C}$ a $0,71^{\circ}\text{C}$ mais frio no acoplado) nos eventos ZCAS-2007 e ZCAS-2013 respectivamente, enquanto que no evento ZCAS-2005 o acoplado foi $0,20^{\circ}\text{C}$ mais frio e até mais quente ($\approx 0,17^{\circ}\text{C}$) no evento ZCAS-2006. O menor resfriamento do modelo acoplado (em relação ao atmosférico solo) nesses últimos dois eventos (ZCAS-2005 e ZCAS-2006), se justifica pela menor precipitação (em geral inferior a 9 mm.dia^{-1} (Figura4.6 e Figura4.7), enquanto que nos outros dois eventos (ZCAS-2007 e ZCAS-2013) foi superior a 12 mm.dia^{-1} conforme a Figura4.8 e Figura4.9, o que produz um menor sobreamento pelas nuvens convectivas e assim maior saldo radiativo absorvido pela superfície, e conseqüente menor resfriamento do oceano.

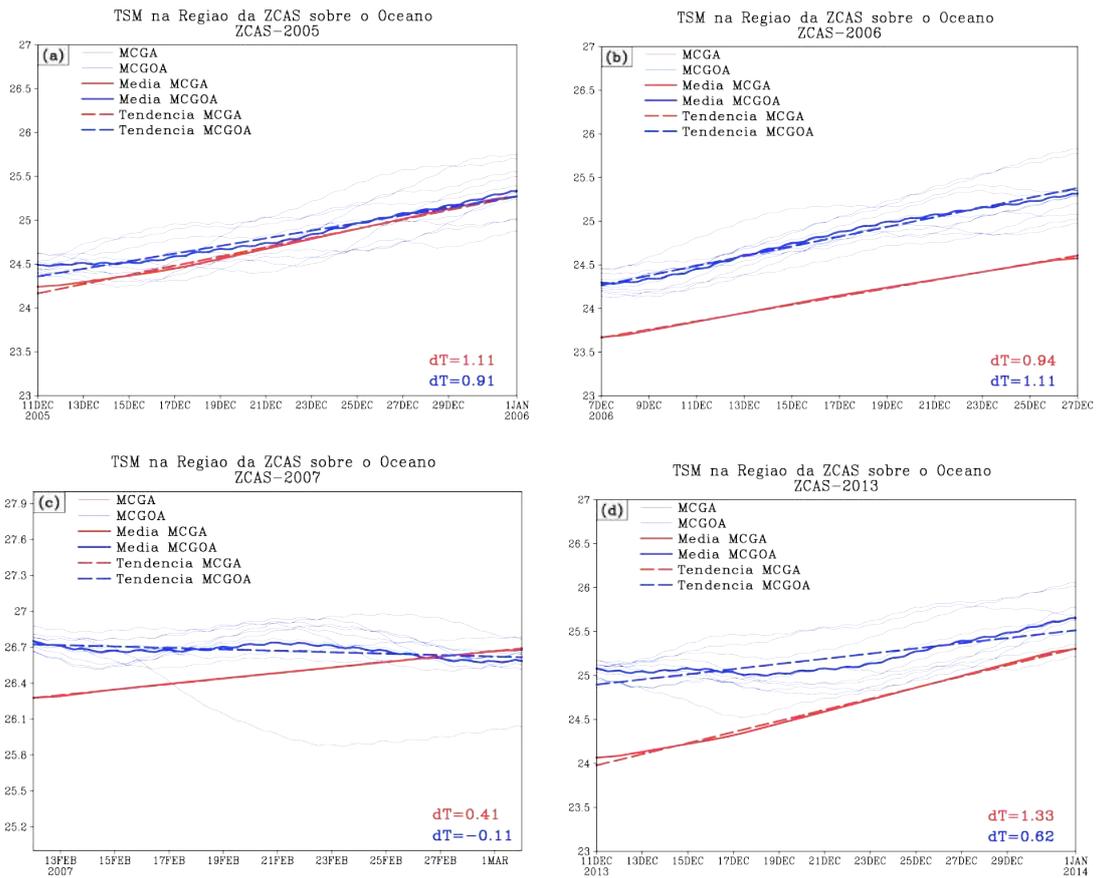


Figura 4.16 - Série temporal das previsões de TSM na região sobre o oceano para o período a) 11 a 18 de dezembro de 2005, b) 07 a 18 de dezembro de 2006, c) 12 a 21 de fevereiro de 2007 e d) 11 a 28 de dezembro de 2013 para um domínio de $50^{\circ}W;30^{\circ}W$ e $30^{\circ}S;20^{\circ}S$. As linhas vermelhas (azuis) finas representam os membros do MCGA (MCGOA), a linha vermelha (azul) grossa o conjunto médio do MCGA (MCGOA) e a linha tracejada vermelha (azul) a tendência do MCGA (MCGOA), para o prazo de previsão de 10 dias.

4.3 Avaliação Objetiva da Precipitação

A avaliação objetiva consiste em confrontar os dados observados e simulados pelos modelos através de métricas estatística, nesse caso o BIAS e o RMSE. De acordo a Tabela 4.1, dos 4 casos estudados, em 1 o MCGOA subestima mais a precipitação em relação ao MCGA como visto nos valores dos BIAS de ambos os modelos.

No evento ZCAS-2007, nota-se que os modelos mostraram uma superestimativa da precipitação, porém, o MCGOA quando comparado ao MCGA, apresentou uma superestimativa ainda maior. Ressalta-se que no evento ZCAS-2013, o MCGOA subestima a precipitação em $0,41 \text{ mm.dia}^{-1}$ em relação ao MCGA, sendo este o maior valor de subestimativa entre os casos estudados. O RMSE é utilizado para avaliar a capacidade de um determinado modelo em realizar previsão, ou seja, quanto mais próximo do zero, melhor será a previsão feita pelo modelo. Do contrário, quanto mais distante o valor for de zero, menos precisa será a previsão. Ao contrário do BIAS, na análise do RMSE o MCGOA obteve melhores resultados em 3 casos analisados, exceto o evento ZCAS-2007.

Tabela 4.1 - Valores do BIAS e RMSE do ensemble médio da precipitação (mm.dia^{-1}). Para a área $50^{\circ}\text{W};30^{\circ}\text{W}$ e $30^{\circ}\text{S};20^{\circ}\text{S}$.

Índices	BIAS		RMSE	
	MCGA	MCGOA	MCGA	MCGOA
ZCAS-2005	-3,31	-3,01	7,71	6,66
ZCAS-2006	-0,25	-0,05	4,56	4,24
ZCAS-2007	1,70	2,83	4,92	5,18
ZCAS-2013	-4,52	-4,93	11,48	10,33

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi investigado, sob o ponto de vista de modelagem numérica a capacidade dos modelos atmosférico e acoplado oceano-atmosfera (MCGA e BESM-OA2.3) respectivamente em representar características que se assemelham a eventos de ZCAS criteriosamente selecionados. Para isso foi investigada a dinâmica e a termodinâmica sobre o Atlântico tropical mais precisamente na região da ZCAS e adjacências. O principal resultado deste estudo é de que através das análises do comportamento da evolução da TSM, o MCGOA sofre o efeito do acoplamento (oceano-atmosfera) passando a representar um resfriamento na região da ZCAS, portanto, se mostrando sensível ao sombreamento da radiação solar na região em que houve registro de precipitação sobre o oceano. Tal resfriamento é uma consequência da radiação incidente, que modula a temperatura na superfície levando em consideração a presença das nuvens, fato comprovado por [Chaves e Nobre \(2004\)](#), [Almeida et al. \(2007\)](#), [Nobre et al. \(2012\)](#).

Por outro lado, o MCGA mostra um aquecimento mais acentuado nesses casos. A base dinâmica e termodinâmica nos eventos de ZCAS estudados, provém das análises dos campos observados/simulados de omega, divergência do fluxo de umidade integrada verticalmente entre 1000 e 700 hPa, precipitação e radiação solar incidente. Através destes campos observaram-se características comuns a zona de convergência como a sua posição e orientação. Em geral o modelo acoplado consegue reproduzir o padrão da banda de precipitação com o alinhamento (noroeste-sudeste) semelhante ao que foi visto nas observações associando-se à ZCAS. O MCGOA se mostrou na maioria dos casos com uma capacidade melhor, relativo ao MCGA na previsão de ZCAS conforme os resultados do RMSE da precipitação do ensemble médio da Tabela 4.1. No caso do BIAS, embora o MCGOA subestimou a precipitação, mas apresentou melhores resultados ao simular os casos ZCAS-2005 e ZCAS-2006, o MCGA obteve melhores resultados nas simulações do caso ZCAS-2007, onde ambos os modelos superestimaram a precipitação e no evento ZCAS-2013, onde a precipitação foi subestimada pelos modelos. Os campos compostos torna evidente o padrão dominante dos casos estudados que caracteriza a ZCAS. Mesmo que os modelos, sobretudo o MCGOA, representem a banda de precipitação na sua orientação clássica (noroeste-sudeste), é sobre o oceano que as características mais se assemelham à precipitação observada na região da ZCAS, comportamento sugerido por [Sanchez \(2002\)](#).

Um fato apontado por [Taschetto e Wainer \(2008a\)](#), [Taschetto e Wainer \(2008b\)](#), é de

que a ZCAS é mais sensível as mudanças nas condições iniciais do modelo, tornando-se menos previsível do que a ZCIT. Ainda os autores sugerem que a previsibilidade da precipitação sobre a região da ZCAS é maior na parte oceânica do que na continental, que por sua vez é essencialmente orientada pelas variações internas da atmosfera. Sendo assim, [Cavalcanti e Silva \(2003\)](#) constatou que o Sudeste do Brasil através do MCGA, não apresenta uma boa previsibilidade por se tratar de uma região de transição entre o Nordeste brasileiro que possui uma alta previsibilidade e o Sul do Brasil que tem média previsibilidade. Uma consequência prática deste estudo é que o uso de um modelo acoplado é indispensável para a previsão da ZCAS. Evidentemente que faz-se necessário ajustes nas parametrizações e no acoplamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. F.; HUFFMAN, G. J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P. P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P.; NELKIN, E. The version-2 global precipitation climatology project (gpcp) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, p. 1147–1167, 2003. 15
- ALMEIDA, R. A. F. D.; NOBRE, P.; HAARSMA, E.; CAMPOS, E. Negative ocean-atmosphere feedback in the south atlantic convergence zone. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. L18809, doi:10.1029/2007GL030401, 2007. 13, 57
- AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. An objective criterion for determining the south atlantic convergence zone. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, p. 1–9, 2015. 5, 18
- ANDRADE, L. S. **Variabilidade decadal da Zona de Convergência Intertropical e sua influência na pluviosidade da região Norte do Brasil**. 73 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, 2007. 6
- ARAUJO, E. M.; OLIVEIRA, J. B.; SILVA, I. N.; CAVALCANTE, E. G.; ALMEIDA, B. M. Tendência de mudanças na temperatura em iguatu, ceará. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Campinas, SP, Brasil: SBA, 2009. CD-ROM. 19
- ARRAUT, J. M. **Frentes e frontogêneses no verão: aspectos geométricos, dinâmicos e impacto sobre as chuvas nos subtrópicos da América do Sul**. 175 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007. 20
- BARREIRO, M.; CHANG, P.; SARAVANAN, R. Variability of the south america convergence zone simulated by and atmospheric general circulation model. **Journal of Climate**, v. 15, p. 745–763, 2002. 6, 8, 9, 11
- _____. Simulated precipitation response to sst forcing and potential predictability in the region of the south atlantic convergence zone. **Climate Dynamic**, v. 24, p. 105–114, 2005. 11

BARROS, V.; GONZALES, M.; LIEBMANN, B.; CAMILLONI, I. Influence of the south atlantic convergence zone and south atlantic sea surface temperature on interannual summer rainfall variability southeastern south america. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, p. 123–133, 2000. 8

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern south america and large-scale convective patterns in south atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2377–2395, 2002. 5

_____. The south atlantic convergence zone: intensity, form, persistence and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004. 6, 10

CARVALHO, M. A. V. **Variabilidade da Largura e Intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos Observacionais e Modelagem**. 107 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011. 15

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J. P.; MANZI, A. O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L. P.; ALMEIDA, C. D.; SAMPAIO, G.; CASTRO, C. C.; SANCHES, M. B.; CAMARGO, H. Global climatological features in a simulation using the cptec-cola agcm. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2965–2988, 2002. 11, 16, 33, 44

CAVALCANTI, I. F. A.; SILVA, L. H. R. C. Seasonal variability over southeast brazil related to frontal systems behavior in a climate simulations with the agcm cptec/cola. In: XIV SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGE AND CLIMATE VARIATIONS, 14., 2003, Long Beach, CA, USA. [S.l.]: AMS, 2003. 58

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. O modelo gl/cptec de radiação solar por satélite: Potencial de informações para agrometeorologia. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracajú, SE, Brasil. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Campinas, SP, Brasil: SBA, 2007. CD-ROM. 15

CERNE, S. B.; VERA, C. S.; LIEBMANN, B. The nature of a heat wave in eastern argentina occurring during salljex. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1165–1174, 2007. 7, 9

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the south atlantic ocean an the south atlantic convergence zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. L03204, doi:10.1029/2003GL018647, 2004. 12, 57

CHOU, M. D.; SUAREZ, M. J. **A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies**. Columbia – Washington DC – United States, 1999. 40p. Relatório técnico. [16](#)

CORREIA, F. R. S. **Zonas de Convergência Subtropicais na América do Sul: Características da Circulação e Fluxo de Umidade**. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013. [18](#)

CUNNINGHAM, C. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Intraseasonal modes of variability affecting the south atlantic convergence zone. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1165–1180, 2006. [9](#)

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical south america and related sea surface temperature anomalies in the south atlantic. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3395–3410, 2002. [7, 8](#)

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; DIAS, M. A. F. S. Composição da zona de convergência do atlântico sul em períodos de el niño e la niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, p. 98–98, 2004. [5, 10](#)

FIGUEROA, S. N. **Estudo dos sistemas de circulação de verão sobre a América do Sul e suas simulações com modelos numéricos**. 181 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997. [5](#)

FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; DIAS, P. L. S. Simulations of the summer circulation over the south american region with an eta coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 1573–1584, 1995. [5, 8, 10](#)

GANDU, A. W.; DIAS, P. L. S. Impact of tropical heat sources on the south american tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 6001–6015, 1998. [10, 23, 24, 26, 28, 31, 33](#)

GIAROLLA, E.; SIQUEIRA, L. S. P.; BOTTINO, M. J.; MALAGUTTI, M.; CAPISTRANO, V. B.; NOBRE, P. Equatorial atlantic ocean dynamics in a coupled ocean-atmosphere model simulation. **Ocean Dynamics**, v. 65, p. DOI-10.1007/s10236-015-0836-8, 2015. [16, 17, 21](#)

- GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, p. doi:10.1029/2002GL015311, 2002. 16
- GRIFFIES, S. M. **Elements of MOM4p1**. Princeton – New Jersey – United States, 2009. 444p. Relatório técnico. Disponível em: <www.gfdl.noaa.gov>. 16
- GRIMM, A. M.; DIAS, P. L. S. Analysis of tropical-extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 3538–3555, 1995. 9
- HALLAK, R.; FILHO, J. A. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 591–608, 2011. 21, 22
- HARSHVARDHAN, R.; RANDALL, D. A.; CORSETTI, T. G. A fast radiation parameterization for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 1009–1016, 1987. 16
- HERDIES, D. L.; SILVA, A. D.; DIAS, M. A. F. S.; FERREIRA, R. N. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D20, p. 42–1–42–10, 2002. 6, 7
- HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T. **Version 1.2 GPCP One-Degree Daily Precipitation Data Set Documentation**. Greenbelt – Maryland – Estados Unidos, 2012. 27p. Relatório técnico. 15
- HUFFMAN, G. J.; MORRISSEY, M.; BOLVIN, D. T.; CURTIS, S.; JOYCE, R.; MCGAVOCK, B.; SUSSKIND, J. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 2, p. 36–50, 2001. 15
- JORGETTI, T. **A Zona de Convergência do Atlântico Sul e os processos oceânicos do Atlântico e do Pacífico**. 169 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008. 5, 9, 11
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.;

- JOSEPH, D. The ncep/ncar 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437–471, 1996. 20
- KODAMA, Y. Large-scale features of subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz) part i: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, p. 813–835, 1992. 5, 6, 18
- _____. Large-scale features os subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz) part ii: conditions of circulations for generating the stczs. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 71, p. 581–610, 1993. 6, 10
- KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the south american sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, p. 217–231, 1988. 40, 49
- KUBOTA, P. Y. **Variabilidade de energia armazenada na superfície e seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul**. 285 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. 16
- LARGE, W.; YEAGER, S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. **Climate Dynamics**, v. 33, p. 341–364, 2009. 21
- LENTERS, J. D.; COOK, K. H. Simulation and diagnosis of the regional summertime precipitation climatology of south america. **Journal of Climate**, v. 8, p. 2298–3005, 1995. 10
- LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submonthly convective variability over south america and south atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1877–1891, 1999. 5, 9
- LIMA, J. P. R.; ALVES, J. M. B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio são francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 323–338, 2009. 22
- MACIEL, A. P. R. **Avaliação do novo modelo global do CPTEC/INPE na previsão numérica de tempo de fenômenos tropicais**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009. 16

- MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Observations of the 40-50 day tropical oscillation: a review. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 814–837, 1994. 9
- MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the amazon basin. **International Journal of Climatology**, v. 12, p. 853–863, 1992. 7
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; NICOLINI, M.; C., S. Climatology of low-level jet east of the andes as derived from the ncep-ncar reanalysis. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2261–2280, 2004. 19
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851–875, 1982. 16
- MENDOÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Avaliação objetiva do sistema de previsão de tempo global por ensemble do cptec e relação entre o espalhamento e o desempenho do ensemble médio. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza, CE, Brasil. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 2004. CD-ROM. 2, 19
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL. CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011**. Brasília, 2012. 80 p. 1
- NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION, NATIONAL WEATHER SERVICE, NOAA, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. **NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, April 1997 through June 2007**. Boulder CO: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5065/D6FB50XD>>. 20
- NEWELL, R. E.; NEWELL, N. E.; ZHU, Y.; SCOTT, C. Tropospheric rivers? a pilot study. **Geophysical Research Letters**, v. 12, p. 2401–2404, 1992. 7
- NINOMIYA, K. Similarity and difference between the south atlantic convergence zone and the baiu frontal zone simulated by an agcm. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85, p. 277–299, 2007. 5
- NOBRE, P.; ALMEIDA, R. A. D.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E. Coupled ocean-atmosphere variations over the south atlantic ocean. **Journal of Climate**, v. 25, p. 6349–6358, 2012. 8, 12, 16, 17, 21, 57

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; CHAVES, R. R.; SANCHES, M. B. Modulações da zcas pelas temperaturas da superfície do mar no atlântico sudoeste. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 2002. p. 3520–3527. CD-ROM. 12, 23, 24, 28, 31, 33

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. D.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA, M.; IRBER, L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716–6732, 2013. 12

NOGUÉS-PEAGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over south america during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 279–291, 1997. 5, 9

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 89 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1994. 5, 8, 18

QUADRO, M. F. L.; DIAS, M. A. F. S.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da zcas através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 152–162, 2012. 20

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. N.; STOKES, D. C.; WANG, W. An improved in situ and satellite sst analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1609–1625, 2002. 20

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M.; LIU, C.; CHELTON, D. B.; CASEY, K. S.; SCHLAX, M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 20, p. 5473–5496, 2007. 20

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and interdecadal variability of the south atlantic convergence. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2947–3957, 2000. 8, 13

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H. L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y. T.; CHUANG, H. Y.;

JUANG, H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; DELST, P. V.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; DOOL, H. V. D.; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J. K.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C. Z.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R. W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. The ncep climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, p. 1015–1057, 2010. 15

SAHA, S.; MOORTHI, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.-T.; CHUANG, H.-Y.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; PENA, M.; DOOL, H. V. D.; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. The ncep climate forecast system version 2. **Journal of Climate**, v. 27, p. 2185–2208, 2014. 15

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. **Revista USP**, v. 103, p. 41–54, 2014. 1

SANCHES, M. B. **Análise Sinótica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) Utilizando-se a Técnica de Composição**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002. 18, 57

SANCHES, M. B.; DIAS, M. A. F. S. Análise sinótica de verão: A influência da zona de convergência do atlântico sul (zcas). In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1996, Campos do Jordão, SP, Brasil. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 1996. CD-ROM. 18

SANTOS, A. F. **Padrões sinóticos de circulação atmosférica associados ao jato em baixos níveis a leste da Cordilheira dos Andes na América do Sul**. 252 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. 18

SATYAMURTY, P.; COSTA, C. Transporte de umidade na amazônia e adjacências em 2005 e 2009. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2010, Belém, PA, Brasil. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 2010. CD-ROM. 20

SATYAMURTY, P.; COSTA, C.; SANTOS, C. A. C.; MANZI, A. O. Convergência do fluxo de umidade sobre a região amazônica nos anos contrastantes 2005 e 2009.

In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2010, Belém, PA, Brasil. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 2010. CD-ROM. 20

SATYAMURTY, P.; RAO, V. B. Zona de convergência do atlântico sul. **Climanálise**, v. 3, p. 31–35, 1988. 18

SCOTTÁ, F. C. **Análise da Influência dos Elementos do Clima na Vegetação Campestre da Depressão Central, Bioma Pampa, Utilizando Dados de Campo e de Sensoriamento Remoto Orbital**. 88 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013. 19

SOARES, W. R.; MARENGO, J. A. Assessments of moisture fluxes east of the andes in south america in a global warming scenario. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1395–1414, 2008. 20

TARASOVA, T. A.; BARBOSA, H. M. J.; FIGUEROA, S. N. **Incorporation of New Solar Radiation Scheme into CPTEC GCM**. São José dos Campos – São Paulo – Brasil, 2006. 98p. Relatório técnico. 16

TASCHETTO, A. S.; WAINER, I. The impact of the subtropical south atlantic sst on south american precipitation. **Annales Geophysicae**, v. 26, p. 3457–3476, 2008. 1, 57

_____. Reproducibility of south american precipitation due to subtropical south atlantic ssts. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2835–2851, 2008. 57

TEIXEIRA, F. V. B.; TANAJURA, C. A. S.; TOLEDO, E. M. An investigation of the sacz with extended simulations of the atmospheric model rams. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, p. 83–91, 2002. 11

TIEDTKE, M. The sensitivity of the time mean large-scale flow to cumulus convection in the ecmwf model. In: WORKSHOP ON CONVECTION IN LARGE-SCALE NUMERICAL MODELS, 12., 1984, Reading, United Kingdom. [S.l.]: ECMWF, 1984. p. 297–316. 16

TOMAZIELLO, A. C. N. **Influências da temperatura da superfície do mar e da umidade do solo na precipitação associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010. 11

VEIGA, J. A. P.; RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H. Heat and moisture budgets of the walker circulation and associated rainfall anomalies during el niño events.

International Journal of Climatology, v. 25, p. 193–213, 2005. 20

XUE, Y.; SELLERS, P. J.; KINTER, J. L.; SHUKLA, J. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal of Climate**, v. 4, p. 345–364, 1991. 16

ZOMEREN, J.; DELDEN, A. Vertically integrated moisture flux convergence as a predictor thunderstorms. **Atmospheric Research**, v. 83, p. 435–445, 2007. 19