



## RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DO MODELO BAM-HÍBRIDO

**Paulo Y. Kubota, José P. Bonatti, Enver Ramirez, Julio Pablo Fernandez,  
Silvio N. Figueroa, Dayana C. Souza**

### 1 Introdução

O novo núcleo dinâmico do modelo BAM incorpora os esquemas Euleriano e Semi-Lagrangiano (Figueroa, 2016). Para o transporte tridimensional de variáveis prognósticas (água líquida, gelo, umidade específica, ozônio, CO<sub>2</sub>, metano, traçadores, etc.) é utilizado o esquema de advecção Semi-Lagrangiano. As parametrizações físicas utilizadas pelo modelo BAM são equivalentes às utilizadas em outros modelo de previsão de tempo e clima de outros centros operacionais. Entretanto, para melhorar o modelo BAM para a região tropical e a América do Sul foi necessário investir no desenvolvimento de um novo núcleo dinâmico e das parametrizações físicas.

Uma deficiência do modelo BAM era o uso da coordenada vertical sigma na formulação das equações governantes da atmosfera. Portanto, nos últimos anos foi desenvolvido um núcleo dinâmico em coordenada híbrida (sigma-pressão), esta nova coordenada introduziu mudanças significativas nos métodos Euleriano e Semi-Lagrangiano utilizada no modelo BAM. Nas seções abaixo serão mostradas o ganho na qualidade da previsão (Skill) entre os modelos BAM que utiliza a coordenada vertical sigma e híbrida.

#### 1.1 Informações Gerais:

As configurações do modelo BAM em coordenada híbrida foram ajustadas para serem similares à configuração utilizada na suíte operacional do INPE para o modelo BAM em coordenada sigma. Estas configurações estão resumidas nas Tabelas 1.1 e 1.2. Entretanto, devido a limitação de armazenamento no XC50 e a concorrência por tempo de máquina com outros modelos operacionais e de grupos de pesquisa, foi decidido fazer um período curto de avaliação (de alguns meses) e da mesma forma o pós processamento foi executado com um número menor de níveis verticais (18 níveis verticais). As comparações serão feitas com o modelo BAM tempo operacional, desta forma mais um tempo de máquina foi salvo.

**Tabela 1.1 - Características e Especificações:**

	Híbrido-XC50	Sigma-XC50
1. Computador/cluster (XE, XC, etc)		
2. Versão no SVN	<a href="https://svn.cptec.inpe.br/bam/branch/BAM_V2.2.1">https://svn.cptec.inpe.br/bam/branch/BAM_V2.2.1</a>	<a href="https://svn.cptec.inpe.br/bam/branch/BAM_V1.2.3">https://svn.cptec.inpe.br/bam/branch/BAM_V1.2.3</a>
3. Resolução Horizontal	TQ0666L064 (~20km)	TQ0666L064 (~20km)
4. Coordenada Vertical	64 camadas híbrida (sigma-pressão)	64 camadas sigma (sigma)
5. Domínio	Global Lon:0-360; lat:90S-90N	Global Lon:0-360; lat:90S-90N
6. Passo de Tempo (s)	220seg	220seg
7. No. de Pontos de Grade	2000*1000=2.000.000	2000*1000=2.000.000
8. Tipo de Grade Horizontal	Número de ondas (espaço espectral) Grid-A (Espaço físico)	Número de ondas (espaço espectral) Grid-A (Espaço físico)
9. Fonte das Condições Iniciais	gdas-FV3-NCEP	gdas-FV3-NCEP
10. Fonte das Condições de Contorno	TSM-NOAA/NCEP	TSM-NOAA/NCEP
11. Topo do Modelo	0.197hPa	0.197hPa
12. Prazo da Previsão	11 dias	11 dias
13. Projeção do Mapa	Latlon(gaussiana)	Latlon(gaussiana)
14. Compilador	Cray Fortran : Version 8.6.5	Cray Fortran : Version 8.6.5
15. Versão Pré-Processamento	PRE_V2.2.1	PRE_V1.3.1
16. Versão Pós-Processamento	POS_V2.2.1	PRE_V1.3.1
17. Formato dos Outputs	Binário, Grib	Binário, Grib
18. Variáveis Básicas de Output	PSLC 0 SURFACE PRESSURE (HPA ) UVEL 18 ZONAL WIND (U) (M/S ) VVEL 18 MERIDIONAL WIND (V) (M/S ) OMEG 18 OMEGA (PA/S ) ZGEO 18 GEOPOTENTIAL HEIGHT (GPM ) PSNM 0 SEA LEVEL PRESSURE (HPA ) TEMP 18 ABSOLUTE TEMPERATURE (K ) UMES 18 SPECIFIC HUMIDITY (KG/KG ) AGPL 0 INST. PRECIPITABLE WATER (KG/M2 ) TSFC 0 SURFACE TEMPERATURE (K ) TP2M 0 TEMPERATURE AT 2-M FROM SURFACE(K ) Q02M 0 SPECIFIC HUMIDITY AT 2-M FROM (KG/KG ) U10M 0 10 METRE U-WIND COMPONENT (M/S ) V10M 0 10 METRE V-WIND COMPONENT (M/S ) PREC 0 TOTAL PRECIPITATION (KG/M2/DAY ) PRCV 0 CONVECTIVE PRECIPITATION (KG/M2/DAY ) CSSF 0 SENSIBLE HEAT FLUX FROM SURFACE(W/M2 ) CLSF 0 LATENT HEAT FLUX FROM SURFACE (W/M2 ) OLIS 0 DOWNWARD LONG WAVE AT BOTTOM (W/M2 ) OLES 0 UPWARD LONG WAVE AT BOTTOM (W/M2 ) ROLE 0 OUTGOING LONG WAVE AT TOP (W/M2 ) OCIS 0 DOWNWARD SHORT WAVE AT GROUND (W/M2 )	

	OCES 0 UPWARD SHORT WAVE AT GROUND (W/M2 ) ROCE 0 UPWARD SHORT WAVE AT TOP (W/M2 ) O3MR 18 OZONE MIXING RATIO (KG/KG )	
19. Frequência dos Outputs	Cada timestep para variáveis 1D (Gridhistory) 6 horas para variáveis 3D 1 horas para variáveis extras 3D	Cada timestep para variáveis 1D (Gridhistory) 6 horas para variáveis 3D 1 horas para variáveis extras 3D
20. Espaço total para Rodada	Pre(30G); Model(200G); POS 75G (grib)	Pre(30G); Model(200G); POS 75G (grib)
21. Espaço total Pós-Processado	75G (grib)	75G (grib)
Outras Descrições da Dinâmica:		
Esquema de integração no tempo	Leap-Frog	Leap-Frog
Advecção horizontal	Euleriano e Semi-Lagrangiano	Euleriano e Semi-Lagrangiano
Advecção vertical	Diferença finitas	Diferença finitas
Grade vertical	Híbrida- Phillips 1957	Sigma-NCEP
Outros:	Inicialização por Modos Normais	Inicialização por Modos Normais

**Tabela 1.2 - Características e Especificações das Parametrizações físicas:**

ESQUEMAS DA FÍSICA			
Radiação Atmosférica	Clirad (NASA)	Clirad (NASA)	Chou e Suarez (1999-2001)
Superfície Continental	IBIS-CPTEC	IBIS-CPTEC	Kubota (2012)
Fluxos superficiais ar-mar	UKMET parametrization	UKMET parametrization	Hines et al (1999)
Tipo de Topografia de Subgrade	Espectral (media na subgrade)	Espectral (media na subgrade)	Danielson et al. (2010)
Microfísica de Nuvens	Morrison	Morrison	Morrison (2009)
Convecção Rasa/Profunda	Arakawa-Shubert Simplificado (NCEP)	Arakawa-Shubert Simplificado (NCEP)	HAN and PAN(2011)
Camada limite Planetária	Beterthon e Park	Beterthon e Park	Bretherton, c. s.; Park (2009)
Gravity Wave Drag	GWDD- Alpert	GWDD-Alpert	Alpert et al. 1988,1996
Química	Constante (Ch4, NO3, CFCs, etc.)	Constante (Ch4, NO3, CFCs, etc.)	Gonçalves et al. 2017
Aerossóis	Constante(continente/oceano) ou Climatologia	Constante(continente/oceano) ou Climatologia	Figueroa et al. 2016
Emissões	sem	sem	
Nudging	Filtro de Asselin aplicadas nas variáveis prognósticas.	Filtro de Asselin aplicadas nas variáveis prognósticas	Asselin 1972 and Williams 2009

## 2 Metodologia de Avaliação

Na literatura pode-se encontrar uma infinidade de métricas estatísticas que podem ser utilizadas nas avaliações dos modelos numéricos para a previsão de tempo. Onde podemos citar algumas:

1.0 - Listas de métricas (WILKS, 2006)

- a) Erro Médio (ME),
- b) Erro Médio Absoluto (MAE),

- c) Erro Quadrático Médio (Raiz) ((R) MSE)
- d) Coeficiente de correlação de anomalias (ACC);

O ganho no desempenho das qualidades das previsões obtidas através das atualizações do modelo, estão relacionadas a melhoria do seu núcleo dinâmico e de suas parametrizações físicas. O uso das métricas estatísticas devem seguir alguns procedimentos. Uma avaliação robusta requer no mínimo dois anos de previsões retrospectivas de curto ou médio alcance. Embora existam várias métricas estatísticas para as avaliações de desempenho de previsão do tempo de curto a médio prazo, o grupo BAM definiu as métricas estatísticas a serem utilizadas nas avaliações baseando-se nos conjuntos de dados de reanálises disponíveis e de fácil acesso. As principais métricas que são utilizadas incluem a correlações de anomalias, RMSE, MAE, Bias (U, V, T, Q, GEOP, SLP, nuvem, precipitação) e os erros nas intensidades e nas trajetórias de ciclones tropicais e extratropicais.

- a) Erro Médio (ME):

Dada uma série de  $n$  previsões  $\{F_i(t), i = 1 \leq n\}$ , em um passo de tempo particular  $t$  (por exemplo, 2, 3 ou 5 dias) e as observações correspondentes (reais)  $\{O_i(t), i = 1 \leq n\}$ , as métricas escolhidas são as seguintes:

$$Mean\ Error: ME(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [F_i(t) - O_i(t)]$$

O  $ME$  destaca vieses sistemáticos nos sistemas de previsão. Vieses negativos (frio) ou positivos (quentes) são relativamente simples de corrigir por pós-processamento estatístico, por exemplo, usando um filtro Kalman (Persson, 1991).

- b) Erro Médio Absoluto (MAE):

A precisão da previsão pode ser medida usando o erro médio absoluto (MAE):

$$Mean\ Absolute\ Error: MAE(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i(t) - O_i(t)|$$

- c) Erro Quadrático Médio (Raiz) (RMSE):

Essa medida avalia a precisão geral das previsões. Por ter uma dependência quadrática, o RMSE penaliza erros maiores com muito mais intensidade do que erros menores. Para um sistema de previsão não tendencioso (ou seja, ME 0), o RMSE é equivalente ao desvio padrão do erro.

$$\text{Root Mean Squared Error: } \text{RMSE}(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [F_i(t) - O_i(t)]^2}$$

d) Coeficiente de correlação de anomalias (ACC):

É a relação da variabilidade espacial da variável prevista ao valor da variabilidade climatológica da variável observada. O Valor de ACC, indica se a previsão é melhor que o valor climatológico.

$$\text{Coeficiente de correlação de anomalias (ACC)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X'_i - \bar{X}') * (Y'_i - \bar{Y}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X'_i - \bar{X}')^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2}}$$

### 3 Processos Avaliados

A avaliação do modelo BAM em coordenada híbrida está dividida em 6 etapas que mostram a consistência das previsões de curto prazo. Na **primeira etapa** foi analisada a distribuição vertical de energia modal total para os modos verticais. Esta etapa é importante pois a energética da atmosfera é um dos componentes mais importantes que devem ser representado pelos modelos numéricos. A representação precisa e consistente influenciará diretamente na melhora do skill para a previsão de curto prazo (tempo). A **segunda etapa** teve como objetivo avaliar a inicialização por modos normais, este processo torna-se muito importante, quando se utiliza uma condição inicial da atmosfera gerada por um processo de assimilação de dados que utiliza outro modelo atmosférico. A importância do processo de inicialização por modos normais está relacionada ao balanço da condição inicial da atmosfera às equações governantes da dinâmica e da termodinâmica do modelo numérico. A **terceira etapa** consistiu em avaliar as variáveis prognósticas relacionados aos processos dinâmicos simulados pelo modelo BAM em coordenada híbrida através de métricas estatísticas discutidas nas secções anteriores. Nesta etapa foram extraídas as informações do escoamento atmosférico na superfície (10 m) e nos baixos (850 hPa), médios (500 hPa) e altos (200 hPa) níveis e através da métricas estatísticas foram avaliados se estas variáveis são bem simuladas e qual o ganho no skill do modelo obtida com a melhoria do núcleo dinâmico e das parametrizações físicas. Na **quarta etapa** foram avaliadas as variáveis prognósticas relacionados aos processos termodinâmicos da atmosfera. Nesta etapa, também foram feitas as análises estatísticas através das avaliações das variáveis de temperatura próxima a superfície (2m), a

temperatura em baixos (850 hPa), médios (500 hPa) e altos (200 hPa) níveis e o campo de geopotencial referentes aos níveis nas quais a temperatura serão analisadas. A **quinta etapa** da avaliação foi avaliado o skill do modelo na simulação dos processos que geram precipitação. A **sexta e última etapa** consistiu em avaliar a intensidade e o posicionamento de casos de Ciclones Extratropicais simulados pelo modelo BAM.

#### **4 Descrição das Integrações Numéricas Realizadas**

Para demonstrar o ganho na qualidade de previsão do modelo BAM em coordenada híbrida (definida como a versão BAM-2.2.1), o grupo BAM optou por configurar o namelist do modelo e as simulações com as configurações do modelo BAM similares à coordenada sigma utilizado operacionalmente no INPE. O grupo BAM decidiu realizar e apresentar uma avaliação das previsões do modelo (BAM) na resolução TQ0666L064 (~20km e 64 camadas atmosféricas), similar ao utilizado operacionalmente no DIDOP do INPE. As previsões são inicializadas a partir das condições iniciais da atmosfera extraídas das análises do *Global Data Assimilation* feita com o modelo atmosférico global GFS/NCEP (**GDAS-Atmospheric-Analysis**, [Index of /pub/data/nccf/com/gfs/prod](#)) na resolução espacial de  $0.117188^\circ \times 0.117188^\circ$ . O período das previsões avaliadas é de 21/11/2019 à 29/02/2020.

## **5 Análise dos Resultados e Discussão:**

### **5.1 Avaliação da Distribuição Vertical da Energia Modal Total para os Modos Verticais**

A energética da atmosfera é um dos componentes mais importantes de ser representado nos modelos numéricos. A participação de energia entre os modos normais de oscilação na condição inicial é um fator determinante na evolução dos campos prognósticos (temperatura, umidade e velocidade do vento) com o tempo, outro processo importante são as trocas de energia entre modos, que influenciam principalmente nas escalas de previsão de tempo. Na escala climática, os diferentes tipos de forçantes que contribuem para a taxa de mudança de momentum, temperatura e umidade excitam as ondas livres que estão presentes nos campos atmosféricos, estas ondas livres ganham mais energia e passam a participar do processo de participação de energia.

Portanto, para obter uma previsão de curto prazo (tempo) com boa acurácia é importante avaliar o quanto os modelos numéricos representam adequadamente esses processos, ou seja, fazer uma análise da energética modal das previsões do modelo e comparar com a energética modal de suas correspondentes análises, as quais são usadas como condições iniciais.

A análise da energética da atmosfera também pode ajudar a extrair outras informações importantes para a modelagem numérica da atmosfera. Por exemplo, as informações da distribuição espectral de energia da atmosfera são importantes para definir adequadamente as resoluções computacionais (espaçamento de grade horizontal) para resolver as equações prognósticas de previsão numérica de tempo ou clima. Estas informações são também úteis para definir como parametrizar os mecanismos de dissipação de energia em escala subgrade nas equações de previsão tanto no método de diferenças finitas quanto no espaço espectral.

Para realizar a análise da energética modal, o ideal seria analisar a energética com os campos na resolução e formato da grade 3D da saída dos modelos, onde se aplicaria os modos verticais correspondente à grade vertical do modelo. Porém, isso demandaria uma enorme quantidade adicional de armazenamento de dados, pois ainda seria necessário realizar o pós-processamento para gerar as saídas de dados em coordenada de pressão para as outras análises. Portanto, devido ao alto custo computacional de armazenamento de dados este procedimento no momento é inviável.

Para resolver este problema de armazenamento de dados, optou-se pelo desenvolvimento de um novo procedimento para analisar a decomposição dos modos verticais, utilizando diretamente os dados em coordenadas de pressão. Isto é possível devido ao fato que a análise modal horizontal independe de qual seja a coordenada vertical. Este novo procedimento para analisar a decomposição dos modos verticais, permite-se fazer a análise da energética modal diretamente nos campos pós-processados e em dados de análises ou reanálises, que normalmente tem grades horizontais em longitude e latitude e na vertical são níveis de pressão.

O novo procedimento para analisar a decomposição dos modos verticais, também permite avaliar a eficácia da inicialização por modos normais diabática do modelo, ou seja, se foi filtrado da condição inicial as ondas que eram esperadas.

Após realizada a decomposição dos modos verticais, o trabalho seguinte foi agrupar os modos verticais em classes de acordo com sua estrutura vertical e a distribuição horizontal de porcentagem de energia em modos verticais. Tal classificação é realizado em termos do valor da altura equivalente  $H_n$ , onde  $n$  é a ordem do modo vertical tal que  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Esta classificação é mostrada na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1- Níveis Verticais (hPa) do pós dos Modelos (Sigma, híbrido)**

Agrupamento	Altura equivalente
<b>Classe 0</b>	<b>modos com <math>H_n</math> maior que 600 m;</b>
<b>Classe 1</b>	<b>modos com <math>H_n</math> entre 100 e 600 m;</b>
<b>Classe 2</b>	<b>modos com <math>H_n</math> entre 100 e 10 m;</b>
<b>Classe 3</b>	<b>modos com <math>H_n</math> menor que 10 m.</b>

A Classe 0 inclui o modo externo ou barotrópico, dado que sua estrutura vertical não apresenta zeros, sendo importantes na energética do cinturão de altas pressões nas latitudes médias. A estrutura vertical dos demais modos desta classe tem zeros na estratosfera acima de 100 hPa, podendo ser considerados barotrópicos na troposfera.

As demais classes possuem modos baroclínicos, sendo que a Classe 1 tem modos cuja estrutura vertical tem máximos na alta (em torno de 250 hPa) e baixa (em torno de 850 hPa) troposfera com sinais trocados e possuindo valor nulo em níveis intermediários (em torno de 500 hPa). A Classe 1 é importante nas regiões tropicais onde ocorrem atividades convectivas intensas e em grande escala.

A Classe 2 são modos importantes para processos de níveis mais baixos, incluindo a camada limite.

A Classe 3 tem também importância em baixos níveis, porém tem maior energia onde há topografia acentuada.

## 5.2 Comparação dos Modos Verticais Classes 0 e 1 para o Pós do BAM Híbrido e do BAM Sigma

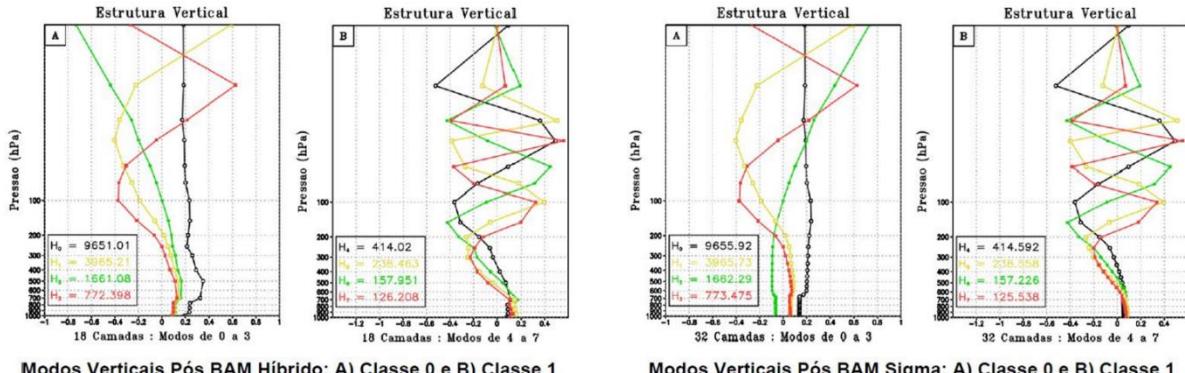
O resultado da decomposição e agrupamento dos modos verticais em classes obtidas a partir dos campos pós-processados do modelo BAM em coordenada híbrida (Tabela 5.2) e sigma (Tabela 5.3) são apresentadas na Figura 1. Apesar da diferença no número de níveis (18 e 32) entre o BAM em coordenada híbrida e sigma, as alturas equivalentes das Classes 0, 1 e 2 são muito semelhantes e as estruturas verticais também (Figura 1 das Classes 0 e 1). As diferenças principais aparecem na Classe 3, embora energeticamente menos importante. Portanto, o aumento do número de níveis afeta mais os modos mais internos (Classes acima de 3).

**Tabela 5.2- Níveis Verticais (hPa) do Pós dos Modelos (Sigma, híbrido)**

Modelos	Níveis de pressão (hPa)
BAM Híbrido (18):	1000 925 850 775 700 500 400 300 250 200 150 100 70 50 30 20 10 3
BAM Sigma (32)	1000 975 950 925 900 875 850 825 800 775 750 725 700 675 650 600 550 500 450 400 350 300 250 200 150 100 70 50 30 20 10 3

**Tabela 5.3- Alturas Equivalentes (m) do Pós do BAM Híbrido e do BAM Sigma**

BAM Híbrido (18 Níveis):	BAM Sigma (32 Níveis):
<b>agrupamento</b>	<b>altura equivalente</b>
<b>Classe 0 (4 Modos):</b>	<b>Classe 0 (4 Modos):</b>
9651,0 3965,2	9655,9 3965,7
1661,1 772,40	1662,3 773,48
<b>Classe 1 (4 Modos)</b>	<b>Classe 1 (4 Modos):</b>
414,02 238,46	414,59 238,56
157,95 126,21	157,23 125,54
<b>Classe 2 (6 Modos)</b>	<b>Classe 2 (6 Modos):</b>
92,094 67,690	91,031 67,503
50,048 30,617	47,818 29,255
16,986 13,582	16,709 10,399
<b>Classe 3 (4 Modos)</b>	<b>Classe 3 (18 Modos)</b>
9,3610 4,6020	7,1295 5,2307
2,2900 1,4854	4,0123 3,1452
	2,4478 1,9092
	1,5410 1,0843
	0,7452 0,5439
	0,4204 0,3411
	0,2885 0,2520
	0,2234 0,1977
	0,1732 0,1487



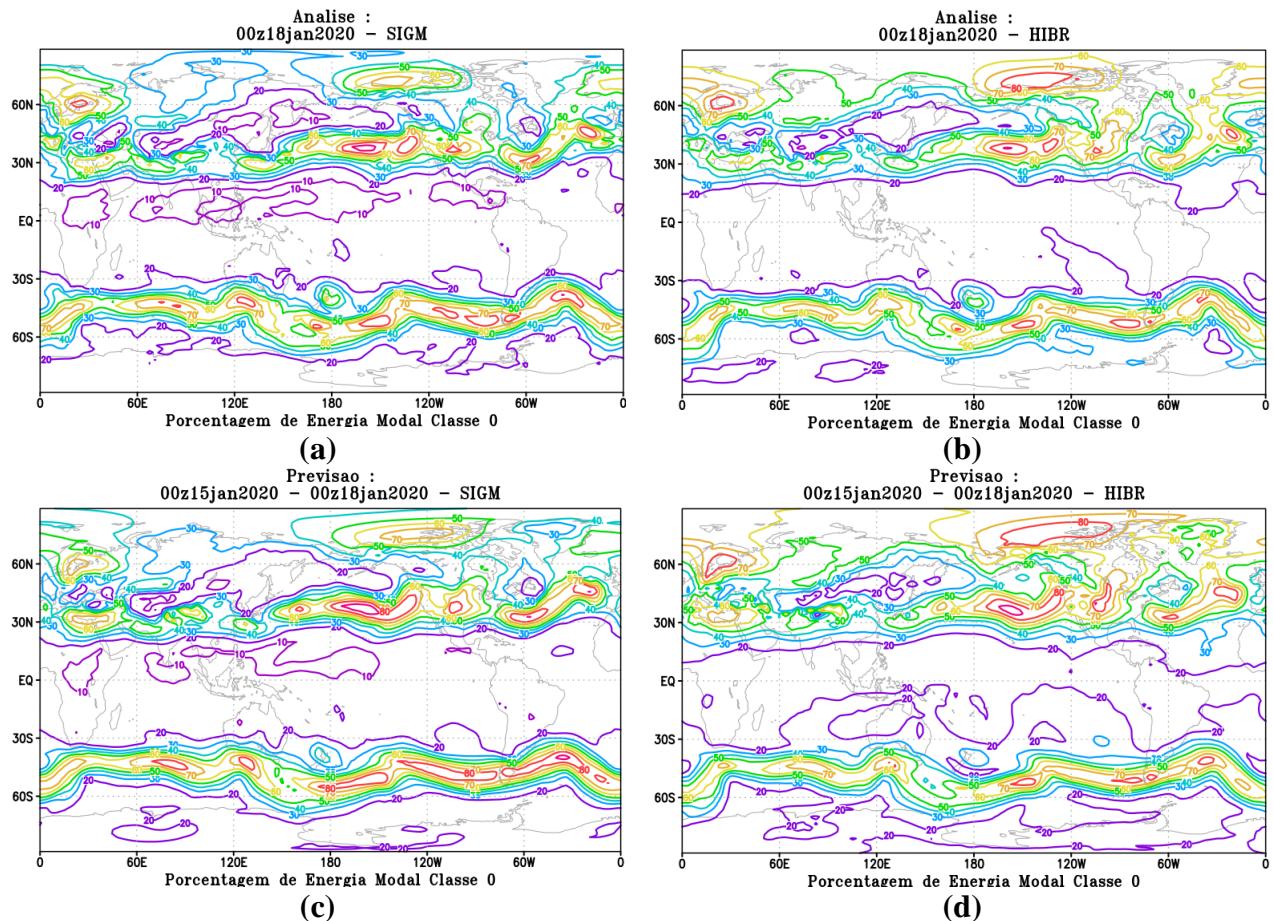
(a)

(b)

**Figura 1 - Estrutura vertical das alturas equivalentes das classes 0 e 1 obtidas do modelo BAM em coordenada híbrida e sigma.**

No caso da classe 0 inclui o modo externo ou barotrópico, pode-se avaliar espacialmente onde esta classe tem maior influência. A porcentagem de energia modal total para os modos verticais de Classe 0 para a análise e previsão de 3 dias são apresentadas na Figura 2.

A maior porcentagem de energia modal total localiza-se *ao longo do cinturão de altas pressões em latitudes médias*. As Figuras 2 (a, b) apresentam a porcentagem de energia modal total da classe 0 em coordenada sigma e híbrida obtidas das análises para o dia 00z18jan2020, onde, verifica-se que ambos as análises dos modelos apresentam essas características, entretanto em coordenada híbrida, o campo da porcentagem de energia modal total é mais suave. A Figura 2 (c, d) apresentam as previsões de 72 horas para o dia 00z18jan2020, onde, verifica-se que a maior porcentagem de energia modal total localizada *ao longo do cinturão de altas pressões em latitudes médias e são bem simuladas por ambos os modelos em coordenada (sigma, híbrido)*. A boa correlação com as suas próprias análises e as configurações semelhantes entre os modelos indicam que a propagação de energia está bem representada em ambos os modelos.

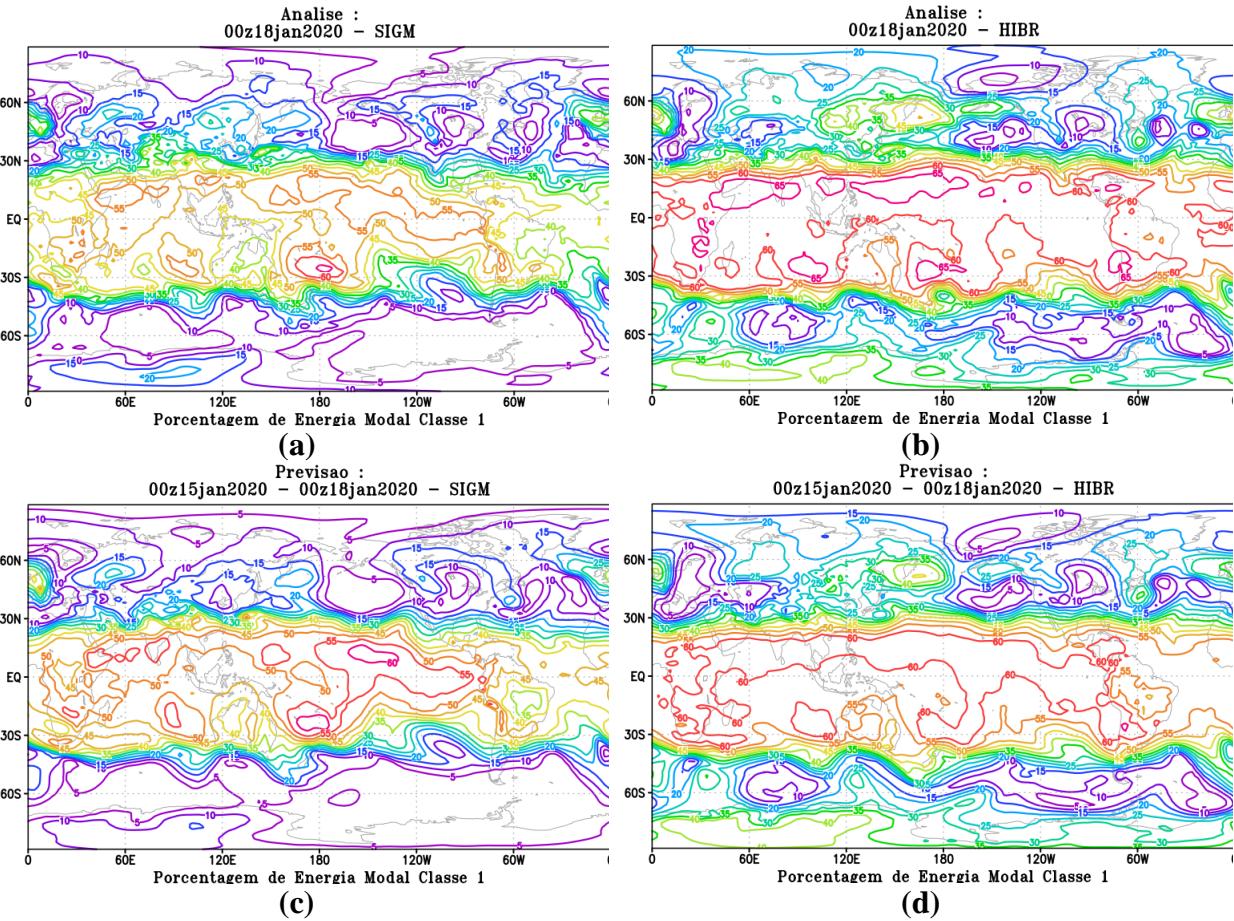


**Figura 2 - As figuras (a, b) apresentam a porcentagem de energia modal total da classe 0 em coordenada sigma e híbrida obtidas das análises para o dia 00z18jan2020 e as figuras (c, d) as previsões de 72 horas para o modelo em coordenada sigma e híbrida.**

Os modos baroclínicos são representados na classe 1 e a representação horizontal desta classe indica em qual região a classe 1 é mais importante. A Figura 3 apresenta a maior porcentagem de energia modal total da classe 1, onde verifica-se que a regiões tropicais é a mais importante devido a ocorrência de atividade convectiva em grande escala.

As figuras 3 (a, b) apresentam a representação espacial da Classe 1, para o dia 00z18jan2020 obtidos a partir dos dados de análises gerado para o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma. A maior porcentagem de energia modal total da classe 1 localiza-se nas regiões tropicais, principalmente onde há convecção em grande escala. A representação da maior porcentagem de energia modal total da classe 1, também é obtida através das previsões de 72 horas, através das integrações realizadas com o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma. As previsões de 72 horas são para o dia 00z18jan2020, e são apresentadas nas Figuras 3 (c, d). Ambos os modelos apresentam as características de distribuição espacial da maior porcentagem de energia modal

total e as previsões concordam com as porcentagens de energia modal total dos dados de análises. Verifica-se também as configurações são muito semelhantes entre os modelos.

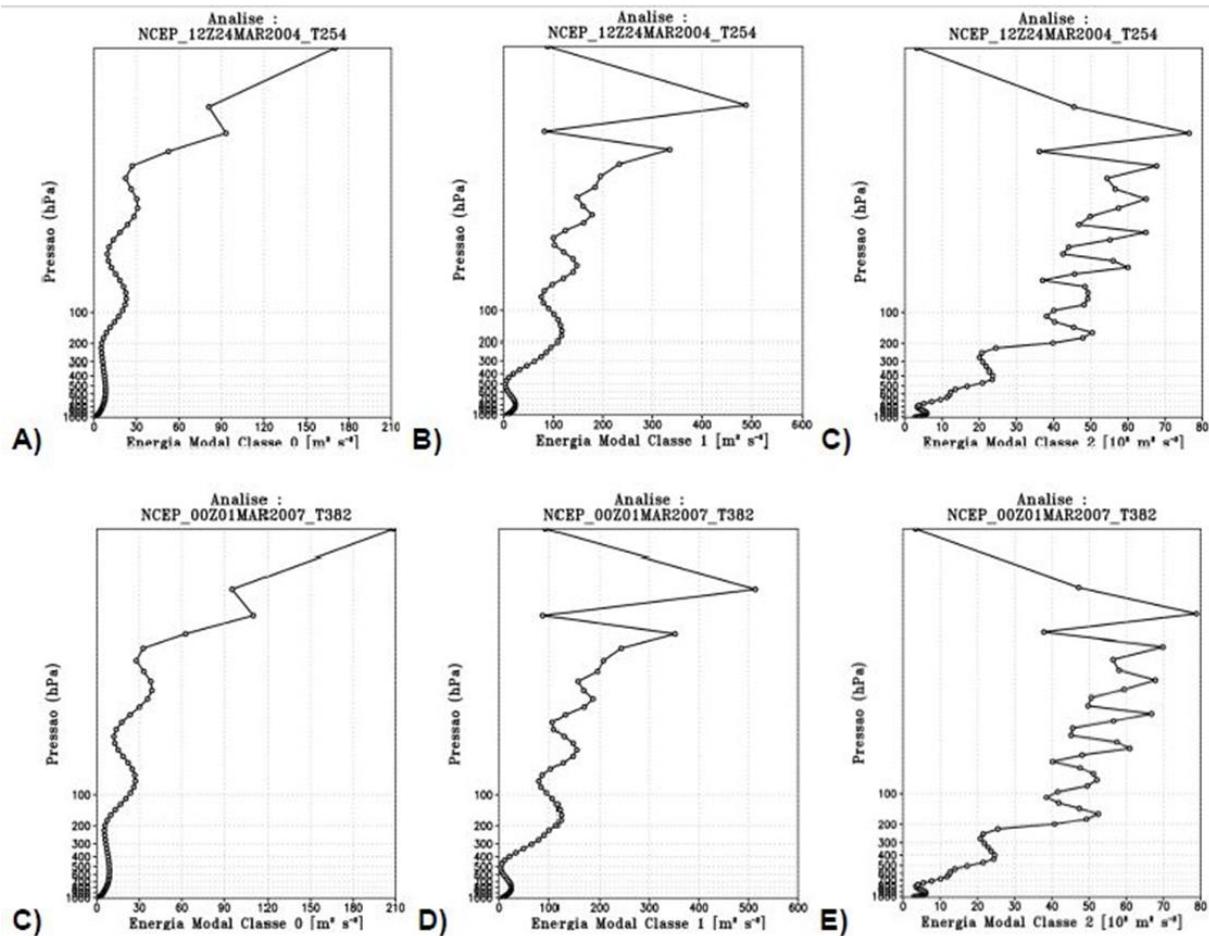


**Figura 3 - As Figuras (a, b) apresentam a porcentagem de energia modal total da classe 1 em coordenada sigma e híbrida obtidas das análises para o dia 00z18jan2020 e as figuras (c, d) as previsões de 72 horas para o modelo em coordenada sigma e híbrida.**

### 5.3 Impacto da resolução horizontal na distribuição vertical da média global da energia modal total

Para validação da implantação do sistema de análise em coordenadas verticais de pressão, optou-se por mostrar a distribuição vertical de energia modal total calculada em 64 níveis sigma para análises antigas no formato espectral do NCEP, as quais eram disponibilizadas nos 64 níveis sigma. A resoluções espetrais utilizadas para comparação são TQ0254L64 e T382L064 para o dia 24/03/2004 às 12 UTC.

A Figura 4 mostra a estrutura da distribuição vertical da média global da energia modal total para as classes 0, 1, 2 obtidas da análise do NCEP para as duas resoluções distintas.



**Figura 4 - Distribuição vertical da média global da energia modal total para a análise do dia 24/03/2004 às 12 UTC, para o MGCA-Sigma TQ0254L064 [A) Classe 0, B) Classe 1 e C) Classe 2] e para o MGCA-Sigma TQ0382L064 [C) Classe 0, D) Classe 1 e E) Classe 2].**

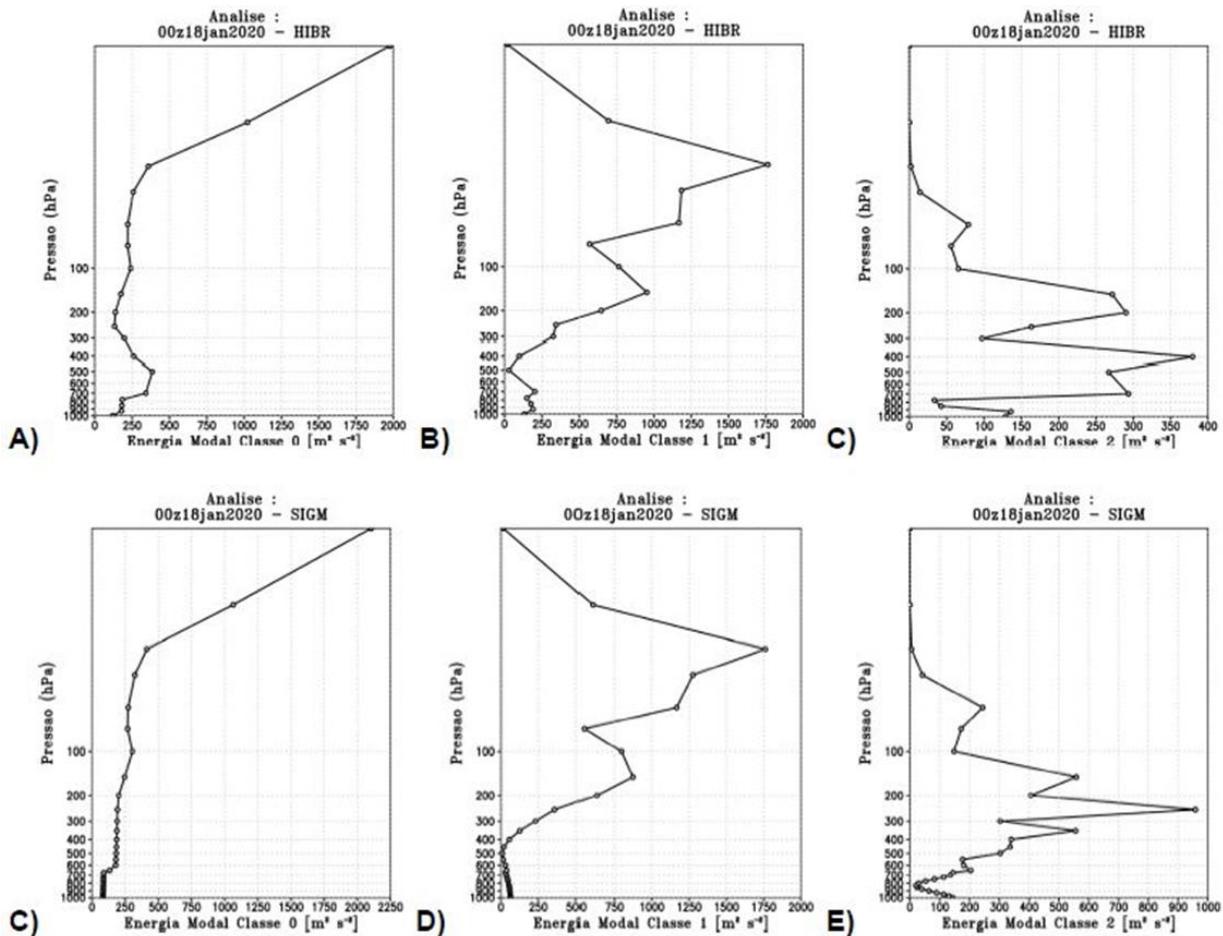
Comparando a distribuição vertical de energia modal total para a análise TQ0254L04 com a análise T382L064 (Figura 4), nota-se que são muito semelhantes, mostrando que a diferença de resolução horizontal não afeta a distribuição vertical de energia modal total. Ao comparar com a distribuição obtida usando análises pós processadas pelo BAM, verifica-se que existe uma boa semelhança nas classes 0 e 1. Na classe 2 há diferenças maiores, porém o aspecto mais importante é a concentração de energia em níveis médios, que neste caso é semelhante.

Portanto, o uso de coordenadas verticais de pressão e análises pós-processadas pelo modelo BAM, mesmo com 18 camadas, mantém as características da distribuição vertical de energia total modal quando calculadas diretamente nos níveis sigma originais. Então, de certa forma, esses resultados validam a implementação do método de análise da energética modal em coordenadas verticais de pressão.

## **5.4 Impacto do sistema de coordenada vertical na distribuição vertical da média global da energia modal total**

A estrutura da distribuição vertical das alturas equivalentes e a distribuição espacial da maior porcentagem de energia modal total são bem representados pelos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma. Entretanto, para saber se o processo energético de troca de energia entre os modos está bem representado pelos modelos em coordenada sigma e híbrida, optou-se por analisar a distribuição vertical da média global da energia modal total dos dados da análise do NCEP usado como condição inicial do modelo BAM para o dia 18/01/2020, 00 UTC e as previsões de 72 horas realizados com os modelos em coordenada sigma e híbrida para esta mesma data.

Para analisar a performance dos modelos, primeiramente apresenta-se na Figura 5 a distribuição vertical da média global da energia modal total das análises do NCEP em coordenada híbrida e sigma usadas como condição inicial no modelo BAM. Estas análises foram pós-processadas das coordenadas verticais sigma ou híbrida para a coordenada de pressão. Com o propósito de analisar a distribuição dos modos verticais em classes foi calculada uma média global da energia modal total em cada uma das classes (com exceção da Classe 3, onde a porcentagem de energia em geral é pequena). Nestes cálculos, utilizou-se as análises do NCEP usadas como condição inicial do modelo BAM em coordenada Híbrida e Sigma. Em ambas as coordenadas dos modelos, as análises do NCEP foram selecionadas para o dia 18/01/2020 às 00 UTC.



**Figura 5 - Distribuição vertical da média global da energia modal total para a análise do dia 18/01/2020 às 00 UTC, para o BAM-Híbrido [A) Classe 0, B) Classe 1 e C) Classe 2] e para o BAM-Sigma [C) Classe 0, D) Classe 1 e E) Classe 2].**

A Figura 5 mostra que a distribuição vertical da média global da energia modal total das análises do NCEP em coordenada vertical sigma e híbrida. Verifica-se que as estruturas verticais são semelhantes para a energia modal da classe 0 e classe 1, e a maior diferença está na classe 2, onde, em níveis médios a distribuição vertical da média global da energia modal total obtidas das análises do NCEP (pós-processadas da coordenada vertical híbrida para pressão) apresentam maior energia modal.

Apesar de serem semelhantes, as distribuições verticais da média global da energia modal total para cada uma das classes (Figura 5) apresentam algumas características distintas entre as análises do NCEP em coordenada vertical sigma e híbrida utilizadas como condição inicial do modelo BAM.

A distribuição vertical da média global da energia modal total da classe 0 tem uma pequena diferença entre os níveis 850 a 400 hPa, onde, na análise do NCEP em coordenada híbrida usada

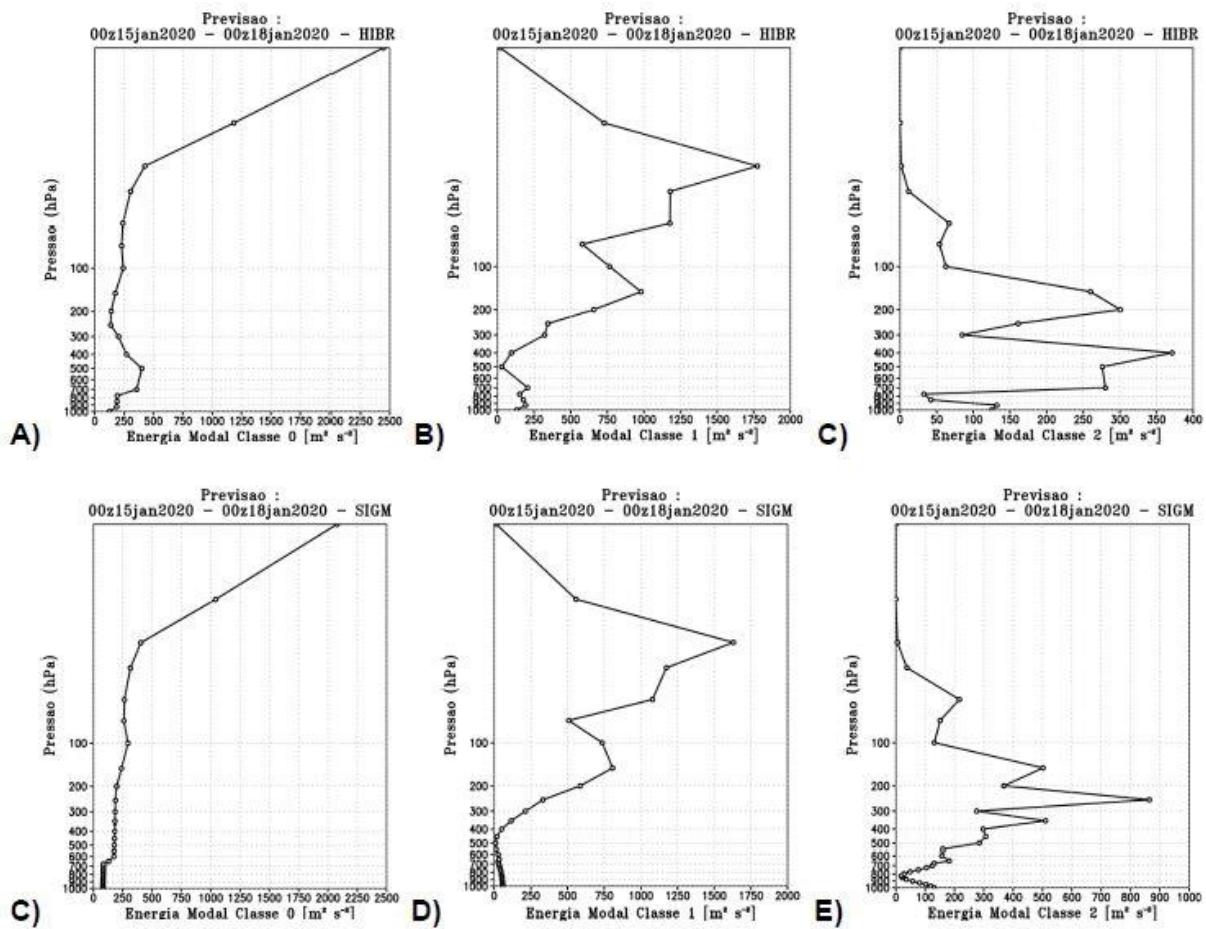
como condição inicial no modelo BAM encontra-se uma energia modal total um pouco maior em relação ao modelo BAM em coordenada sigma. E entre os níveis de (1000 e 850) hPa, a análise do NCEP em coordenada híbrida possui mais energia modal total em relação à análise do NCEP, em coordenada sigma usada como condição inicial no modelo BAM. Nos demais níveis a energia modal total da classe 0 são bem similares entre a análise do NCEP, em coordenada híbrida e sigma usada como condição inicial. As diferenças mais significantes entre as análises estão principalmente nos níveis de 850 a 400 hPa, estas diferenças podem impactar as previsões dos sistemas de grande escala.

A classe 1, apresenta uma distribuição vertical da média global da energia modal similar entre as análises do NCEP em coordenada híbrida e sigma usada como condição inicial no modelo BAM. Entretanto, entre os níveis de 1000 a 700 hPa, a análise do NCEP em coordenada híbrida apresenta uma distribuição vertical da média global da energia modal maior em relação à análise do NCEP em coordenada sigma.

A maior diferença entre as análises do NCEP em coordenada híbrida e sigma usada como condição inicial no modelo BAM está nas distribuições verticais da média global da energia modal total da classe 2. Para as análises do NCEP em coordenada híbrida e sigma as distribuições verticais apresentam características semelhantes com máximos em níveis médios. Entretanto, as análises do NCEP em coordenada sigma possuem uma energia distribuição vertical da média global da energia modal total menor.

A Figura 6 mostra as distribuições verticais da média global da energia modal total das previsões de 72 horas para o dia 18/01/2020, 00 UTC, realizada com o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma. O padrão é o mesmo ao encontrando nas análises de energética modal dos dados de análise do NCEP em coordenada sigma e híbrida (Figura 5) para esta mesma data.

A concordância é muito boa entre a distribuição vertical da energia modal total das previsões e das análises para cada uma das classes mostradas. Os modelos com 3 dias de previsão conseguem, portanto, reproduzir essa distribuição da energia modal, mostrando que a interação destes modos é bem representada nos dois modelos BAM em coordenada híbrida e sigma.



**Figura 6 - Distribuição vertical da média global da energia modal total para a previsão de 3 dias a partir do dia 15/01/2020 às 00 UTC, para o BAM-Híbrido [A) Classe 0, B) Classe 1 e C) Classe 2] e para o BAM-Sigma [C) Classe 0, D) Classe 1 e E) Classe 2].**

## **5.5 Efeito da Inicialização na Condição Inicial**

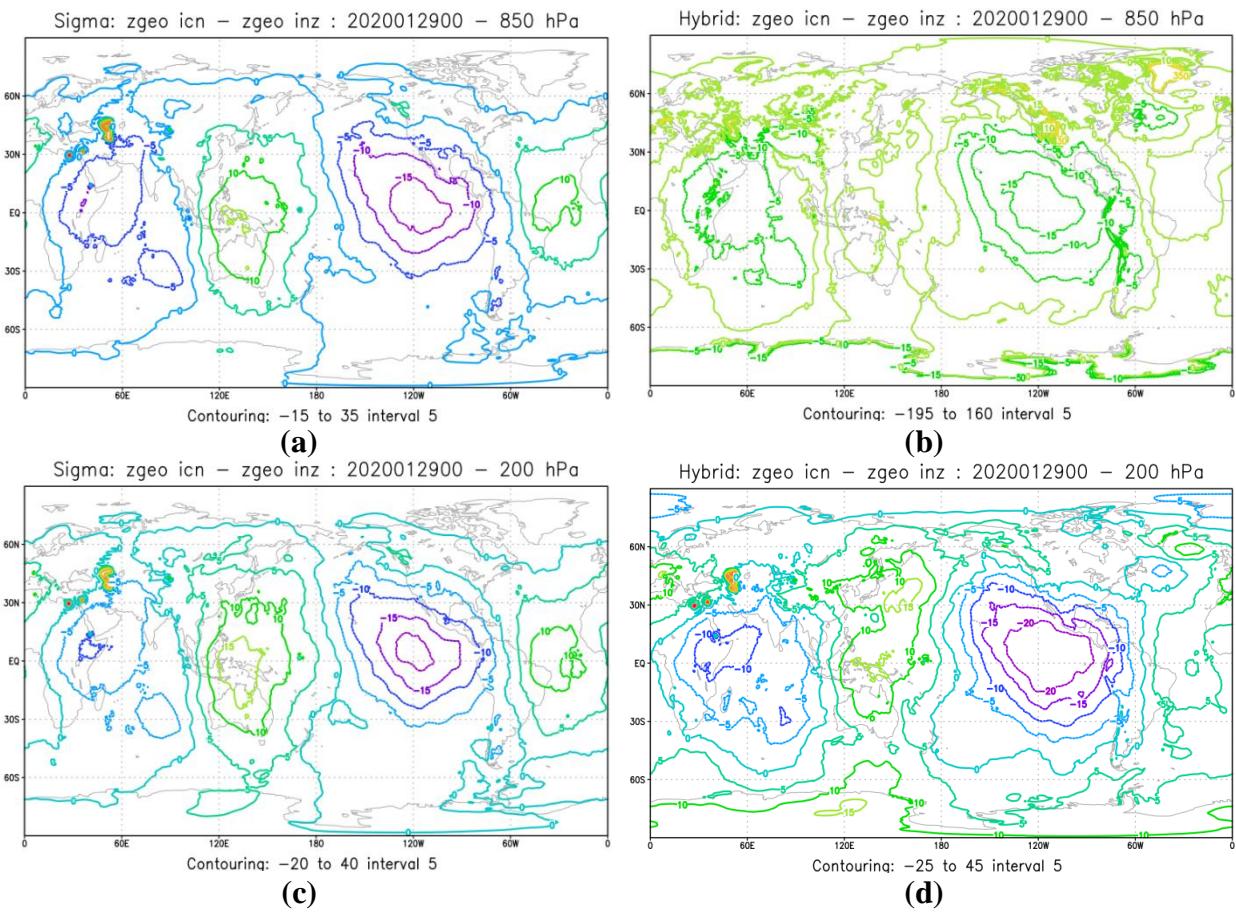
A técnica inicialização por modos normais ou filtro digital utilizada nos modelos são importantes nos modelos, quando a análise usada como condição inicial no modelo seja criado por um sistema de assimilação de dados utilizando outro modelo atmosférico.

Nesta avaliação, a principal análise do efeito da inicialização é obtida através da diferença do campo da altura geopotencial nos níveis de 850 e 200 hPa, entre o estado inicial da atmosfera e o estado inicial da atmosfera inicializado.

Os modos inicializados possuem altura equivalente igual ou acima de 1 km e períodos abaixo de 48 horas. Portanto, espera-se que a estrutura da diferença do campo da altura geopotencial nos níveis de 850 e 200 hPa, entre o estado inicial da atmosfera e o estado inicial da atmosfera inicializado, seja de onda longa e barotrópica equivalente (troposfera). Se os modos inicializados pertencem à Classe 0, o campo resultante da diferença da altura geopotencial representará a filtragem da maré atmosférica em forma de onda de gravidade longas e rápidas.

A análise do NCEP referente ao dia 00UTC 29/01/2020 foi escolhida para a avaliação do impacto da inicialização no modelo BAM em coordenada híbrida e sigma. A Figura 7 apresenta a diferença da altura geopotencial entre a condição inicial(icn) e a inicializada(inz) nos níveis de 850 e 200 hPa, referente as rodadas do modelo BAM em coordenada sigma e híbrida.

A diferença da altura geopotencial entre a condição inicial e a condição inicializada mostra a estrutura barotrópica, ou seja, a estrutura que é verificada em baixos níveis (850 hPa) é semelhante à estrutura de altos níveis (200 hPa). Este resultado é obtido tanto para o modelo em coordenada sigma (a esquerda) quanto para o modelo em coordenada híbrido (a direita). Nas Figura 7 (a,b), verifica-se em baixos níveis que o modelo em coordenada híbrida tem um efeito maior da inicialização sobre a topografia alta em relação ao modelo coordenada sigma. O resultado mais importante é o fato que as inicializações para ambos os modelos geram as estruturas de filtragem semelhantes (filtragem da maré atmosférica em forma de onda de gravidade longas e rápidas). Portanto, pode-se concluir que a inicialização diabática por modos normais estão implementadas corretamente em ambos os modelos em coordenada híbrida e sigma.



**Figura 7- A diferença da altura geopotencial entre a condição inicial e a condição nos níveis de 850 e 200 hPa, tanto para o modelo sigma (a esquerda) quanto para o modelo híbrido (a direita).**

## **5.6 Avaliação Estatística do BAM Híbrido em Comparaçao com o BAM Sigma**

Para a avaliação do modelo BAM em coordenada híbrida utilizou-se como referência o modelo BAM em coordenada sigma que é utilizada operacionalmente no INPE. O ganho na habilidade de previsão de tempo (Skill) será analisada em funções de métricas estatísticas (Correlação de Anomalias, Erro Quadrático Médio, Viés e Erro Absoluto).

Uma análise estatística robusta requer no mínimo 2 anos de dados de previsão de 11 dias. Entretanto, para realizar uma análise preliminar, optou-se por realizar as integrações curta (10 dias) com o modelo BAM em coordenada híbrida para um período de 3 meses (dezembro/2019 a fevereiro/2020). As análises dos horários (00, 06, 12 e 18 UTC) são fornecidas diariamente pelo NCEP. Estas análises são utilizadas para rodar o modelo BAM em coordenada sigma operacionalmente no INPE, portanto, optou-se pela utilização da mesma condição inicial para integrar o modelo BAM em coordenada híbrida. Nestas avaliações, somente foram utilizadas as integrações dos modelos que utilizaram as análises das 00 UTC

O período usado para a avaliação preliminar corresponde aos dias 01/12/2019 até 29/02/2020, e somente foram avaliadas as previsões até 10 dias. Nos cálculos da correlação de anomalia foi utilizada uma climatologia do CSFR/NCEP ( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 37 níveis). A climatologia do CSFR/NCEP são as médias mensais de janeiro de 1979 à dezembro de 2009, a partir destes dados mensais foi realizada a média climatológica para cada mês desse período.

O valor da Climatologia Mensal é considerada na data e horário central do mês e interpolado linearmente no tempo para o dia e horário em questão, e para a grade horizontal do modelo. Os níveis verticais analisados do modelo estão presentes na climatologia.

Nesta análise foram selecionadas variáveis em baixos níveis da troposfera (Tabela 5.4), pois considera-se que são mais difíceis de serem reproduzidas pelos modelos devido a influência da camada limite. Na alta troposfera as variáveis estão sob a influência da grande escala, portanto, predominam em geral a dinâmica.

Tabela 5.4 - Lista de Variáveis e Níveis Avaliadas:

Variável	Prefix	Nível	Unidade
Altura Geopotencial	zgeo	200, 500 e 850 hPa	m
Pressão Reduzida ao Nível do Mar	psnm	superfície	hPa
Água Precipitável	agpl	Integrada	Kg/m <sup>2</sup>
Vento Zonal	uvel	200 e 850 hPa	m/s
Vento Meridional	vvel	200 e 850 hPa	m/s
Temperatura atmosfera	temp	200 e 850 hPa	K
Temperatura abrigo	tp2m	2 metros	K
Velocidade Vertical em Pressão	omeg	500 hPa	Pa/s

Tabela 5.5 - Áreas de Cálculo das Estatísticas

Região	Área
América do Sul	90°W , 30°W ; 40°S , 10°N
Região Tropical	0 , 360 ; 20°S , 20°N
Hemisfério Sul	0 , 360 ; 90°S , 20°S
Hemisfério Norte	0 , 360 ; 20°N , 90°N

As Figuras 8 a 14 apresentam o desempenho das previsões de até 10 dias para as variáveis e níveis descritos na Tabela 5.4 (**Tabela 5.4 lista de variáveis e níveis avaliados**). Os cálculos das métricas estatísticas são aplicados para as áreas descritas na Tabela 5.5 (**Tabela 5.5 áreas de cálculo das estatísticas**). Nas Figuras 8 a 14 são plotadas as métricas estatísticas de correlação de anomalias (Figuras (a, d)), erro quadrático médio (Figuras (b, e)) e viés (figuras (c, f)) para as previsões de até 10 dias realizada com o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma.

As avaliações deste conjunto de variáveis têm o objetivo de mostrar o ganho na habilidade de previsão de curto prazo do modelo BAM em coordenada híbrida em relação ao modelo BAM em coordenada sigma, que é utilizado operacionalmente pelo INPE.

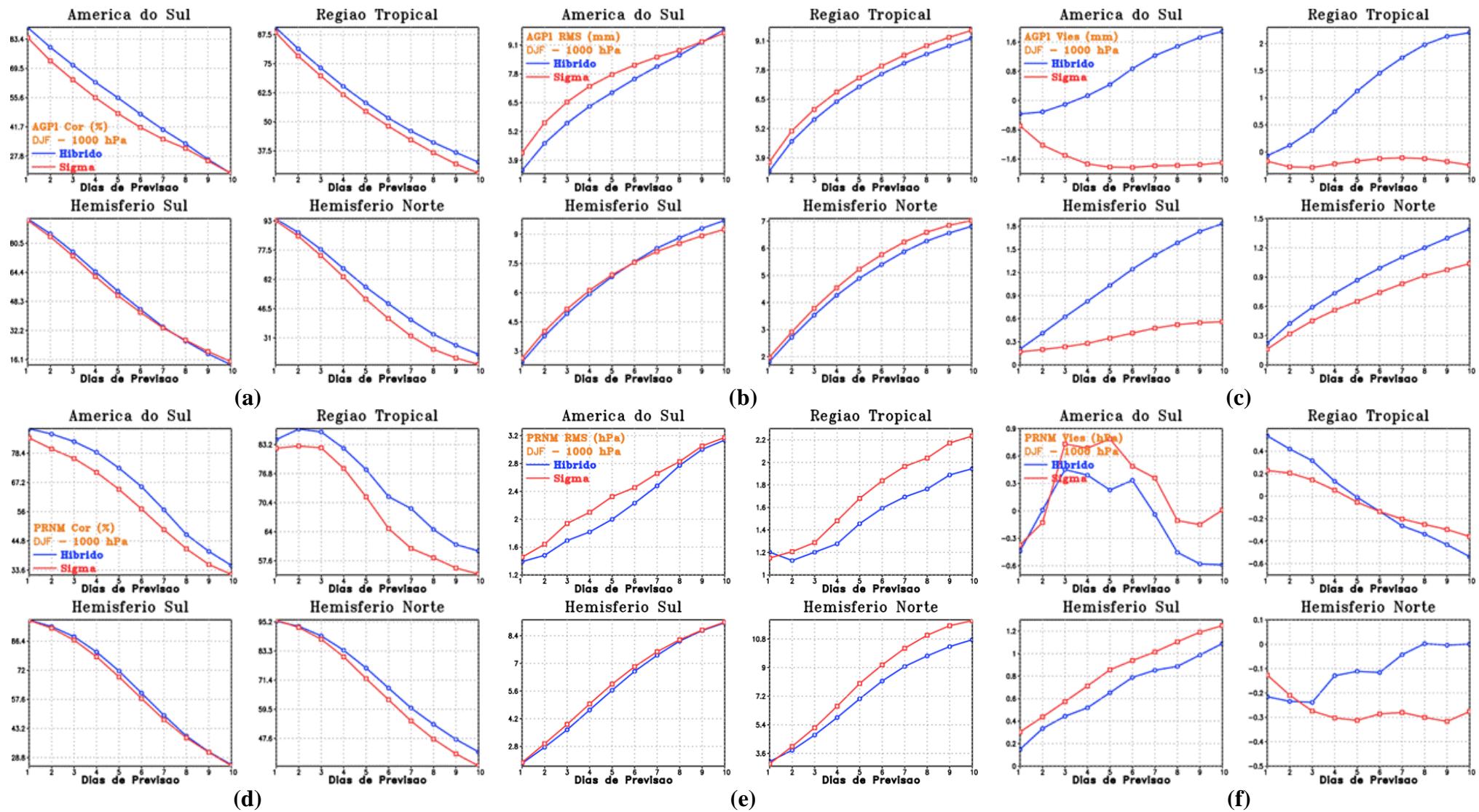


Figura 8 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio(b, e) e Viés (c,f) (agpl e psnm)

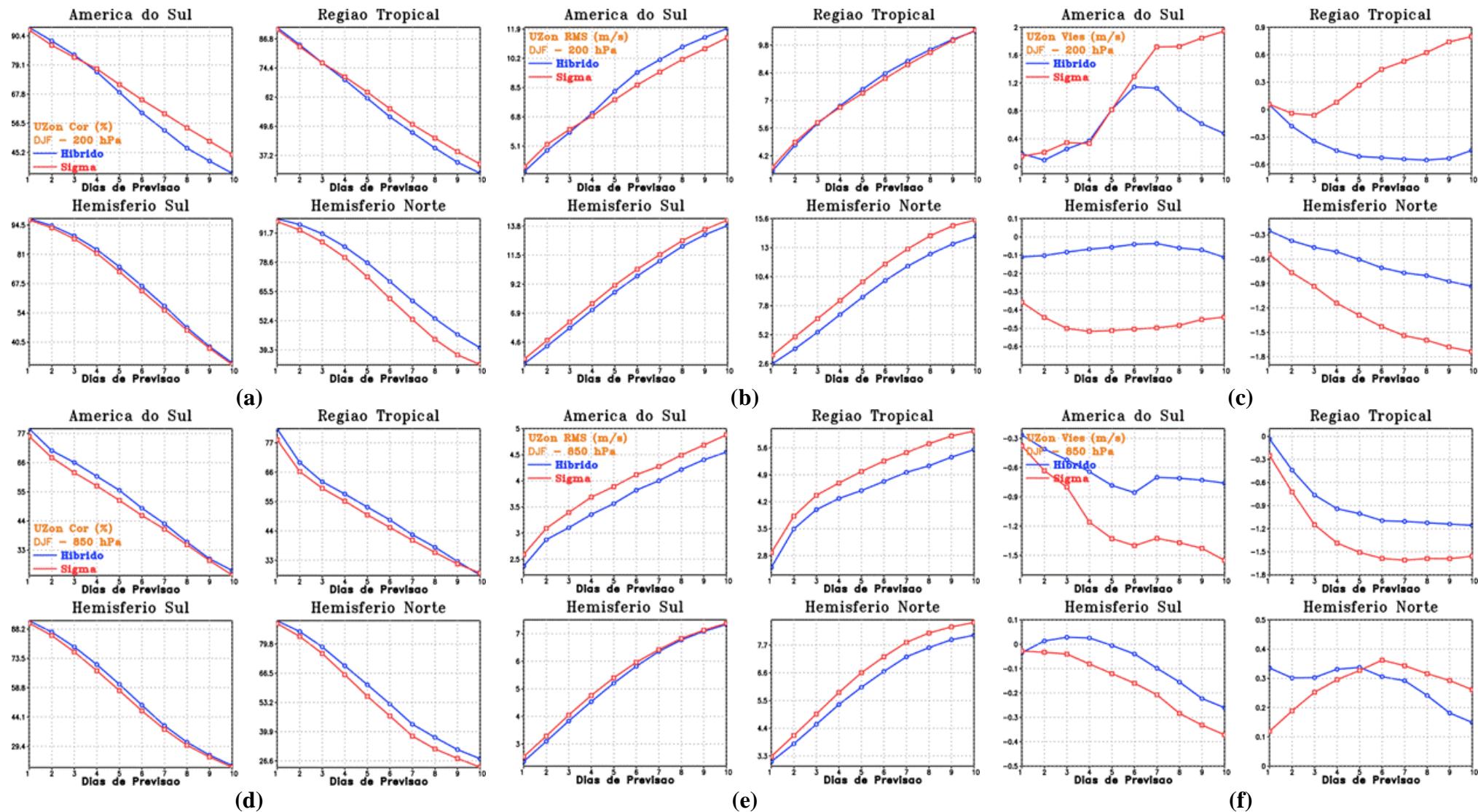


Figura 9 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio(b, e) e Viés (c,f) (uvel: 200 e 850 hPa)

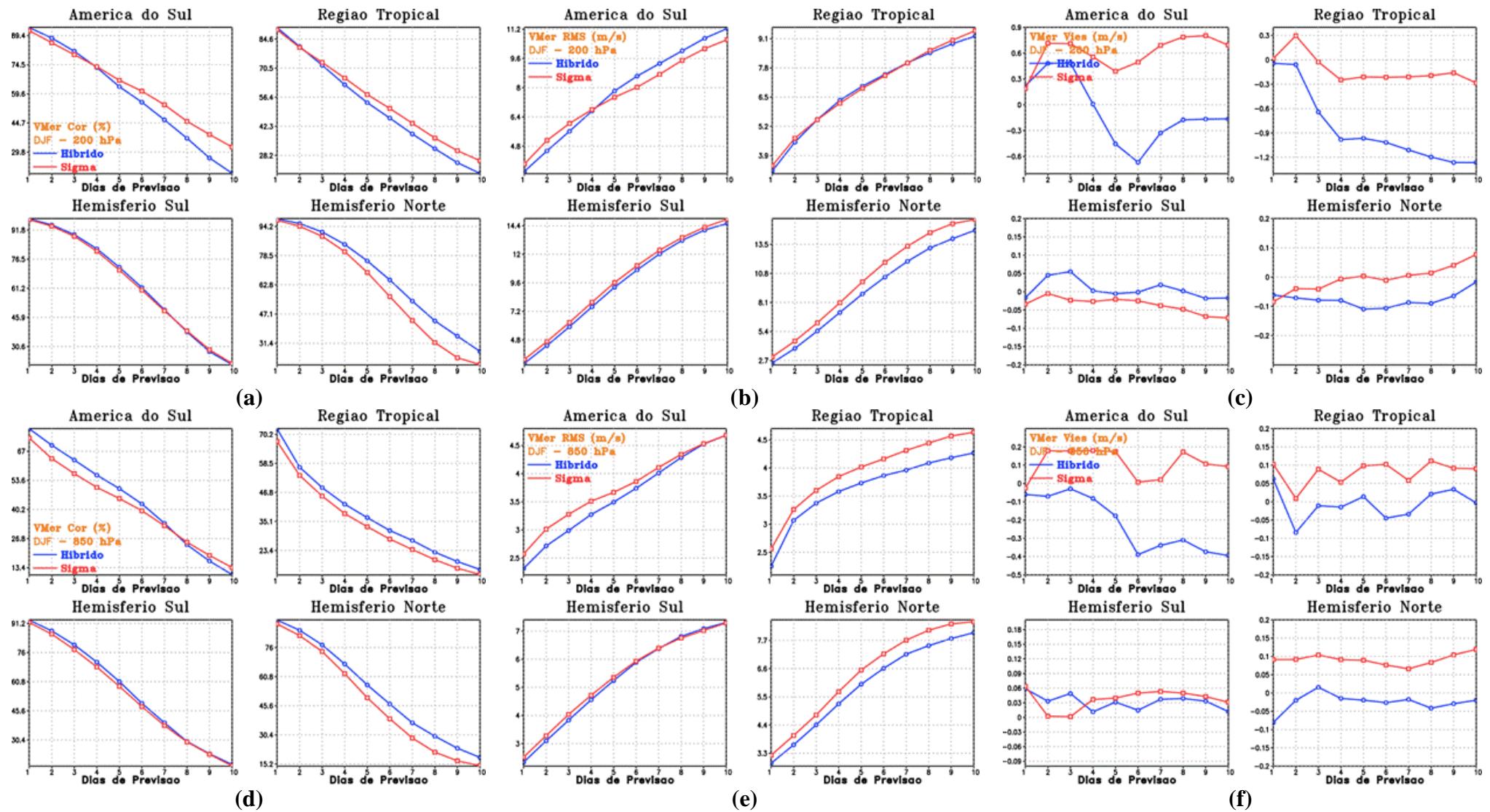


Figura 10 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio(b, e) e Viés (c,f) (vvel: 200 e 850 hPa)

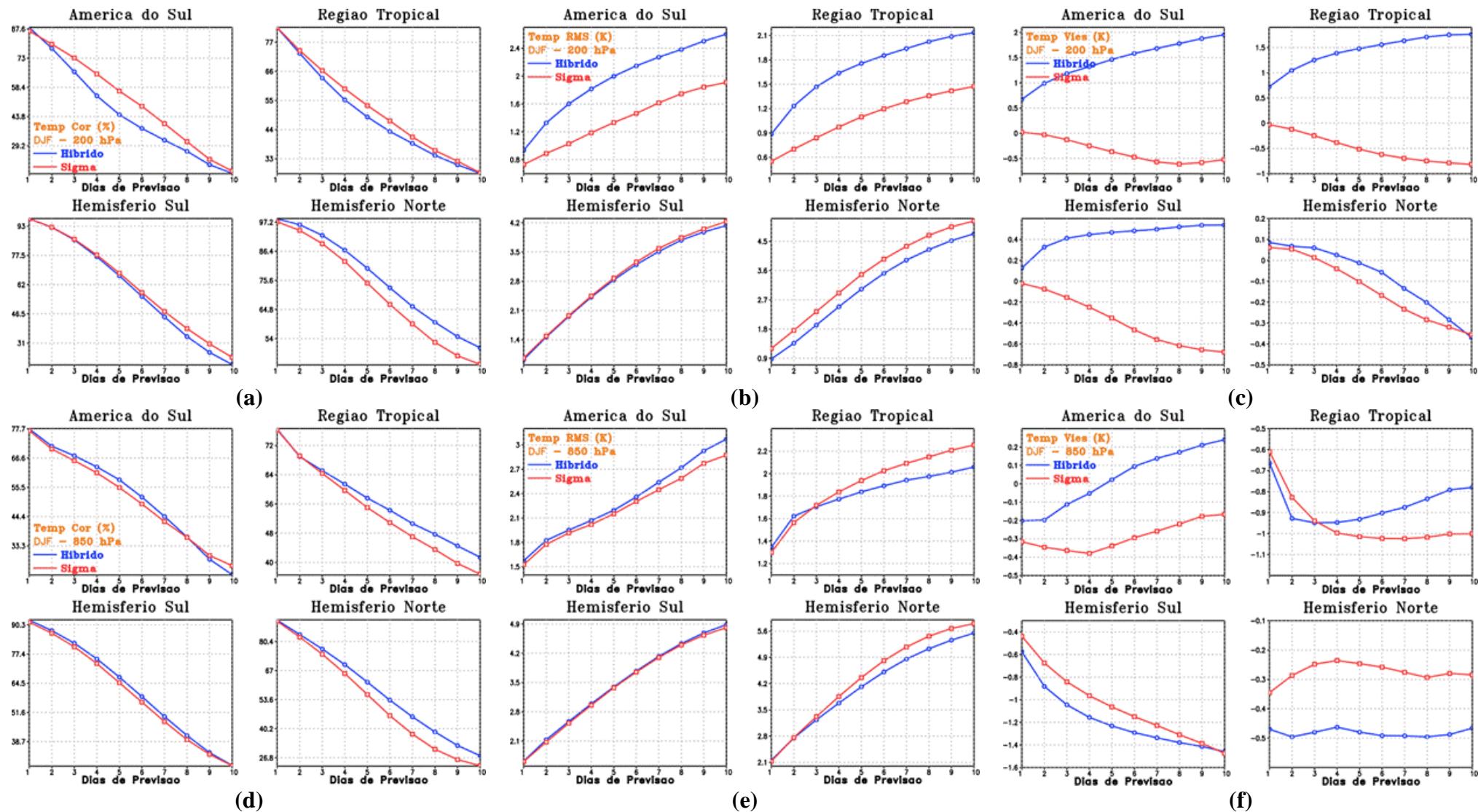


Figura 11 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio (b, e) e Viés (c,f) (temp: 200 e 850 hPa)

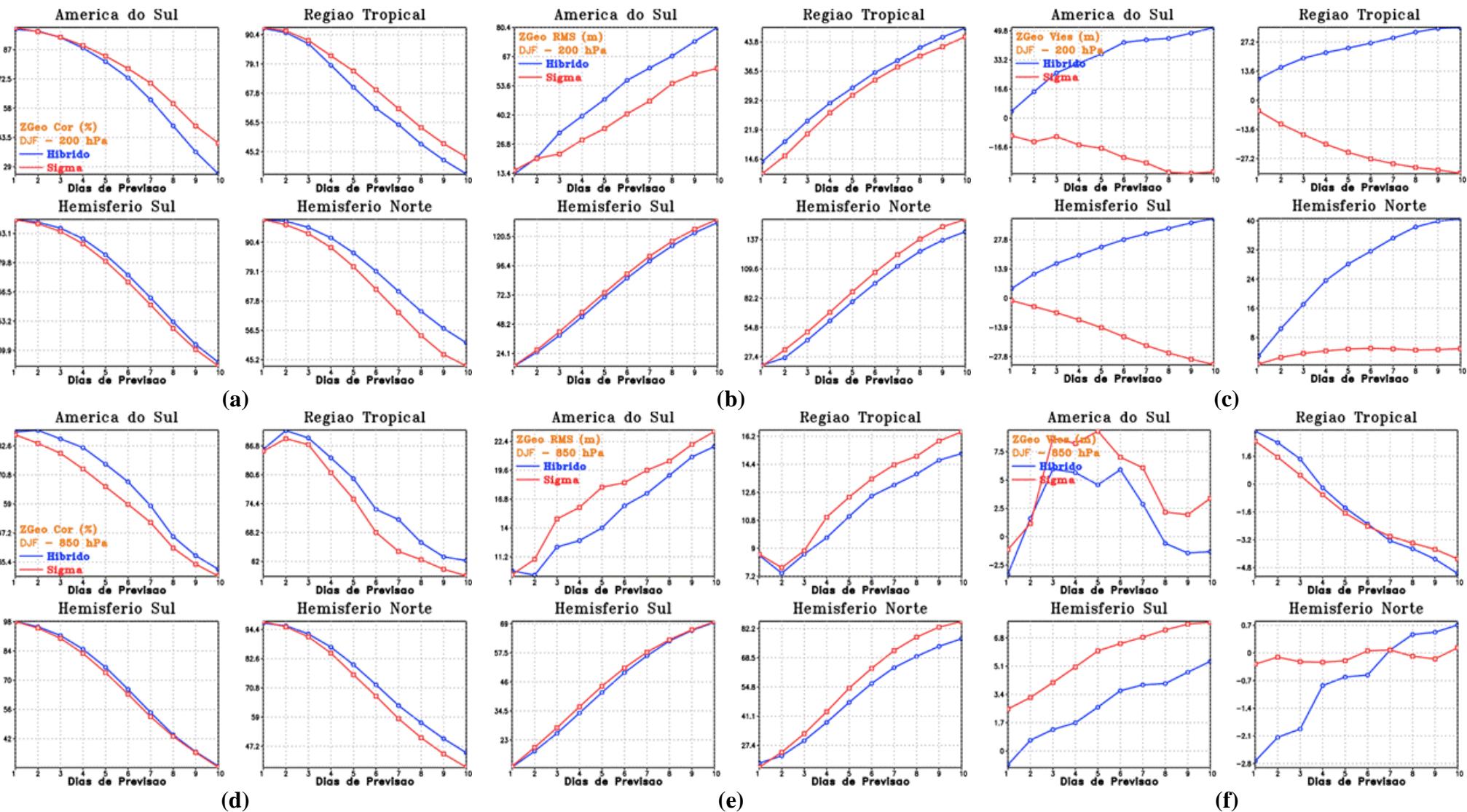


Figura 12 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio (b, e) e Viés (c, f) (zgeo: 200 e 850 hPa)

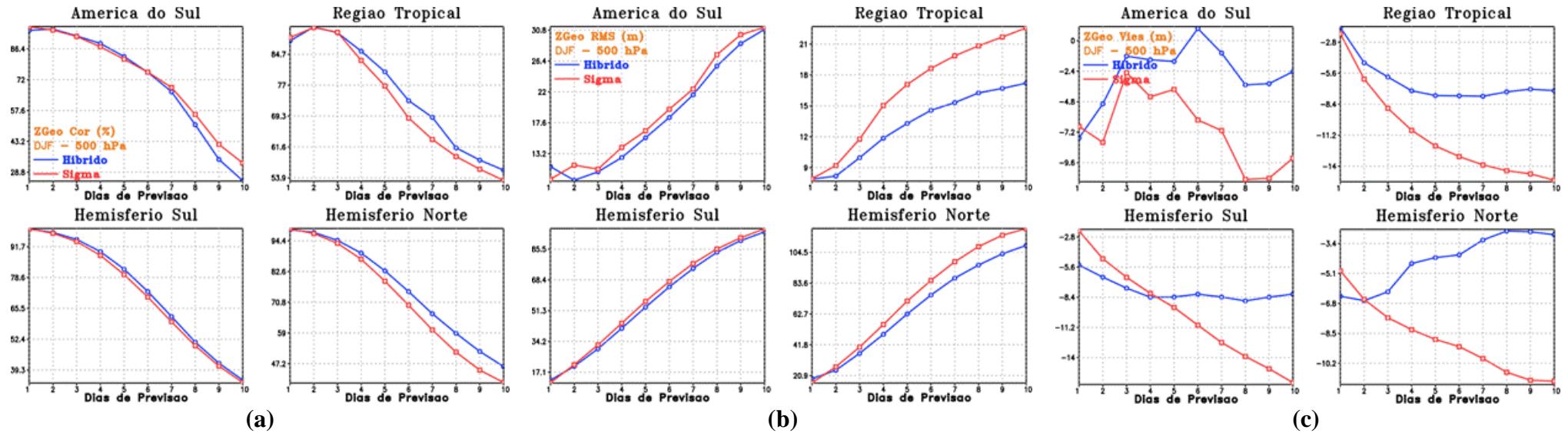


Figura 13 - Correlação de Anomalias (a), Erro Quadrático Médio(b) e Viés (c) (zgeo: 500 hPa)

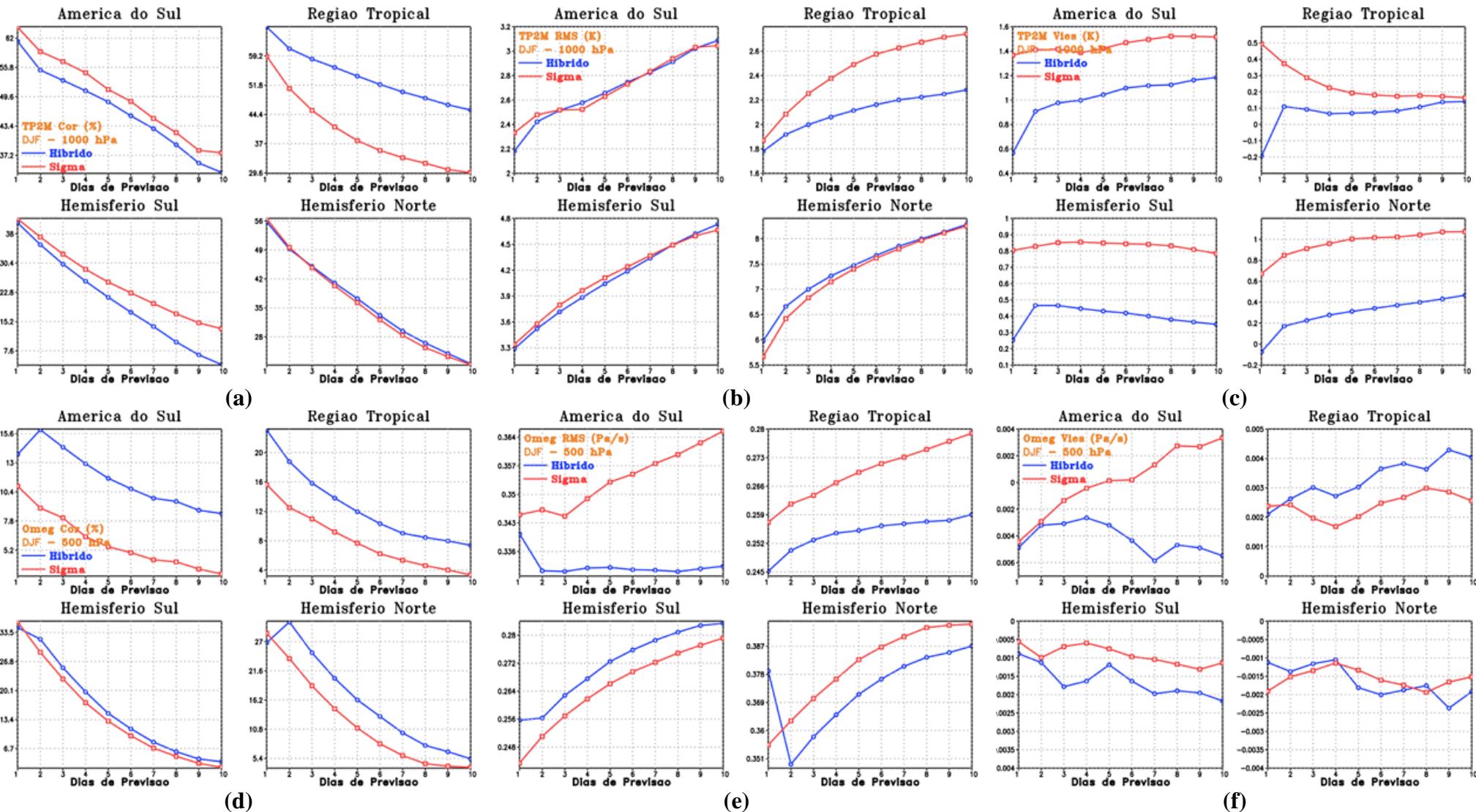


Figura 14 - Correlação de Anomalias (a, d), Erro Quadrático Médio (b, e) e Viés (c, f) (tp2m e omeg)

## **Comentários das análises estatísticas**

Uma análise geral das Figuras de 8 a 14 indica que o modelo BAM em coordenada híbrida tem melhor desempenho em relação ao BAM em coordenada sigma. Nas Figuras, verifica-se que na maior parte das variáveis analisadas do BAM em coordenada híbrida apresentam estatísticas melhores que as do BAM em coordenada sigma. Por exemplo, a performance do BAM em coordenada híbrida para correlação de anomalias e erro quadrático médio (RMS) apresentam maior número de resultados melhores em relação ao BAM em coordenada sigma.

Uma característica interessante do modelo em coordenada híbrida está na temperatura da atmosfera em 200 hPa, na região tropical. Nas análises do RMS, pode-se verificar que o modelo tem um maior erro quadrático médio nesta camada da atmosfera em relação ao BAM em coordenada sigma. Entretanto, no nível de 850hPa e à 2 metros este erro é maior no modelo BAM em coordenada sigma. Estes resultados podem estar relacionados ao ajuste da condição inicial as características do modelo BAM, em coordenada híbrida e sigma. As análises dos resultados indicam que a condição inicial está mais ajustada nas camadas verticais do modelo que usa coordenada sigma, principalmente em altos níveis. Esta diferença de desbalanço nos campos atmosféricos entre os modelos em coordenada híbrida e sigma gera uma maior fonte de erros, que se propagam para os outros horários das previsões.

O erro quadrático médio apresentado pelo BAM em coordenada híbrida na região tropical também influencia os vieses do campo de água precipitável e geopotencial em altos níveis. O maior valor de temperatura estimado pelo BAM em coordenada híbrida faz a atmosfera reter mais umidade induzindo os vieses positivos nos campos de água precipitável e geopotencial.

## **Conclusão:**

A performance do BAM em coordenada híbrida nas estatísticas calculadas supera de uma forma contundente a do BAM em coordenada sigma, sendo, portanto, uma versão mais adequada para ser considerada para entrar em operação.

## **5.7 Avaliação da precipitação da Simulação do BAM T666L64 sigma e híbrido**

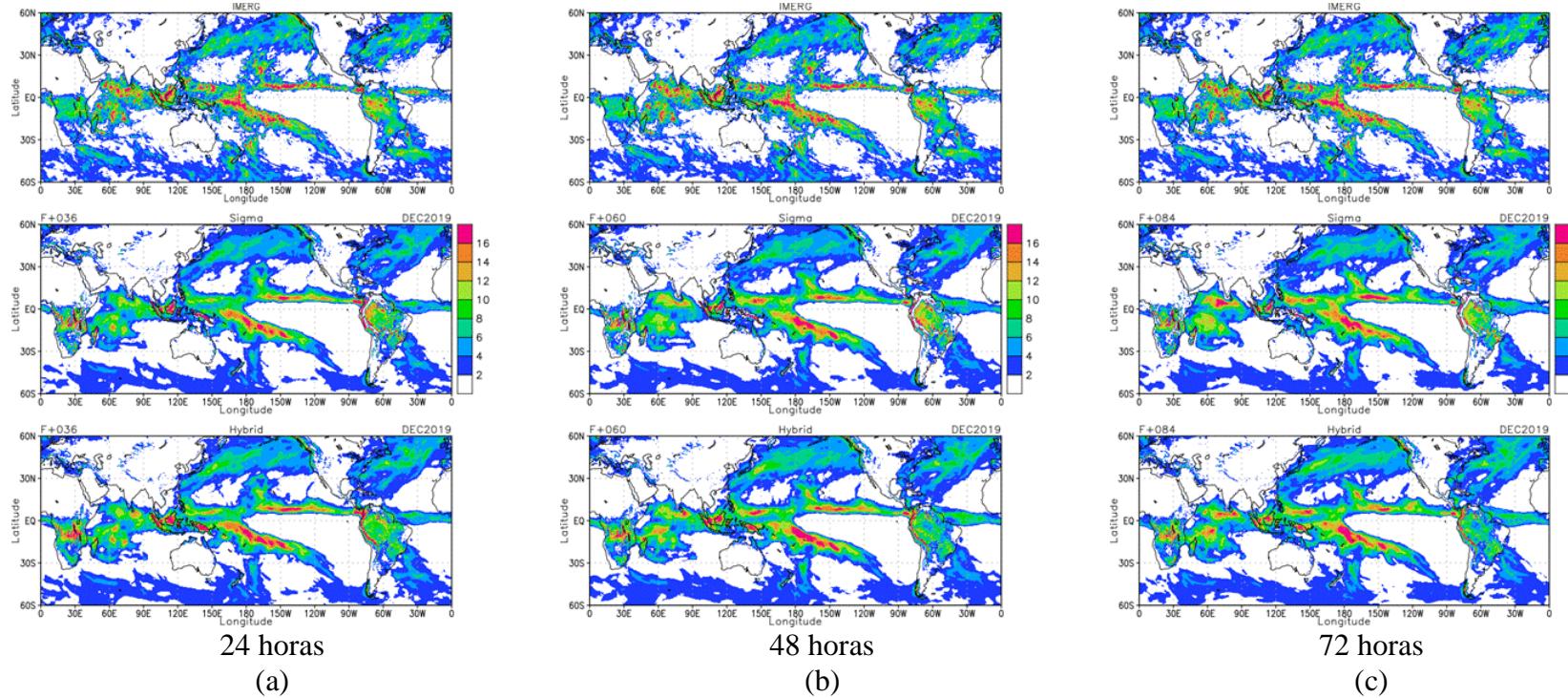
A validação do campo de precipitação simulado com o modelo BAM em coordenada híbrida é realizada através de duas etapas. A **primeira etapa** é em função de uma simples comparação da média da precipitação para as previsões de (24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168) horas. A **segunda etapa** da validação é realizada através da avaliação das métricas estatísticas apresentados na forma do diagrama de Taylor, onde optou-se por utilizar algumas regiões específicas e relevantes sobre a América do Sul (Tabela 5.6). As previsões foram realizadas somente para o horário das 00UTC e no período de 01 jan2020 à 31jan2020.

Com o objetivo de visualizar o padrão global de grande escala da distribuição da precipitação e analisar as regiões com grande atividade convectiva, optou-se por calcular as médias mensais do campo global de precipitação para as previsões de (24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168) horas. Estas médias mensais foram calculadas usando as previsões do modelo BAM em coordenada sigma, que está sendo usado operacionalmente do INPE e o BAM em coordenada híbrida que está em avaliação. Todos os campos são comparados com a médias mensais de precipitação do mês de janeiro de 2020 obtida com os dados do IMERG (Rozante et al, 2020).

### **5.7.1 Análise da Precipitação de Grande Escala**

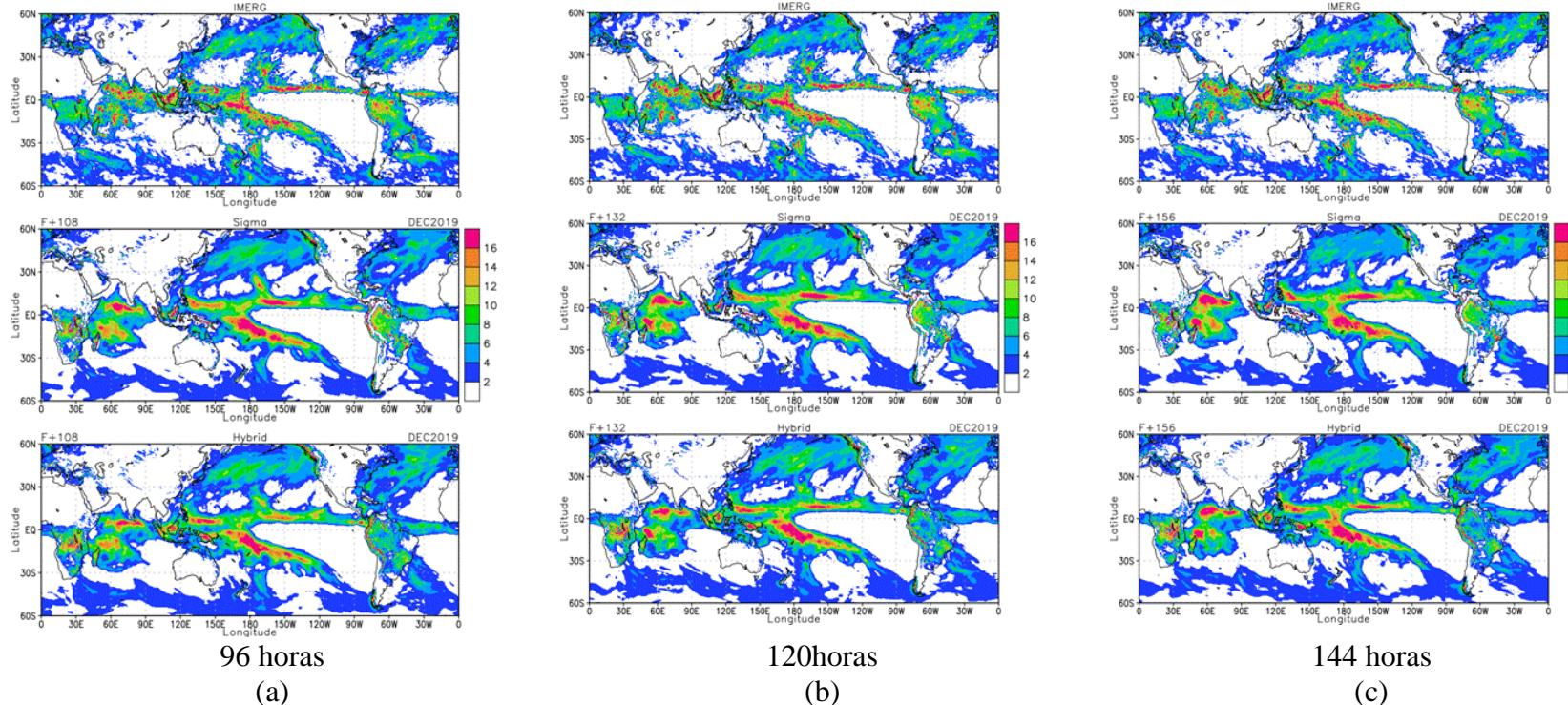
As Figuras 15 a 17 apresentam o padrão de grande escala da previsão de precipitação para 24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 horas, simulada com o modelo BAM em coordenada sigma, híbrida e os dados de precipitação do IMERG.

A Figura 15 apresenta a média mensal para janeiro de 2020 da previsão de precipitação de 24, 48 e 72 horas realizadas com o modelo BAM em coordenada sigma e híbrida. A maior diferença entre as previsões realizadas com o modelo BAM, em coordenada sigma e híbrida, está sobre a região amazônica e a leste da Cordilheira dos Andes. A previsão de precipitação de 24, 48 e 72 horas realizada com o modelo BAM em coordenada híbrida apresenta uma menor precipitação sobre a região Amazônica. A leste da Cordilheira dos Andes não apresenta um vale de déficit de precipitação como verificado nas previsões com o BAM em coordenada sigma. A comparação com os dados do IMERG ambos os modelos apresentam estrutura espacial de precipitação semelhantes.



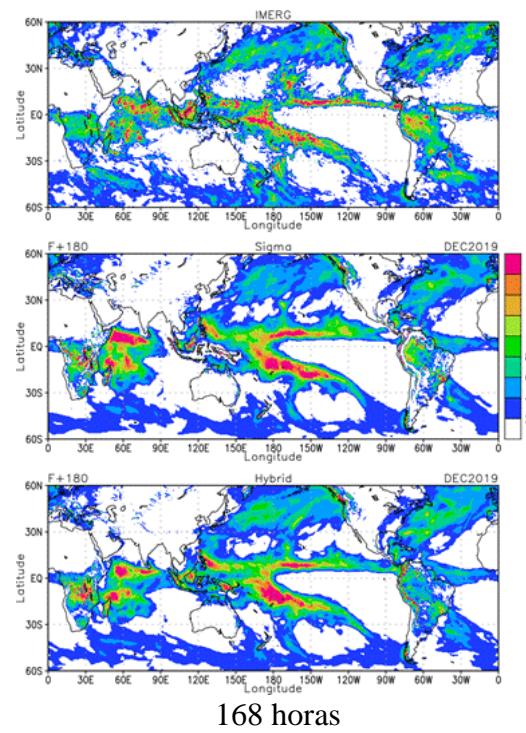
**Figura 15 - Média para janeiro de 2020 do campo de precipitação dos dados do IMERG, BAM sigma e BAM híbrido para a previsão de 24, 48 e 72 horas.**

A Figura 16 apresenta a média mensal para janeiro de 2020 da previsão de precipitação de 96, 120 e 144 horas. As análises dos resultados são as mesmas para a Figura 15. Entretanto, verifica-se que a distribuição espacial de precipitação sobre a América do Sul simulada com o modelo BAM em coordenada híbrida está mais próxima aos dados do IMERG, em relação a distribuição espacial de precipitação simulada com o modelo BAM em coordenada sigma.



**Figura 16 - Média para janeiro de 2020 do campo de precipitação dos dados do IMERG, BAM sigma e BAM híbrido para a previsão de 96, 120 e 168 horas.**

A Figura 17 apresenta a média mensal para janeiro de 2020 para previsão de precipitação de 168 horas. Nesta Figura fica evidente, que após 168 horas de integração a distribuição espacial de precipitação simulada com o modelo BAM em coordenada híbrida se aproxima mais aos dados do IMERG. No caso da previsão com o BAM em coordenada sigma a previsão tende a divergir dos dados do IMERG principalmente sobre a América do Sul.



168 horas

(a)

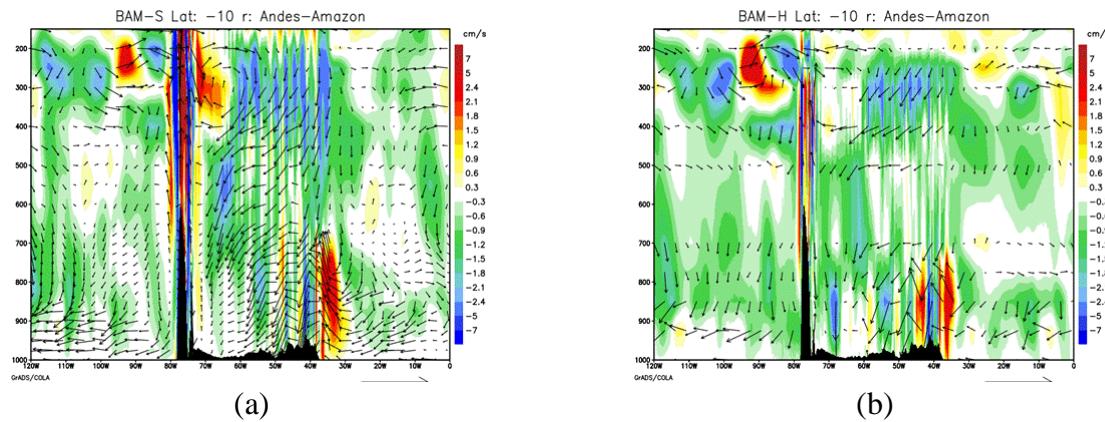
**Figura 17 - Média para janeiro de 2020 do campo de precipitação dos dados do IMERG, BAM sigma e BAM híbrido para a previsão de 96, 120 e 168 horas.**

**Tabela 5.6 -Análise de grande Escala BAM Híbrido comparado com BAM sigma**

Area	BAM Híbrido	Sigma X Híbrido
Oceano Indico	Boa comparação com IMERG	similar
ITCZ do Pacífico	Boa comparação com IMERG	similar
ITCZ do Atlântico	Boa comparação com IMERG	similar
SPCZ -híbrido	Boa comparação com IMERG	similar
Storm tracks HN	Boa comparação com IMERG	similar
Storm tracks HS	Boa comparação com IMERG	similar
USA-CANADA	Boa comparação com IMERG	similar
EUROPE	Boa comparação com IMERG	similar
AFRICA	Boa comparação com IMERG	Híbrido melhor
SOUTH AMERICA	Boa comparação com IMERG	Híbrido melhor

As análises dos padrões globais de grande escala das previsões de precipitação são muito similares entre o modelo BAM em coordenada sigma e híbrida. Entretanto, para previsões acima de 144 horas o padrão global de grande escala da precipitação das previsões realizados com o BAM em coordenada híbrida são melhores em relação ao BAM em coordenada sigma.

As previsões realizadas com o BAM em coordenada sigma simula um padrão da precipitação na região Amazônica melhor em relação ao BAM em coordenada híbrida. As análises de outros campos atmosféricos indicam que o modelo BAM em coordenada sigma cria uma barreira irrealista em altos níveis ao longo da Cordilheira do Andes (Figura 18a). Esta barreira irrealista modifica e perturba o escoamento e o transporte de umidade, portanto, a perturbação no escoamento pode gerar oscilações que induzem a instabilidade na atmosfera e o aumento da precipitação na região Amazônica. Esta barreira irrealista não é observada no modelo em coordenada híbrida (Figura 18 b).

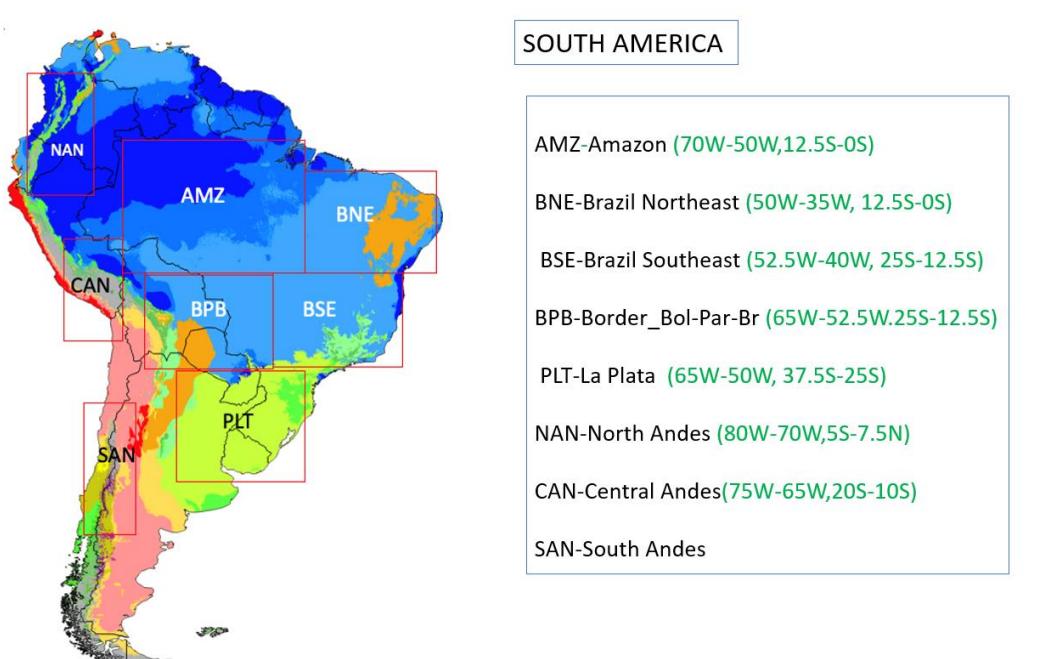


**Figura 18 - Média do perfil vertical da circulação sobre a região Amazônia na latitude de 10° S. Sombreado velocidade ascendente (+) e descendente (-). (a) Sigma e (b) Híbrido**

A Figura 18 apresenta sobre a região da cordilheira Andes-Amazônia as circulações das correntes ascendentes e descendentes. O modelo BAM em coordenada sigma produz correntes ascendentes alinhado com o pico da topografia e descendentes a leste e oeste do pico de topografia mais alta. Sobre a Amazônia (60W) existe uma subsidênciam no modelo BAM em coordenada sigma, porém de menor magnitude do que a obtida com o modelo BAM, em coordenada híbrida. A configuração de circulação contribui para a estrutura espacial e a intensidade de precipitação nos dois modelos. Na região oeste dos Andes o modelo BAM em coordenada híbrida apresenta uma subsidênciam mais estruturada podendo auxiliar na formação de nuvens estratos sobre o Oceano Pacífico.

### 5.7.2 Análise estatística da precipitação sobre a América do Sul

Para analisar o ganho na qualidade da previsão do campo precipitação simulado pelo modelo BAM em coordenada híbrida, optou-se por realizar uma análise mais detalhadas sobre algumas regiões de interesse sobre a América do Sul. Nestas regiões foram calculadas métricas estatísticas (raiz do erro médio quadrático, correlação, etc) que ajudam a analisar o ganho na qualidade da previsão. As áreas selecionadas para a análise estão apresentadas na Figura 19.



**Figura 19 - Áreas de impacto na precipitação sobre a América do Sul**

A Figura 20 mostra a análise estatística para a região Amazônica (AMZ) e para o nordeste brasileiro (BNE), todas a métricas estão apresentadas na forma do diagrama de Taylor.

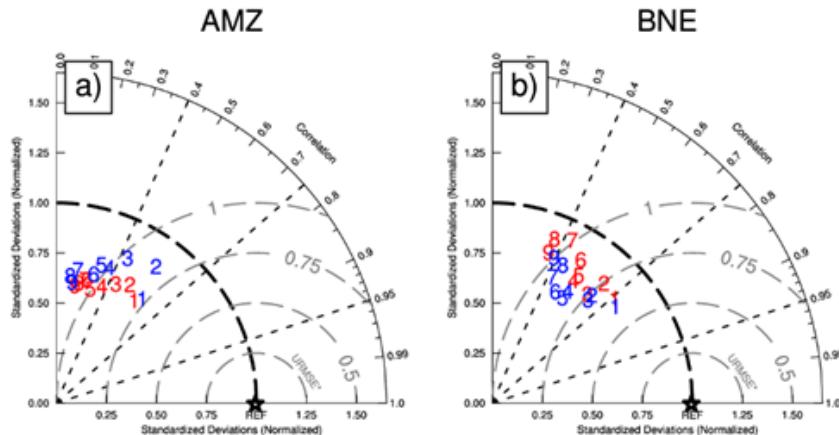
Na região AMZ (Figura 20a) verifica-se que os valores de RMSE para as previsões de 1 a 7 dias realizada com o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma no período de 01/022020 à

31/02/2020 apresentam valores similares. Entretanto, o modelo BAM em coordenada híbrida apresenta em alguns horários de previsão valores de RMSE melhores em relação ao BAM em coordenada sigma. Por exemplo, a previsão de 1 dia os valores de RMSE são similares, para 2, 3 e 4 dias o modelo BAM em coordenada híbrida apresenta um RMSE menor, e nas previsões de 5, 6 e 7 dias os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma são similares.

A correlação da precipitação dos modelos e o IMERG na região AMZ, também aponta uma melhoria na previsão do campo de precipitação em maior parte dos dias de previsão com o modelo BAM em coordenada híbrida, onde verifica-se resultados similares ou melhores em relação ao BAM em coordenada sigma. O modelo BAM em coordenada híbrida apresenta uma variância similar para o dia 1, entretanto, para o dia 2 e 3 a variância é melhor no BAM em coordenada sigma, mas para previsão mais longa o BAM em coordenada híbrida é melhor.

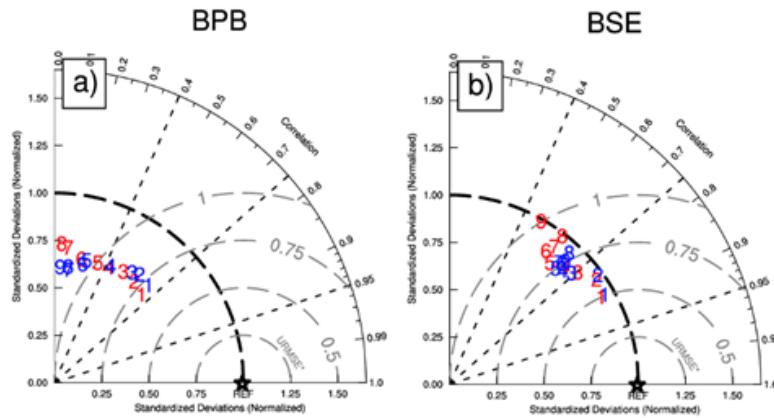
Sobre a região do Nordeste Brasileiro BNE (Figura 20b) verifica-se que o RMSE, CORR e a VAR nas primeira 24 horas de previsão o modelo BAM em coordenada sigma e híbrida apresentam resultados similares para os índices estatísticos e para os outros horários de previsão o modelo BAM em coordenada híbrida melhora em relação ao modelo BAM em coordenada sigma.

Em resumo sobre o Nordeste Brasileiro o modelo BAM em coordenada híbrida é sempre melhor que o modelo BAM em coordenada sigma. E na região Amazônica os resultados são similares, havendo para o modelo BAM em coordenada híbrida melhorias para previsões acima de 168 horas.



**Figura 20 - Diagrama de Taylor para a área da região Amazônica (AMZ) e Nordeste Brasileiro (BNE).**

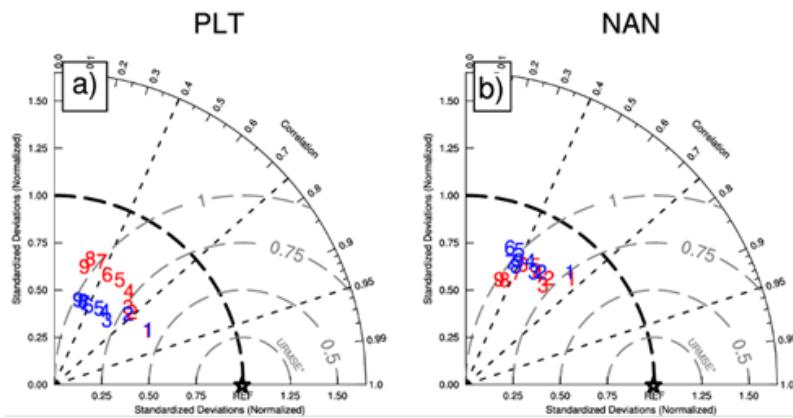
A Figura 21 apresenta as análises estatísticas para as regiões Bolívia-Paraguai-Brasil (BPB) (a) e Sudeste do Brasil (BSE) (b). As previsões realizadas com os modelos BAM em coordenada sigma e híbrida para a região da Bolívia-Paraguai-Brasil BPB (Figura 21a) apresentam resultados similares, entretanto não há como concluir qual a versão do modelo BAM é melhor, pois os índices estatísticos são melhores ou piores dependendo do modelo BAM. Sobre a região sudeste do Brasil (Figura 21b) os índices estatísticos indicam o modelo BAM em coordenada híbrida tem resultados melhores em relação ao BAM em coordenada sigma.



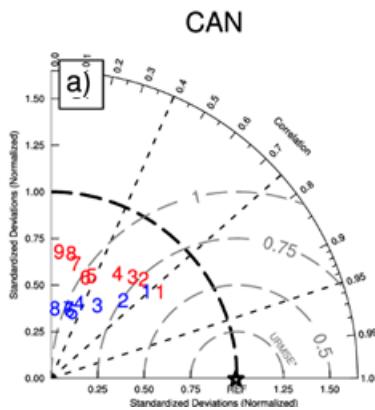
**Figura 21 - Diagrama de Taylor para a área da região Bolívia-Paraguai-Brasil (BPB) e Sudeste do Brasil (BSE).**

A Figura 22 apresenta as análises estatísticas para as regiões La Plata (PLT) (a) e Norte dos Andes (NAN) (b) e Figura 23 para Andes Central (CAN). As análises das três regiões indicam que o modelo BAM em coordenada híbrida apresenta um resultado estatisticamente melhor em relação ao modelo em coordenada sigma.

Portanto, após analisar todas as regiões de interesse concluiu-se que na maior parte da América do Sul o modelo BAM em coordenada híbrida é melhor que o modelo em coordenada sigma.



**Figura 22 - Diagrama de Taylor para a área da região La Plata (PLT) e Norte dos Andes (NAN).**



**Figura 23 - Diagrama de Taylor para a área da região dos Andes Central (CAN).**

## 5.8 Avaliação de Campos Espaciais do modelo BAM T666L64 Sigma e híbrido

### 5.8.1 Temperatura a 2 metros

A variável de temperatura a 2 metros é avaliada em função do bias e da raiz quadrada do erro quadráticos médio. A validação do campo de temperatura a 2 metros simulado com o modelo BAM em coordenada híbrida é realizada em função das previsões de 24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 horas. As previsões foram realizadas somente para o horário das 00UTC e no período de 01/jan2020 à 31jan2020.

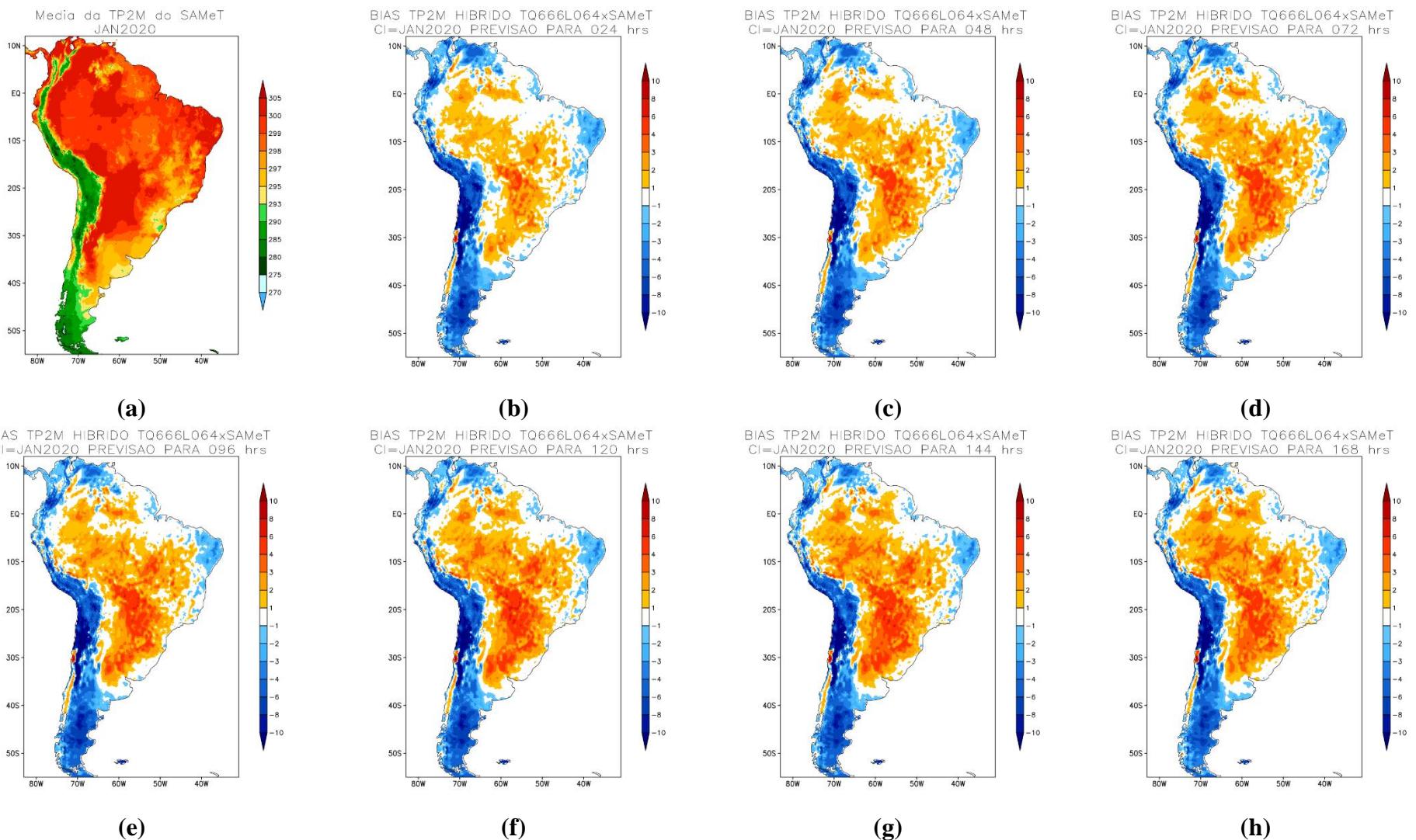
As médias mensais do bias e do RMSE foram calculadas usando as previsões do modelo BAM em coordenada sigma (operacional no INPE) e o BAM em coordenada híbrida que está em avaliação. Todos os campos de temperatura à 2 metros são avaliados com os dados diários de temperatura a 2 metros do SAMet do mês de janeiro de 2020 (Rozante et al, 2021).

Os mapas de bias para as previsões de 24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 horas são mostrados nas Figuras 24 a 27. Uma análise geral mostra que os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma têm erros de superestimativa de temperatura a 2 metros no interior do continente, principalmente sobre a Bacia do Prata, e uma subestimativa de temperatura na região da Cordilheira dos Andes de norte a sul do continente da América do Sul. Baseado no padrão dos erros, pode-se supor que a inicialização da temperatura do solo e das copas precisam ser inicializados com dados de temperatura mais realistas. Atualmente, os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma utilizam para a inicialização da atmosfera, a temperatura do primeiro nível da análise.

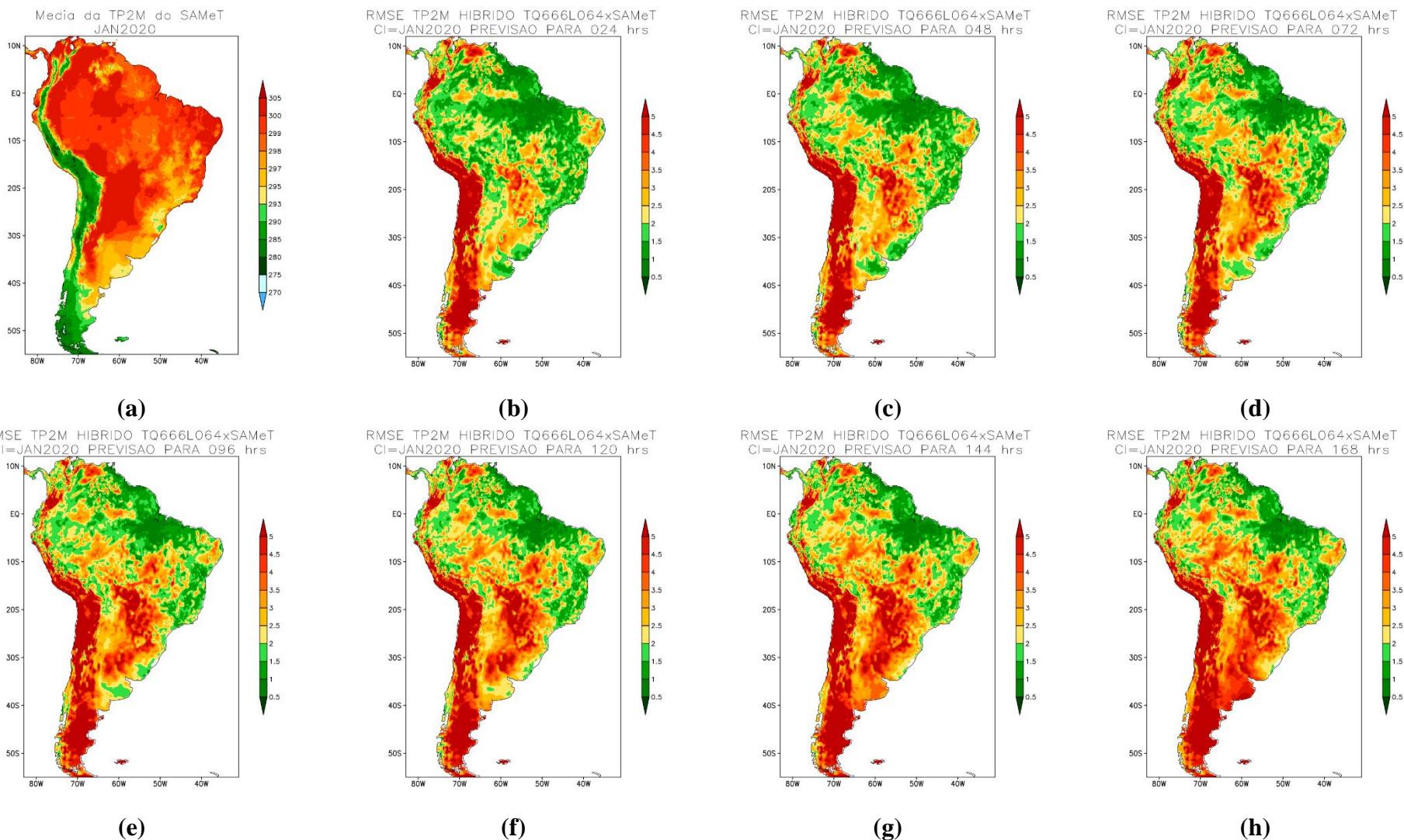
Na costa leste dos Cordilheira dos Andes o modelo BAM em coordenada sigma mostra um bias menor em relação ao bias do modelo BAM em coordenada híbrida. Entretanto, este resultado de

menor bias do modelo BAM em coordenada sigma pode ser em função da coordenada vertical utilizada nos modelos e do tipo de difusão horizontal de temperatura.

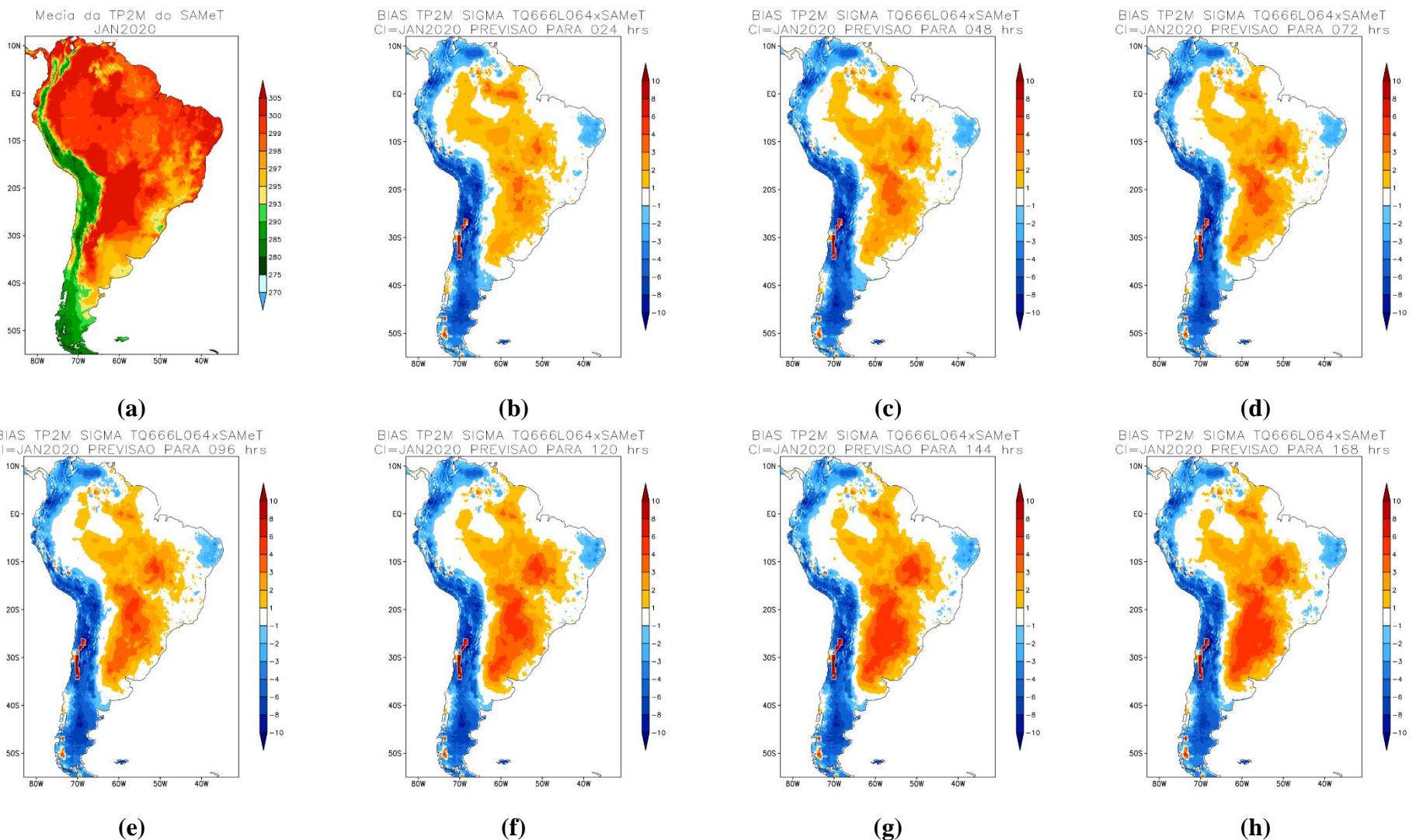
O modelo BAM é um modelo espectral e próximo onde há topografias altas a transformada espectral gera o efeito Gibbs (ondulações), que no espaço físico (malha) numericamente cria vales e montanhas artificiais. As ondulações geradas nos campos atmosféricos devido a topografia real e aos vales e montanhas artificiais podem se propagar até o topo do modelo devido a coordenada sigma. A coordenada híbrida minimiza a propagação vertical das ondulações devido a topografia, eliminando a deficiência apresentada na coordenada sigma. O tipo de difusão horizontal de temperatura também é uma diferença significativa entre os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma. O modelo BAM em coordenada sigma aplica a difusão horizontal de temperatura no espaço espectral e o modelo BAM em coordenada híbrida aplica em ponto de grade. A característica mais local da difusão em ponto de grade ajuda a destacar mais os efeitos locais em relação a difusão horizontal aplicada no espaço espectral



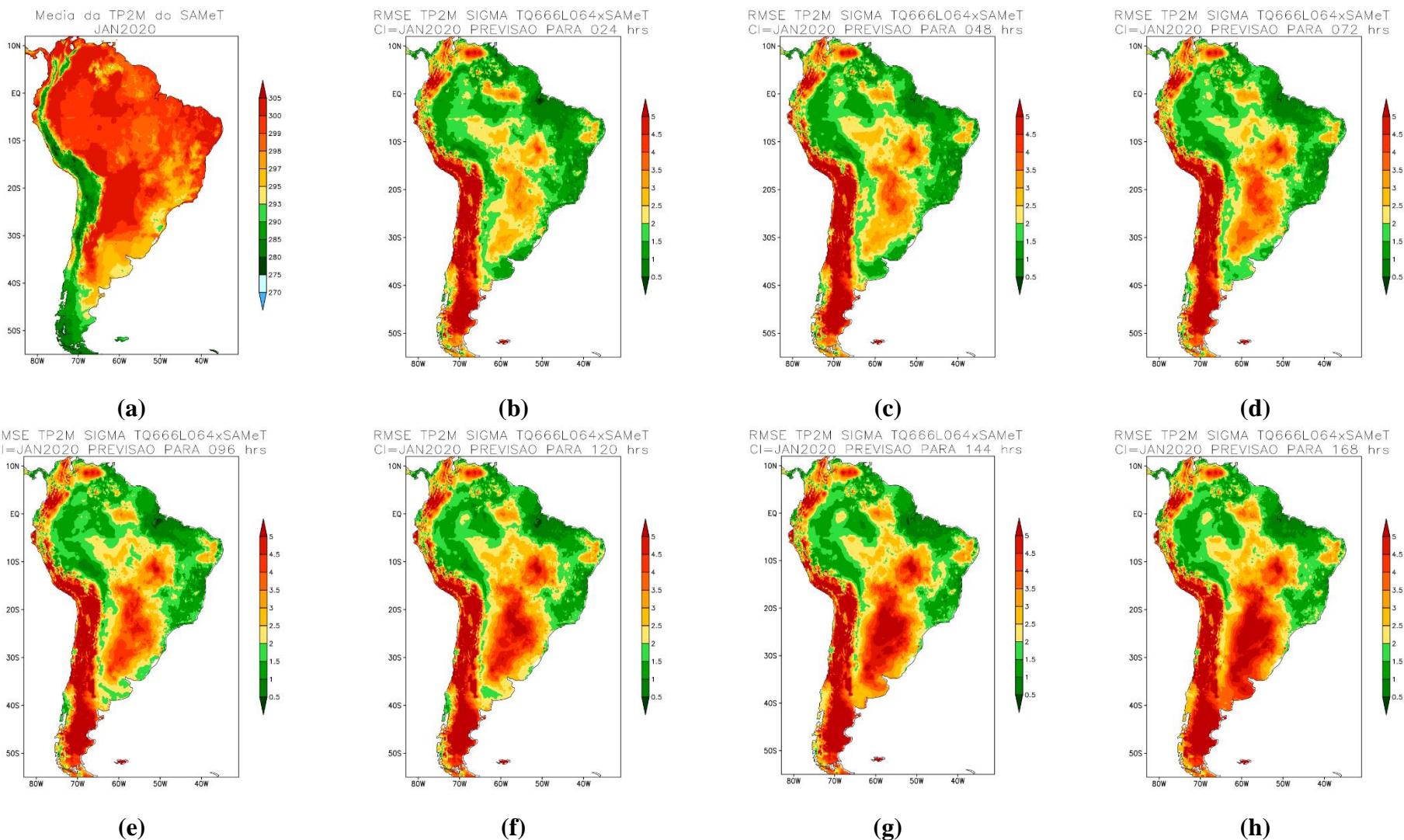
**Figura 24 - Distribuição espacial do Bias de temperatura a 2 metros para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 25 - Distribuição espacial do RMSE de temperatura a 2 metros para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 26 - Distribuição espacial do Bias de temperatura a 2 metros para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**

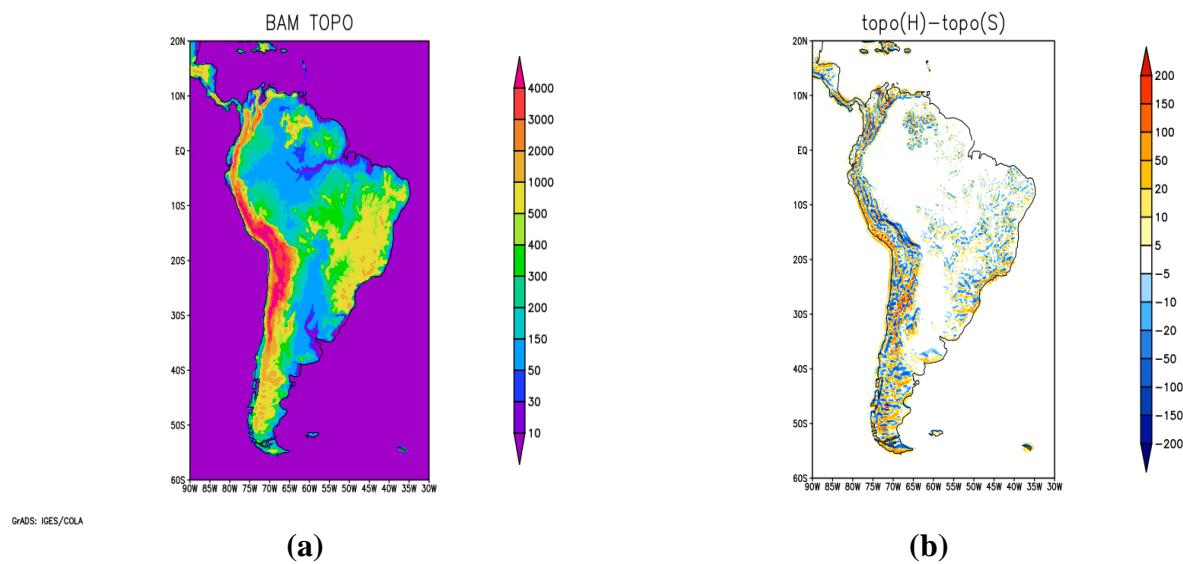


**Figura 27 - Distribuição espacial do RMSE de temperatura a 2 metros para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**

Portanto, a escolha de coordenada vertical e do tipo de difusão horizontal do modelo influencia diretamente no bias e RMSE das simulações do modelo.

A influência destes dois fatores também pode ser verificada na análise de precipitação, onde o modelo BAM em coordenada sigma gera um vale de déficit de precipitação a leste da Cordilheira dos Andes e no modelo em coordenada híbrida este déficit de precipitação é corrigido.

O impacto da topografia (Figura 28) no bias e RMSE da temperatura a 2 metros não são conclusivos, existe a necessidade de mais análises e provavelmente a topografia influencia nos erros em algumas regiões. Por exemplo, verifica-se que os maiores erros se concentram na região da Bacia do Prata entre a Cordilheira dos Andes e o planalto Central brasileiro.



**Figura 28 - Topografia do modelo BAM e a diferença entre a topografia do modelo BAM Híbrido e Sigma**

Através das análises do bias e RMSE da temperatura a 2metros pode-se concluir que o modelo em coordenada híbrida mostra uma menor distribuição de erros sobre a América do Sul em relação ao modelo em coordenada sigma.

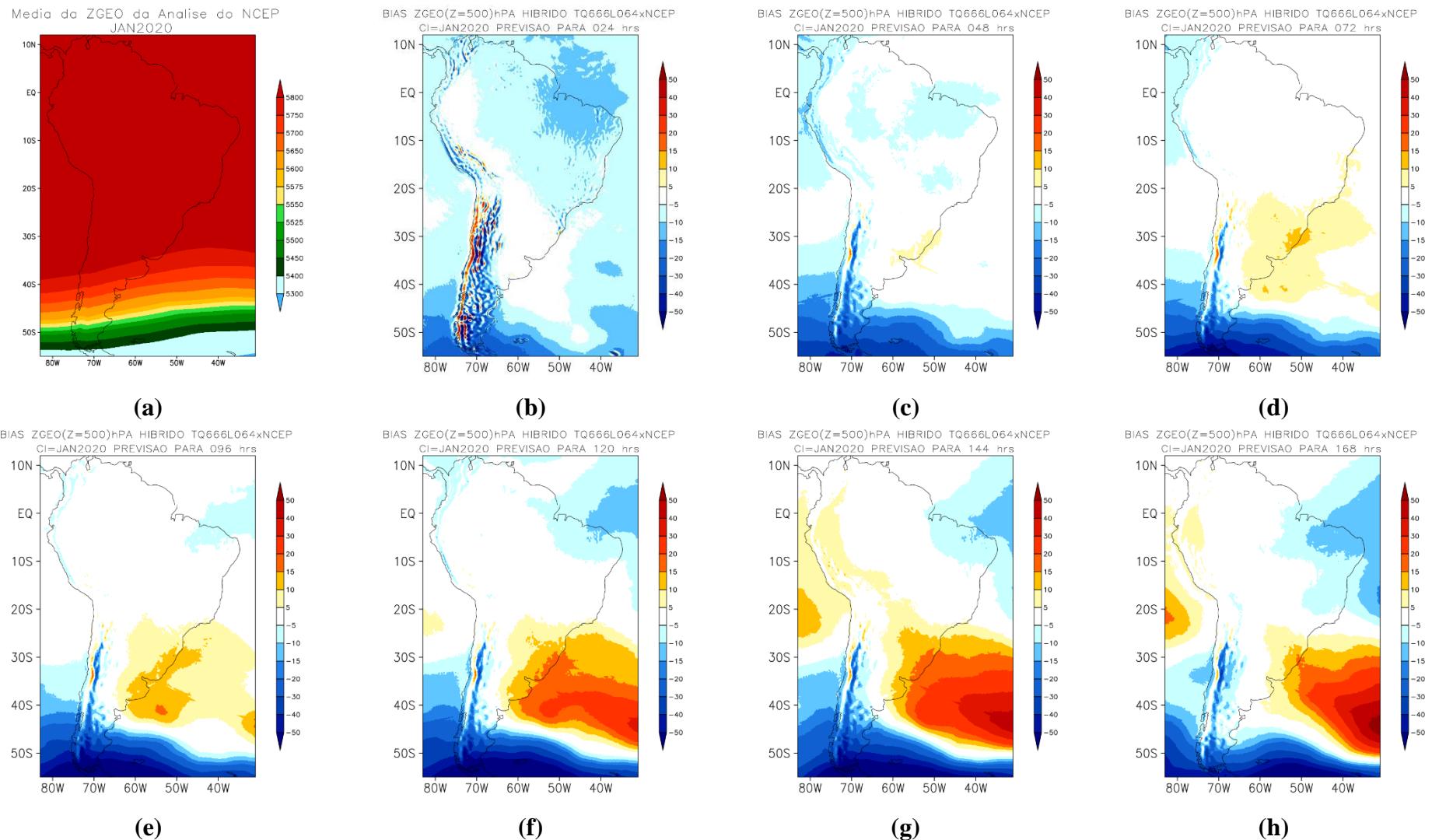
## **5.8.2 Geopotencial**

O fato da variável geopontencial ( $z_{geo}$ ) estar relacionada à energia potencial da coluna atmosférica, a sua avaliação caracteriza-se por ser importante para analisar os processos termodinâmicos da atmosfera e ao deslocamento de sistemas frontais em latitudes médias.

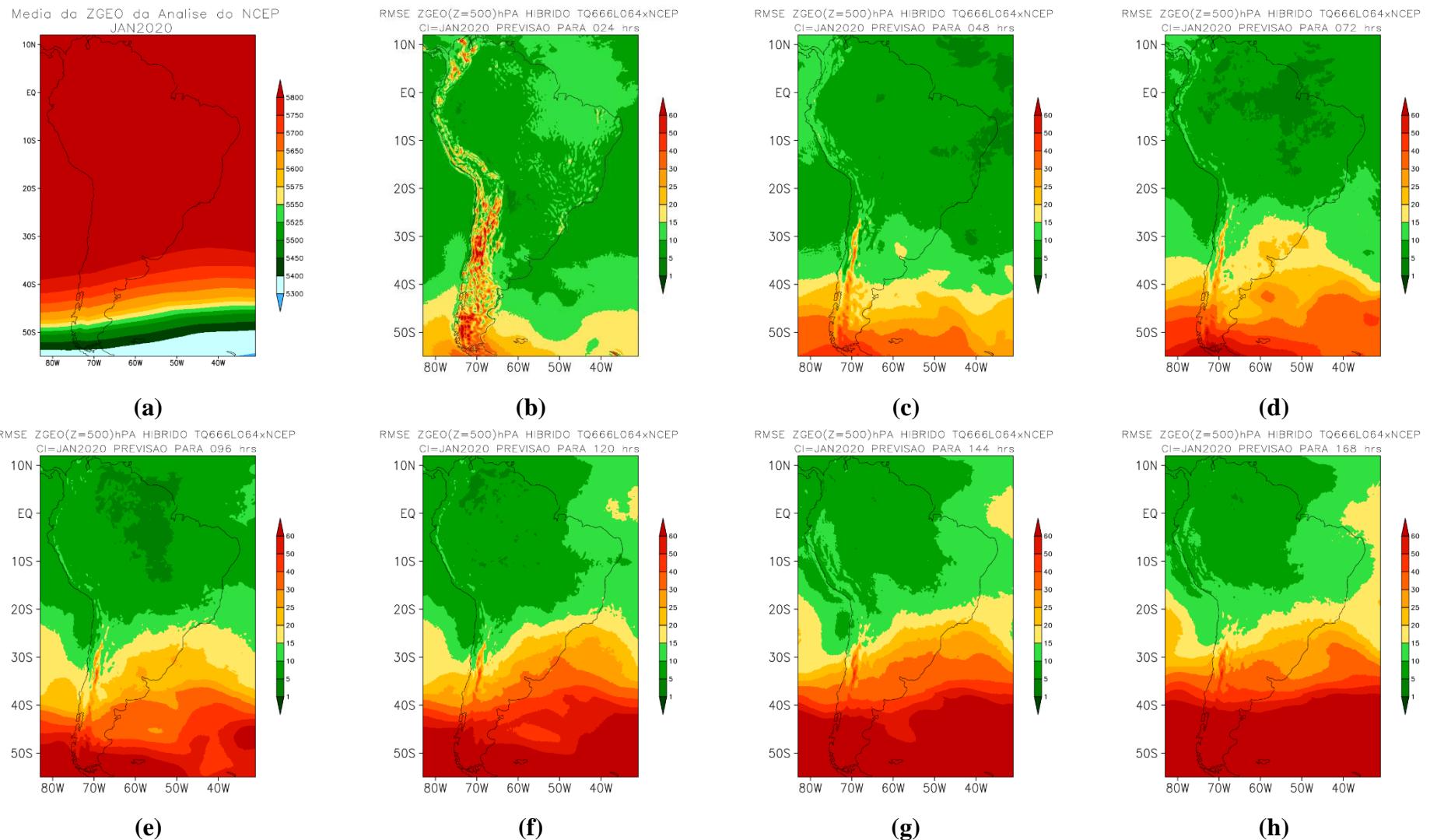
Os cálculos dos bias e RMSE do geopotencial em 500 hPa (Figuras 29 a 32) foram realizados para as previsões dos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma referentes ao período de janeiro de 2020, onde optou-se em analisar os horários de 24 a 168 horas de previsão. Os índices estatísticos utilizaram com base de cálculo os dados de geopotencial da análise do NCEP.

A análise do bias mensal (erro) (Figuras 29 e 31) de janeiro de 2020 indica que na região tropical da América do Sul, o erro no geopotencial em 500 hPa é baixo, indicando que os modelos simulam bem a compressão e a expansão da coluna atmosférica devido aos processos termodinâmicos. Entretanto, nas latitudes médias o erro no geopotencial em 500 hPa é maior em relação a região tropical. Verifica-se a persistência de área de bias positivos nos campos de geoptencial em latitudes médias ao longo das previsões. Estas áreas são maiores no modelo BAM em coordenada híbrida em relação à coordenada sigma. Estes bias positivos são indicativos de que nesta região houve uma maior variabilidade das previsões do posicionamento dos sistemas frontais em relação ao posicionamento dos sistemas frontais definido pelas análises do NCEP.

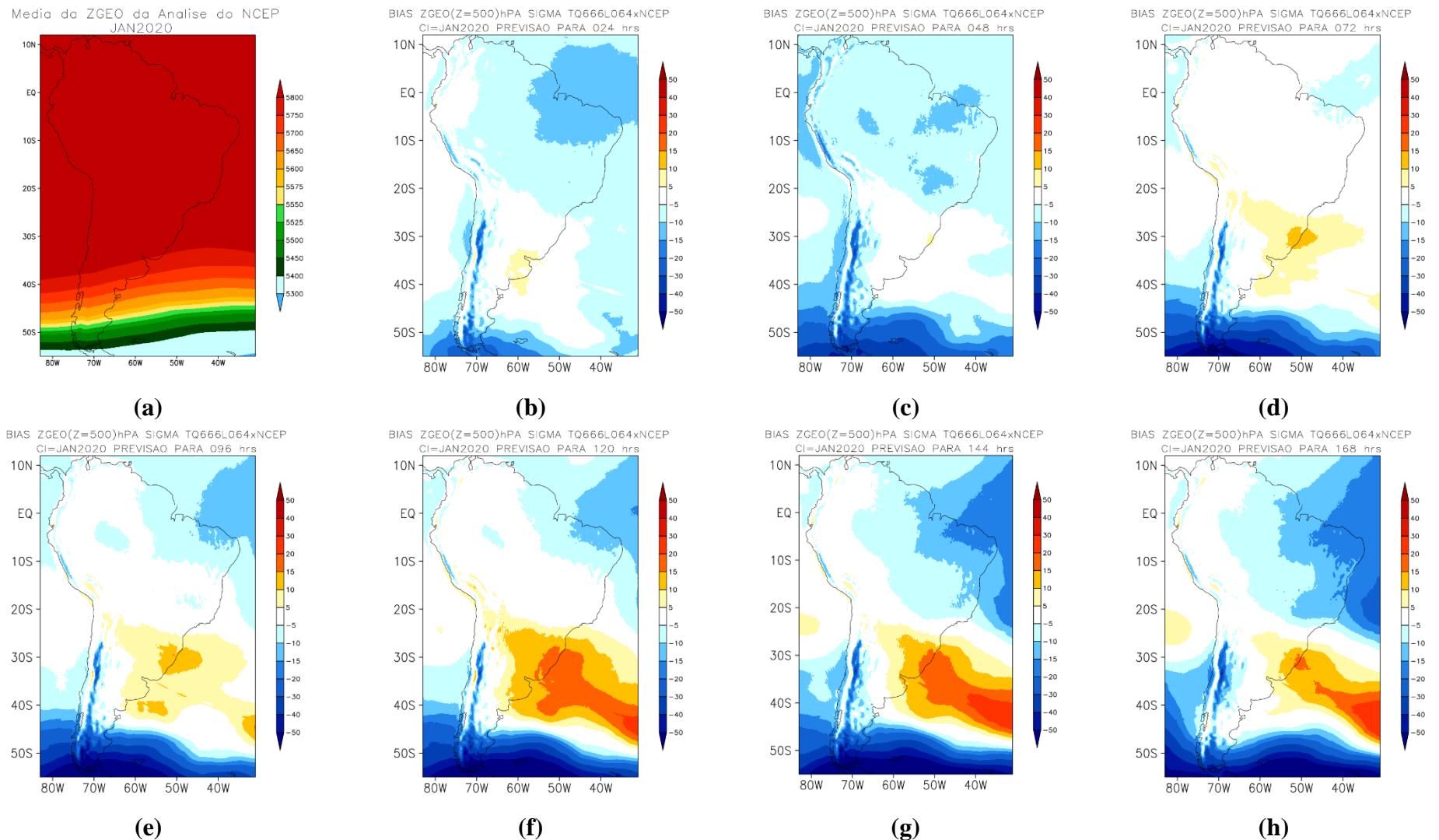
Na região tropical, a análise do RMSE do campo de geopotencial em 500 hPa (Figuras 30 e 32) mostra que a raiz quadrática do erro absoluto é menor no modelo em coordenada híbrida em relação ao modelo em coordenada sigma. Esta análise é um indicativo que a o modelo BAM em coordenada híbrida simula bem os processos termodinâmicos na região tropical.



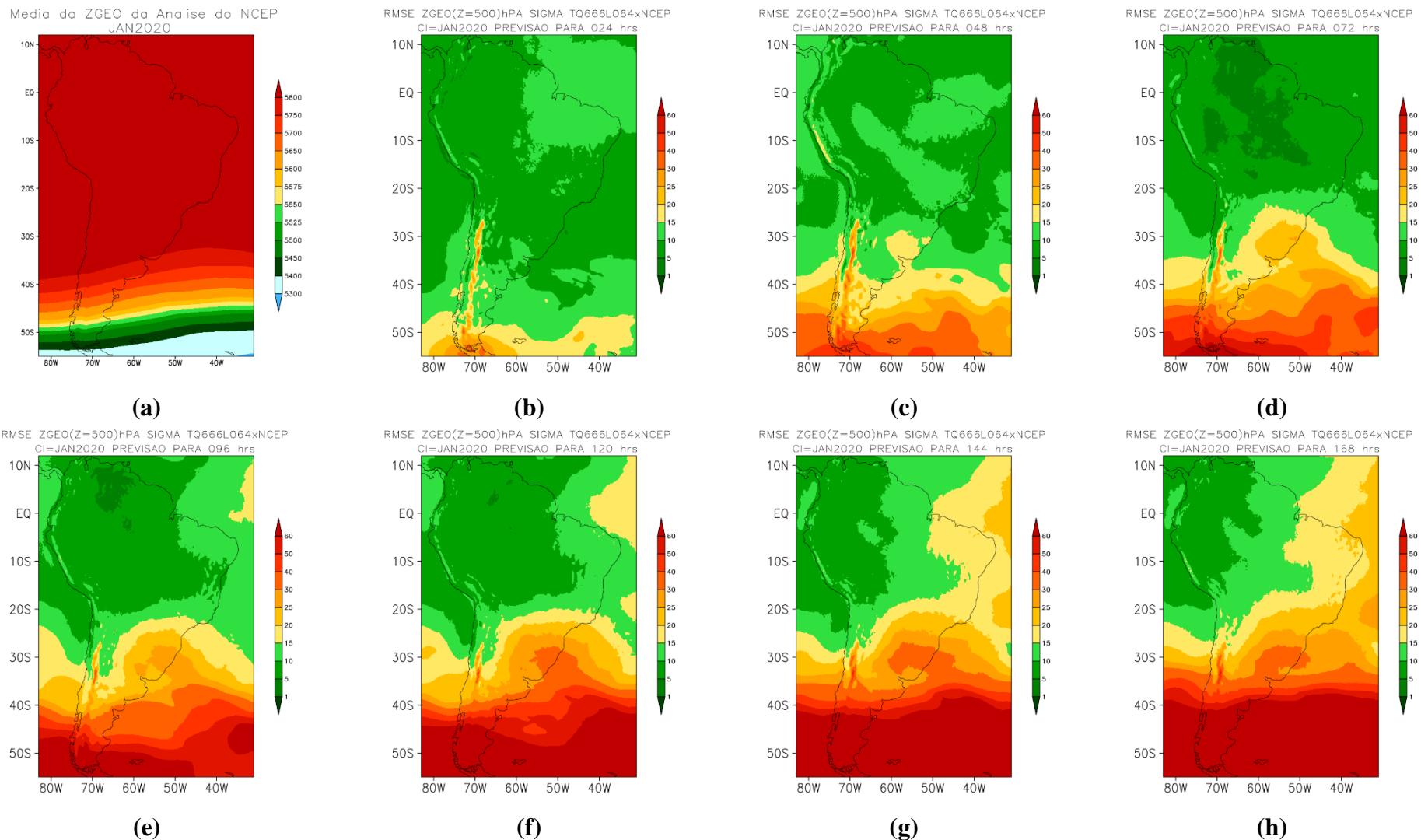
**Figura 29- Distribuição espacial do Bias de geopotencial em 500hPa para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 30 - Distribuição espacial do RMSE de geopotencial em 500hPa para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 31 - Distribuição espacial do Bias de geopotencial em 500hPa para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**



**Figura 32 - Distribuição espacial do RMSE de geopotencial em 500hPa para janeiro de 2020 (a) Media SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**

### **5.8.3 Água Precipitável**

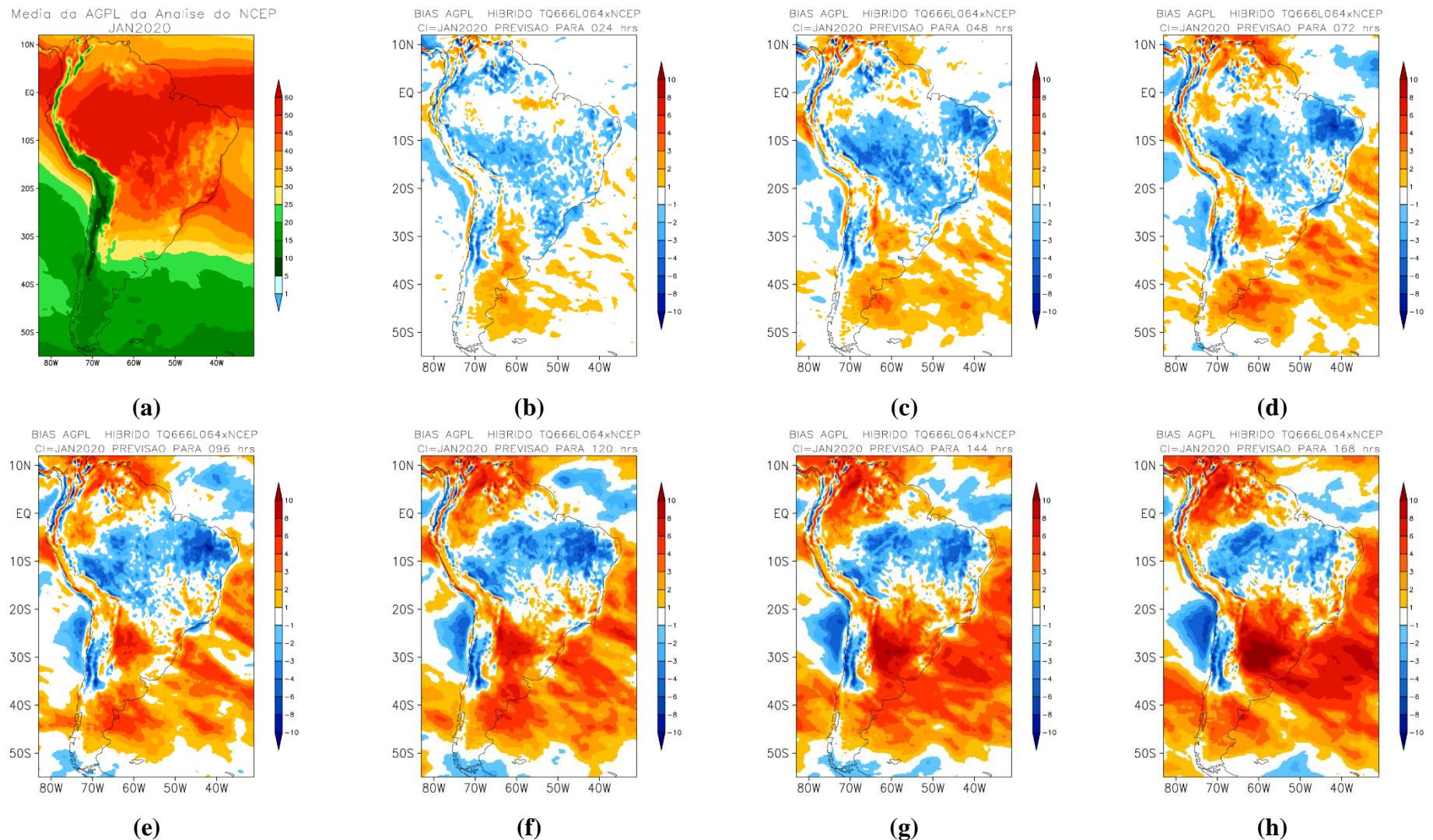
A disponibilidade de água na atmosfera é mensurada pela variável água precipitável (agpl). Este conteúdo de água na coluna atmosférica pode-se modificar dependendo das influências das fontes, sumidouros e condições termodinâmicas da atmosfera. O deslocamento de sistemas frontais em latitudes médias também pode introduzir bias no campo de água precipitável.

Os cálculos do bias e RMSE da água precipitável (Figura 33 a 36) foram realizados para as previsões dos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma referentes ao período de janeiro de 2020, onde optou-se em analisar os horários de 24 a 168 horas de previsão. Os índices estatísticos utilizaram com base de cálculo os dados de água precipitável da análise do NCEP.

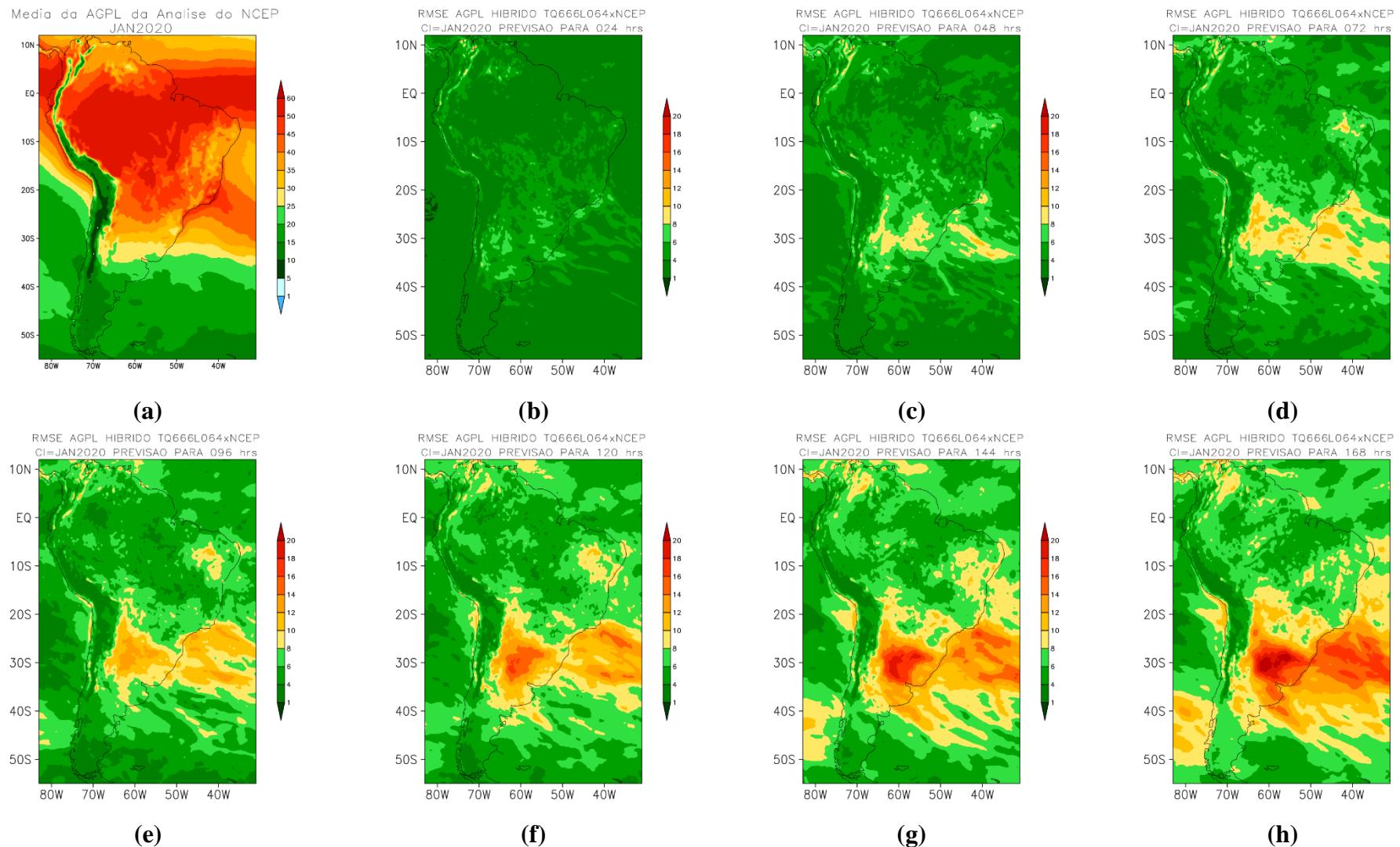
A análise do bias mensal (erro) (Figura 33 a 35) de janeiro de 2020 indica que na região tropical da América do Sul, sobre o continente, o erro na água precipitável é baixo e indica uma subestimativa. Entretanto, nas latitudes médias, o erro na água precipitável é maior em relação a região tropical. Verifica-se a persistência de área de bias positivos nos campos de água precipitável em latitudes médias ao longo das previsões. Estas áreas são maiores no modelo BAM em coordenada híbrida em relação a coordenada sigma. Estes bias positivos são um indicativo de que nesta região houve uma maior variabilidade do posicionamento dos sistemas frontais em relação ao posicionamento dos sistemas frontais definido pelas análises do NCEP. O menor erro sobre a Bacia do Prata obtido com o modelo BAM em coordenada sigma em relação ao modelo em coordenada híbrida pode estar relacionado a subestimativa de água precipitável a leste Cordilheira dos Andes, que reduz o conteúdo de umidade advectado pelos sistemas frontais no modelo BAM em coordenada sigma.

Na região tropical a análise do RMSE do campo de água precipitável (Figura 34 e 36) mostra que a raiz quadrática do erro absoluto é menor no modelo em coordenada híbrida em relação ao modelo em coordenada sigma. Os maiores valores de RMSE se encontram no sudeste da América do Sul devido a variabilidade do deslocamento dos sistemas frontais simulados pelos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma em relação aos dados da análise do NCEP.

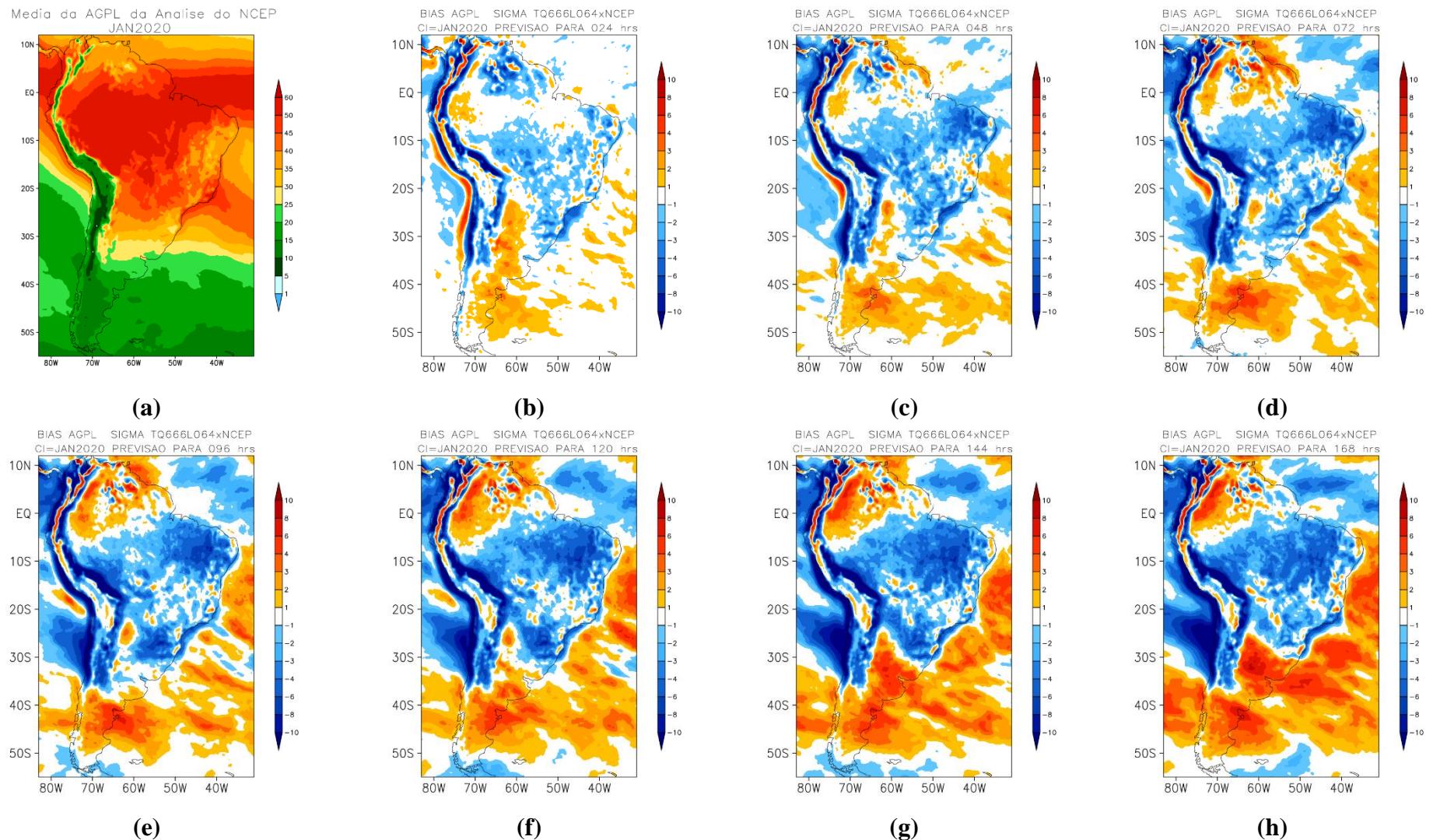
O maior ganho do modelo BAM em coordenada híbrida em relação a coordenada sigma está na simulação da água precipitável está sobre a Cordilheira dos Andes.



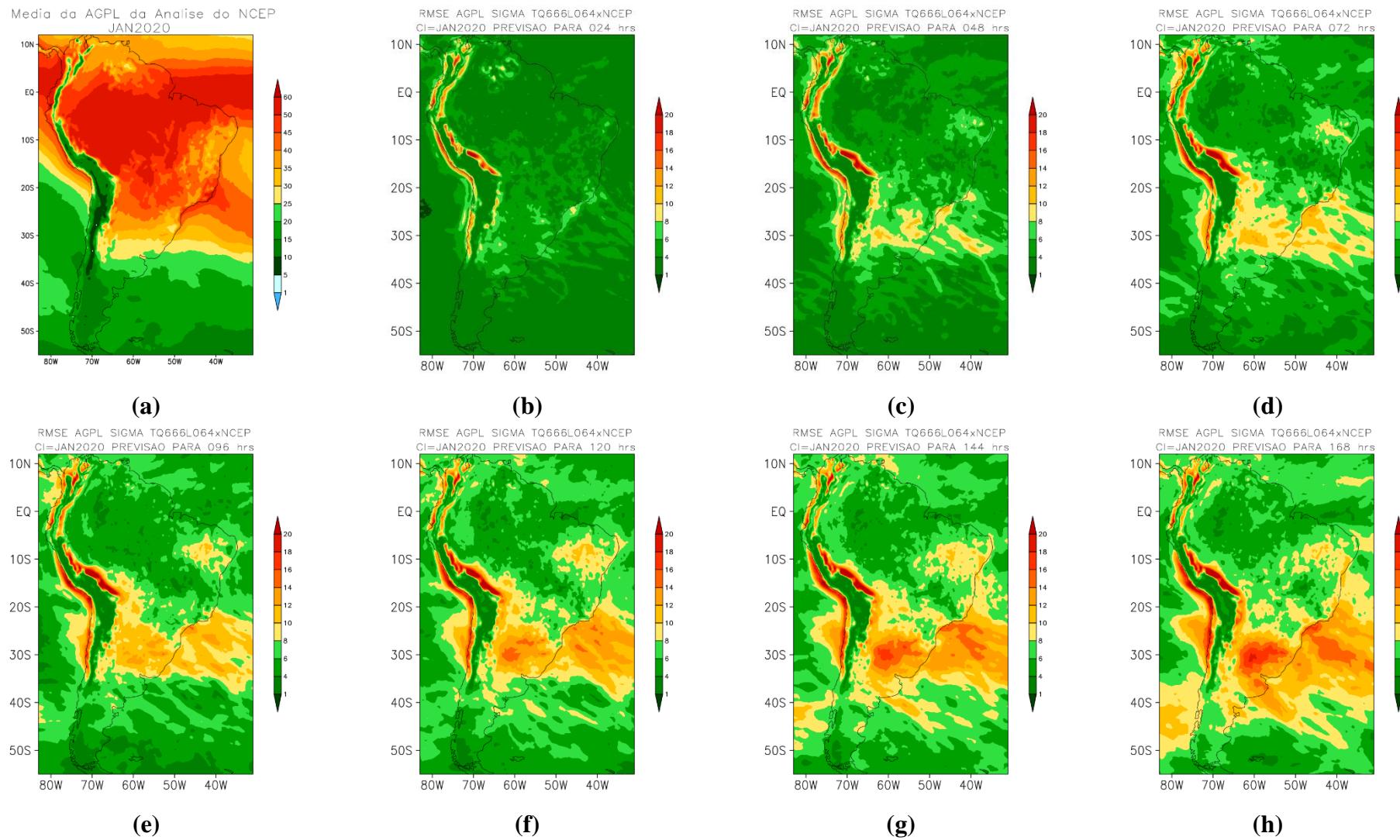
**Figura 33 - Distribuição espacial do Bias de água precipitável para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 34 - Distribuição espacial do RMSE de água precipitável para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada híbrida.**



**Figura 35 - Distribuição espacial do Bias de água precipitável para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) bias das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**



**Figura 36 - Distribuição espacial do RMSE de água precipitável para janeiro de 2020 (a) Média SAMet e (b-h) RMSE das previsões com o modelo BAM em coordenada Sigma.**

## **5.9 Estudo de caso Ciclone Bomba**

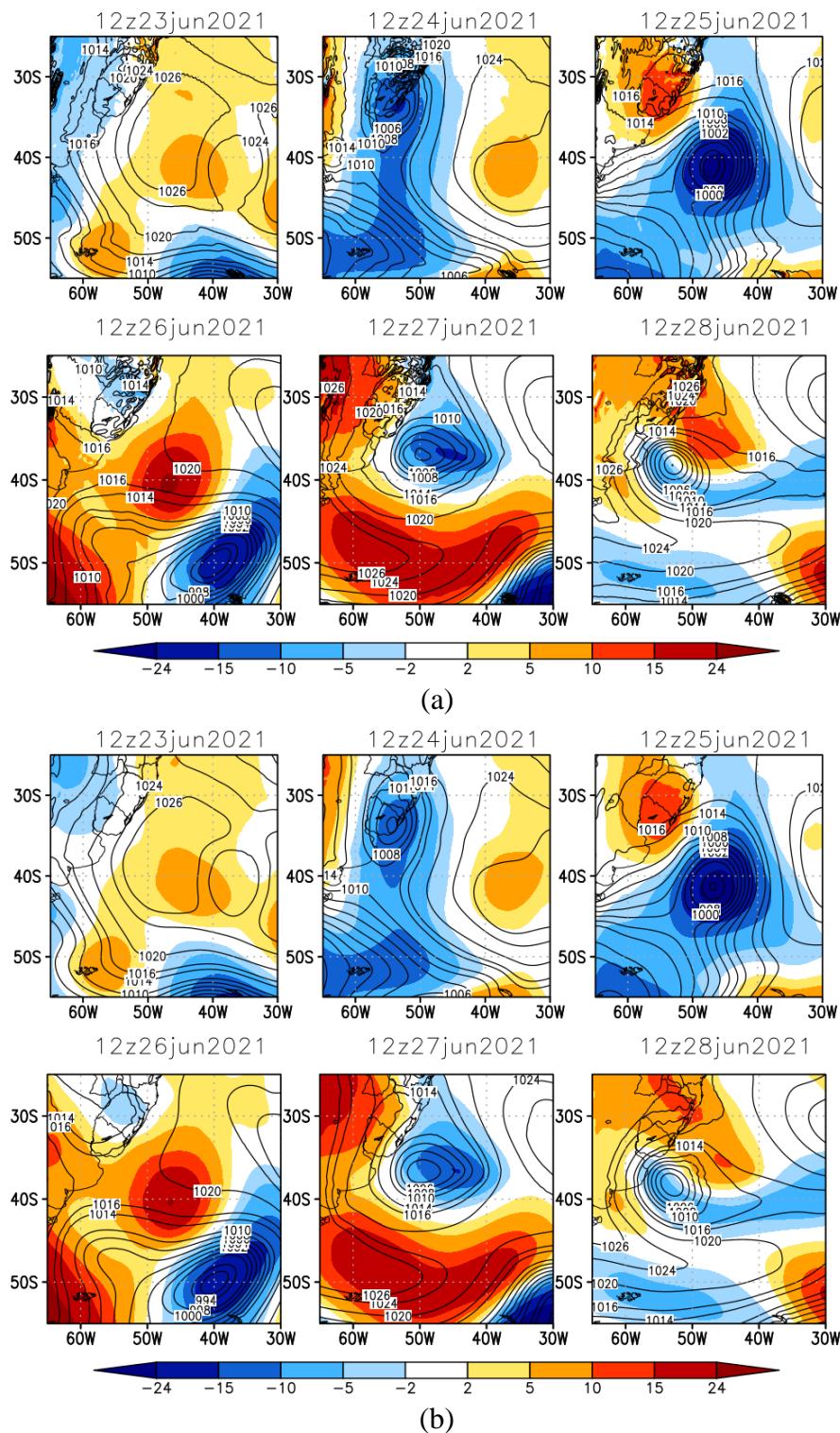
O estudo de caso do ciclone bomba que ocorreu no período dos dias 21/06/2021 a 01/07/2021 foi um excelente fenômeno atmosférico para testar as simulações realizadas com os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma.

As imagens de satélite e as análises dos campos de pressão reduzida ao nível médio do mar e a queda de pressão ocorrida durante o período de ocorrência dos ciclones bomba estão no Apêndice deste relatório. Neste tópico estão somente os resultados simulados pelos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma.

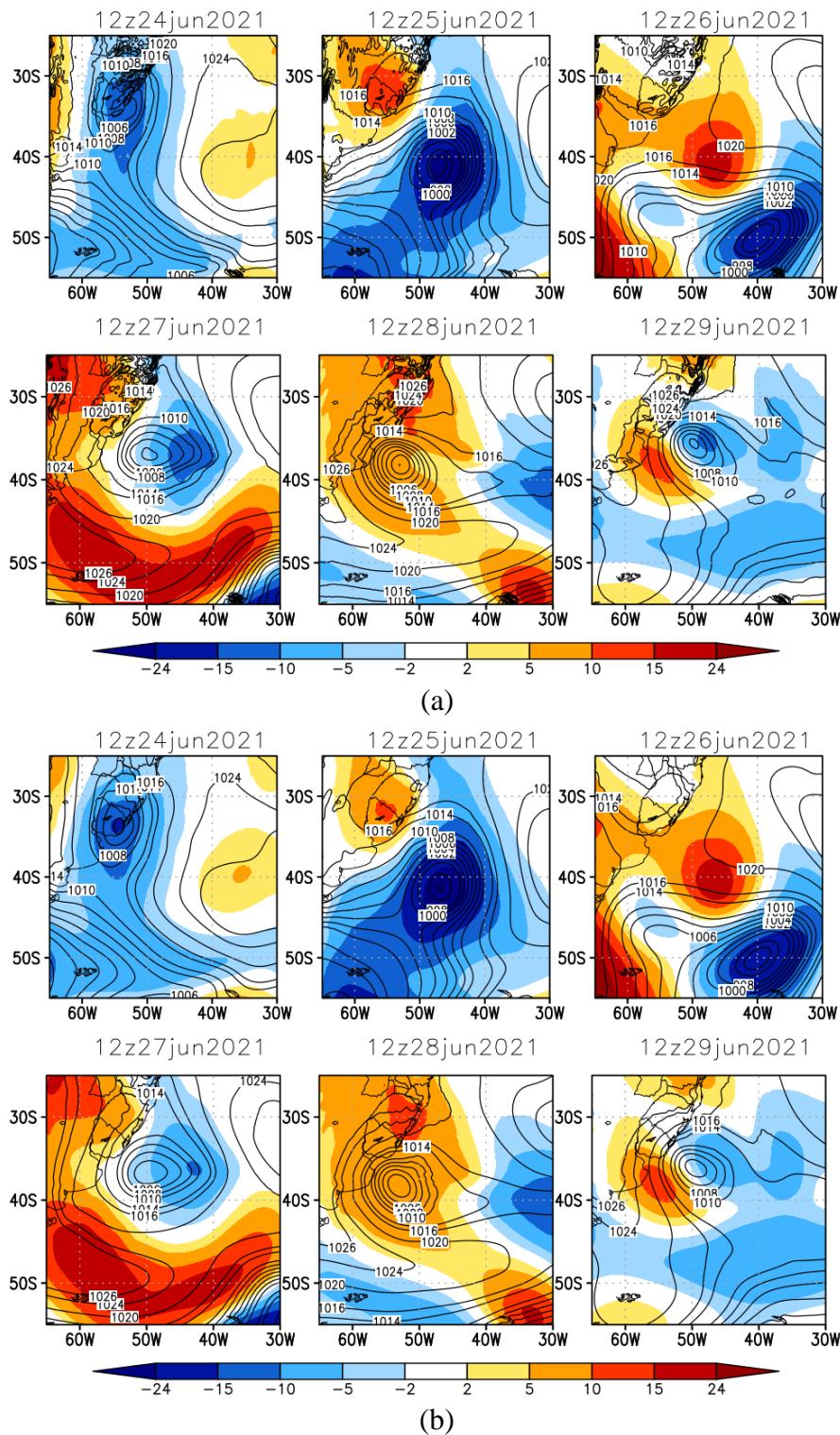
As Figuras 37 a 39 mostram as isolinhas de pressão reduzida ao nível médio do mar obtidas dos dados de análises do NCEP e a área sombreada é a simulação da queda de pressão simulada pelos dois modelos BAM, em coordenada híbrida e sigma. Os resultados mostram que os modelos têm dificuldades em simular a queda de pressão devido ao segundo ciclone bomba (27 a 28 de junho de 2021) a partir da previsão de 48 horas. Entretanto, o primeiro ciclone bomba ocorrido entre os dias 24 a 25 de junho de 2021, os modelos BAM em coordenada híbrida e sigma capturaram bem a queda de pressão para previsões até 72 horas.

A queda de pressão reduzida ao nível médio do mar simulada para o primeiro ciclone bomba pelo modelo BAM em coordenada híbrida é mais intensa em relação a queda de pressão reduzida ao nível médio do mar simulada pelo modelo BAM em coordenada sigma. Esta característica é mais evidente para previsões de 72 horas.

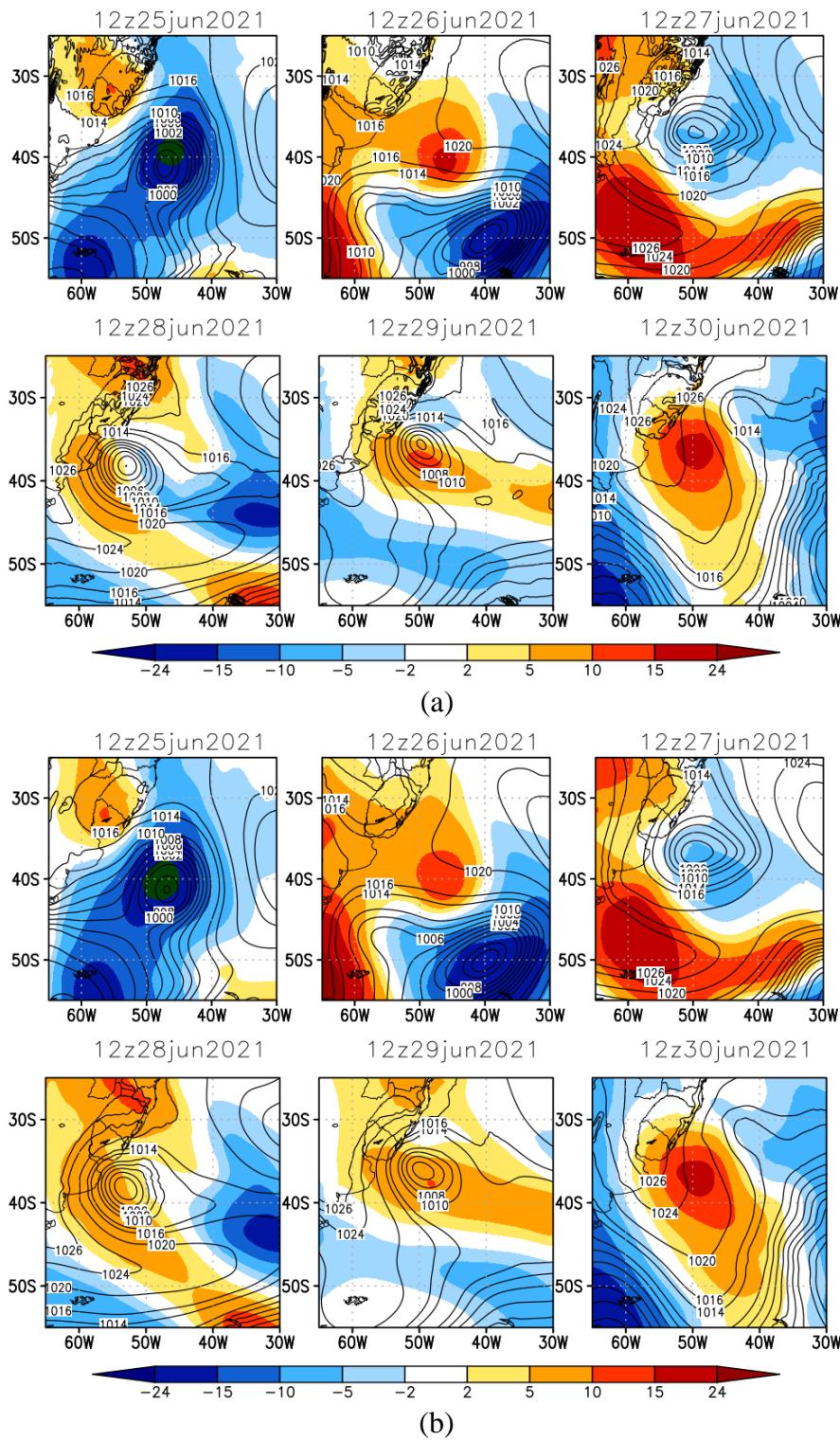
Neste estudo de caso, pode-se concluir que o modelo BAM em coordenada híbrida simulou melhor a queda de pressão dos ciclones. Entretanto, algumas análises com outras variáveis devem ser feitas para entender os motivos do segundo ciclone não ser bem simulados pelos modelos BAM em coordenada híbrida e sigma.



**Figura 37 - Sombreado queda de pressão em 24 horas e contorno são isóbaras dos dados de análise referente ao ciclone bomba. Os campos são previsões de 24 horas (a) híbrido (b)sigma.**



**Figura 38 - Sombreado queda de pressão em 24 horas e contorno são isóbaras dos dados de análise referente ao ciclone bomba. Os campos são previsões de 48 horas (a) híbrido (b)sigma.**



**Figura 39 - Sombreado queda de pressão em 24 horas e contorno são isóbaras dos dados de análise referente ao ciclone bambá. Os campos são previsões de 72 horas (a) híbrido (b)sigma.**

## **6 Conclusão**

A análise da distribuição vertical da energia modal total para os modos verticais mostrou que os resultados são similares nos dois modelos BAM em coordenada híbrida e sigma, principalmente para alturas equivalentes maiores agrupadas nos modos verticais de classes 0 e 1. Este resultado é importante pois indicam que as previsões dos modelos são compatíveis na representação processos de grande escala nas latitudes médias e na região tropical.

A inicialização da condição inicial por modos normais foi validada através da diferença do geopotencial em baixos e altos níveis. Os efeitos da inicialização na condição inicial nos dois modelos são similares, onde verifica-se que é removida da condição inicial a maré astronômica.

Os índices estatísticos de correlação de anomalia, raiz quadrada do erro absoluto e o bias obtidos do resultado da avaliação estatística do modelo BAM em coordenada híbrida em comparação com o modelo BAM em coordenada sigma mostram que as previsões realizadas com o modelo BAM em coordenada híbrida são melhores que as previsões realizadas com o modelo BAM em coordenada sigma.

A avaliação da precipitação simulada pelos modelos BAM em coordenadas híbrida e sigma mostram que o modelo BAM em coordenada híbrida reduz os erros no campo de precipitação a leste da Cordilheira dos Andes, gerados pelas simulações de precipitação com o modelo BAM em coordenada sigma. Sobre os oceanos a simulação de precipitação são similares e na América do Sul. Os diagramas de Taylor para diferentes regiões indicam que a simulação de precipitação feita com o modelo BAM em coordenada híbrida foi sempre igual ou melhor em relação ao modelo BAM em coordenada sigma.

Os mapas de RMSE e bias obtidas das análises estatística sobre a América do Sul utilizando os dados dos campos de temperatura a 2 metros, geopotencial e água precipitável simulados com o modelo BAM em coordenada híbrida e sigma indicam que as simulações realizadas com o modelo BAM em coordenada híbrida corrige alguns erros verificados nas simulações com o modelo BAM em coordenada sigma.

As análises dos resultados referentes ao estudo de caso do ciclone bomba mostraram que os modelos simularam bem a queda de pressão para o primeiro ciclone bomba e apresentou dificuldade em simular a queda de pressão para o segundo ciclone bomba. O modelo BAM em coordenada híbrida simulou uma maior queda de pressão no primeiro ciclone bomba.

**Através das análises dos resultados, pode-se concluir que o modelo BAM em coordenada híbrida atende as condições necessárias e suficientes para entrar em operação no INPE, substituindo a versão atual em coordenada sigma.**

## 7- Referências

Alpert, J. C., M. Kanamitsu, P. M. Caplan, J. G. Sela, G. H. White, and E. Kalnay, 1988: Mountain induced gravity wave drag parameterization in the NMC medium-range forecast model. Preprints, Eighth Conf. on Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD, Amer. Metero. Soc., 726-733

ALPERT, J.; S.-Y. HONG and Y.-J. KIM. 1996. Sensitivity of cyclogenesis to lower tropospheric enhancement of gravity wave drag using the environmental modeling center medium range model. In: Preprints. 11th Conference on NWP. 19-23 August 1996, Norfolk, Virginia. Am. Meteorol. Soc. pp. 322–323.

Asselin, R., 1972: Frequency filter for time integrations. Mon. Wea. Rev., 100, 487–490.

BRETHERTON, C. S.; PARK, S. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. Journal of Climate, v. 22, n. 12, p. 3422-3448, 2009.

Chou MD, Suarez MJ, Liang XZ, Yan MM, Cote C (2001) A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. NASA/TM-2001-104606, vol 19.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/20010072848>

Chou MD, Suarez, MJ (1999) A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies. In: NASA/TM-1999-104606, M. J. Suarez, Ed., Series on global modeling and data assimilation, vol 15, p 40

Danielson, Jeffrey J.; Gesch, Dean B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010); 2011; OFR; 2011-1073

Figueroa, S. N., Bonatti, J. P., Kubota, P. Y., Grell, G. A., Morrison, H., Barros, S. R. M., Fernandez, J. P. R., Ramirez, E., Siqueira, L., Luzia, G., Silva, J., Silva, J. R., Pendharkar, J., Capistrano, V. B., Alvim, D. S., Enoré, D. P., Diniz, F. L. R., Satyamurti, P., Cavalcanti, I. F. A., Nobre, P., Barbosa, H. M. J., Mendes, C. L., & Panetta, J. (2016). The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Rainfall Forecasting and Sensitivity to Convective Scheme and Horizontal Resolution, Weather and Forecasting, 31(5), 1547-1572.

Retrieved Aug 5, 2021, from [https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/31/5/waf-d-16-0062\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/31/5/waf-d-16-0062_1.xml)

GONÇALVES, L. J. M. Estudo do balanço radiativo e energético da atmosfera em função da emissão natural e antrópica de CO<sub>2</sub> utilizando o Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM). 2017. 180 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3NSSMJE>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.15.19.05-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3NSSMJE>>.

HAN, J.; PAN, H. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, v. 26, p. 520-533, 2011

Hines, K. M., R. W. Grumbine, D. H. Bromwich, and R. I. Cullather, 1999: Surface energy balance of the NCEP MRF and NCEP–NCAR reanalysis in Antarctic latitudes during FROST. *Wea. Forecasting*, **14**, 851–866.

José Roberto Rozante, Enver Ramirez Gutierrez, Alex de Almeida Fernandes and Daniel A. Vila (2020) Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations, *International Journal of Remote Sensing*, 41:19, 7585-7604, DOI: 10.1080/01431161.2020.1763504

KUBOTA, P. Y. Variabilidade da energia armazenada na superfície e o seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul. 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. *Monthly weather review*, v. 137, n. 3, p. 991-1007, 2009.

Rozante, J. R., Ramirez, E., & Fernandes, A. d. A. (2021). A newly developed South American Mapping of Temperature with estimated lapse rate corrections. *International Journal of Climatology*, 1– 18. <https://doi.org/10.1002/joc.7356>

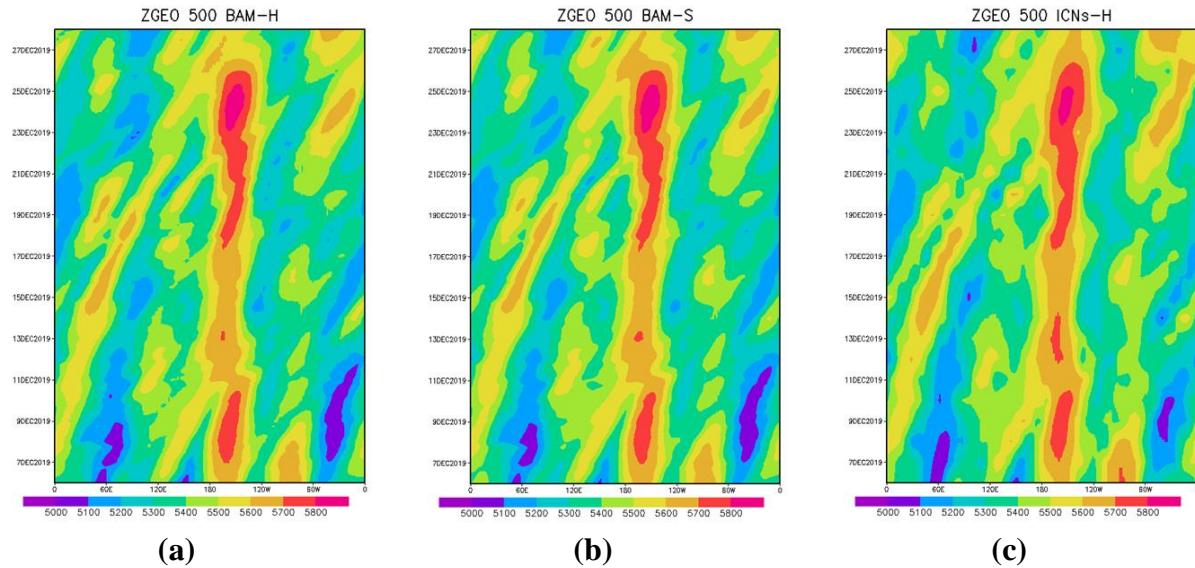
Sanders, F., & Gyakum, J. R. (1980). Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”, Monthly Weather Review, 108(10), 1589-1606. Retrieved Sep 22, 2021, from [https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/108/10/1520-0493\\_1980\\_108\\_1589\\_sdcot\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/108/10/1520-0493_1980_108_1589_sdcot_2_0_co_2.xml)

Williams, P. D., 2009: A proposed modification to the Robert–Asselin time filter. Mon. Wea. Rev., 137, 2538–2546.

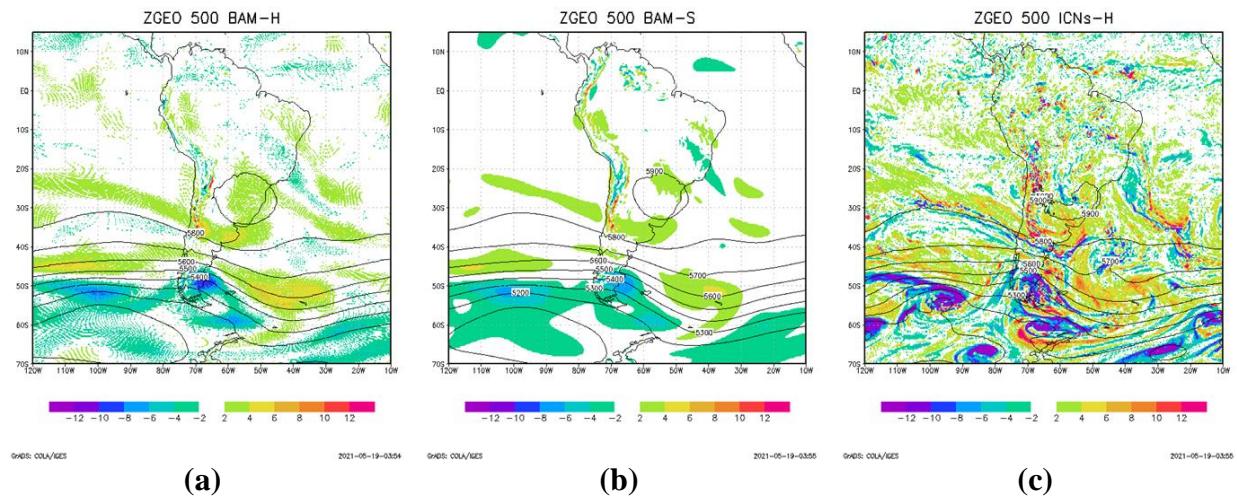
WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego: Academic Press, 2006. p. 627.

## Apêndice

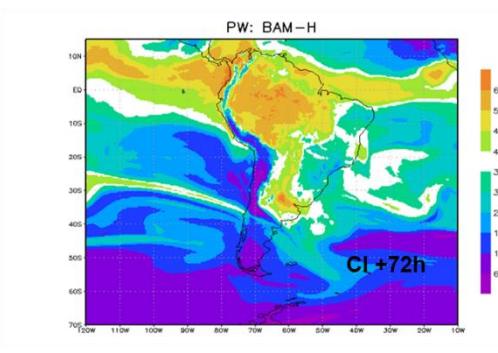
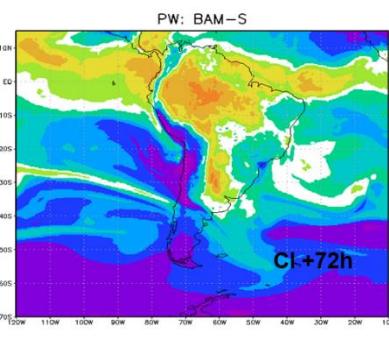
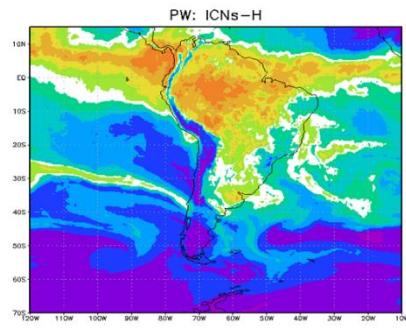
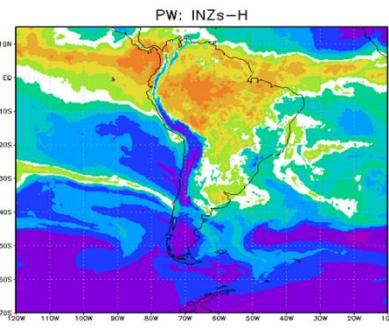
### A1) Análise do Diagrama de Hovmöller (Enver)



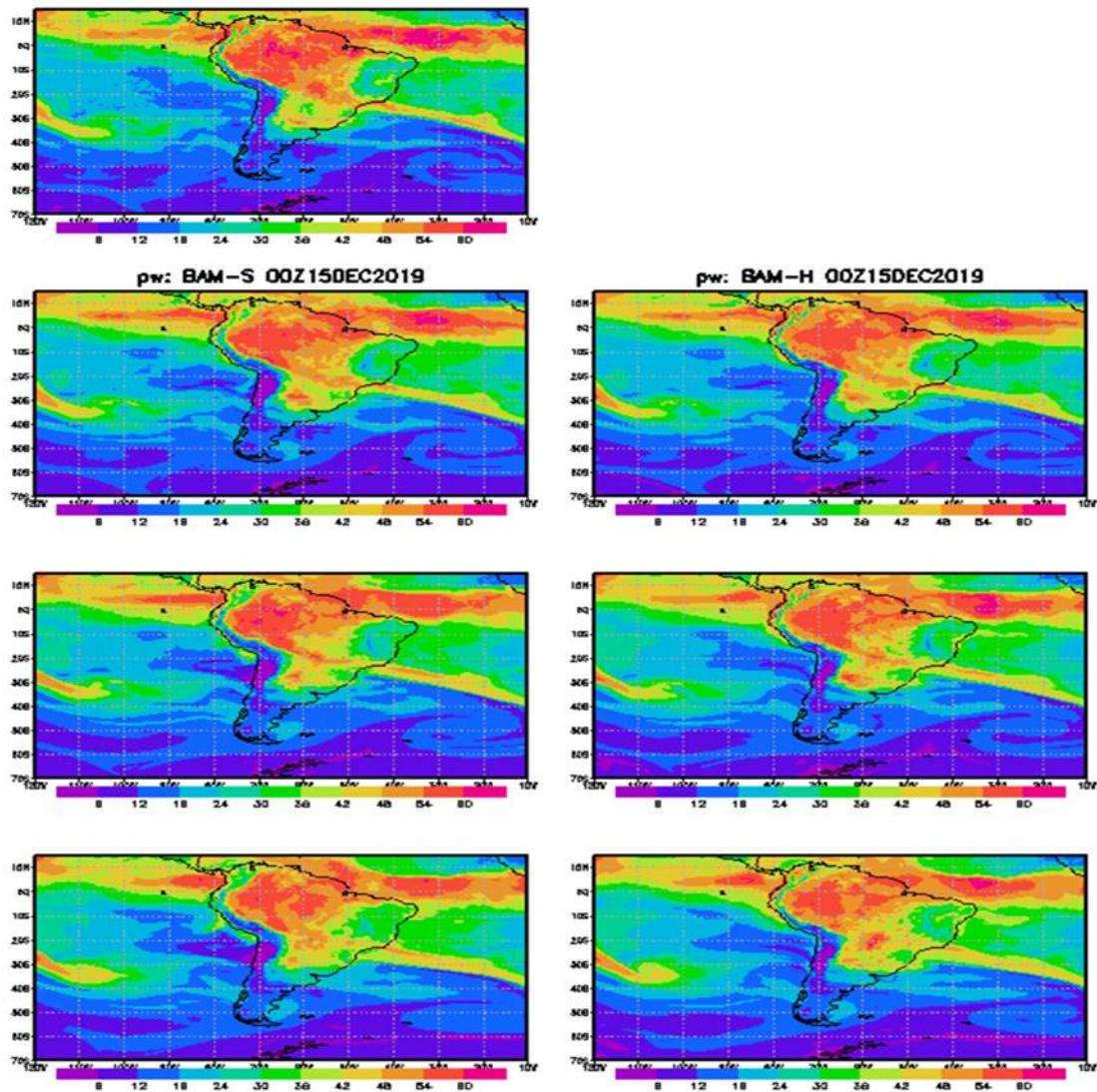
### A2) Análise Espacial do Geo Potencial (Enver)



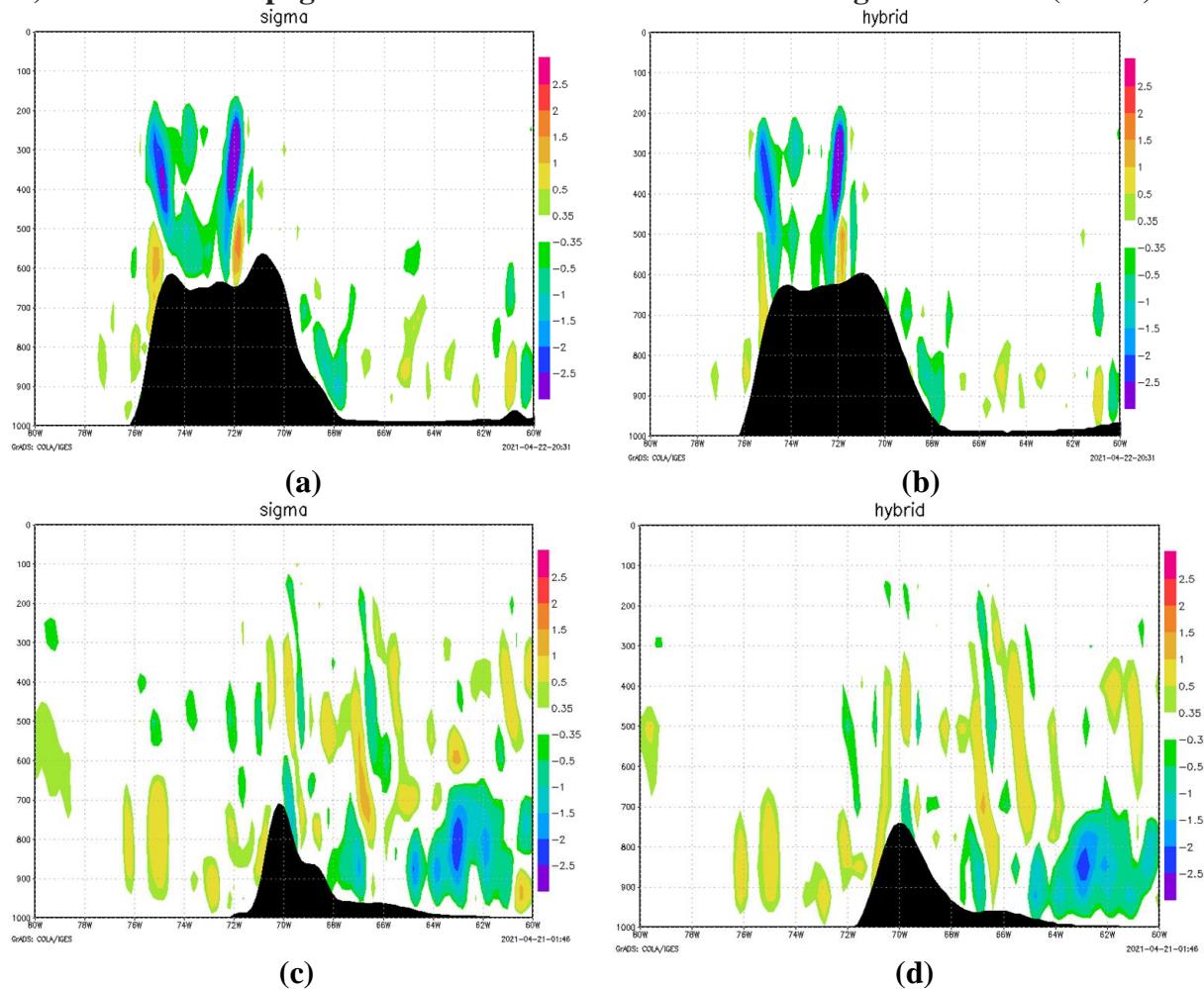
### A3) Análise Espacial do Água precipitável (Enver)



#### A4) Análise Espacial do Água precipitável (Enver)



**A5) Influência da topografia do modelo BAM em coordenada sigma e híbrida (Enver)**



# **Pressão Reduzida e Queda de Pressão em 24 Horas**

24 de junho, 00 UTC, a 01 de julho de 2021, 18 UTC, de 06 em 06 horas

Região Sul, Paraguai, Norte da Argentina e Oceano Atlântico Adjacente  
( $65^{\circ}\text{W}$  -  $30^{\circ}\text{W}$ ;  $45^{\circ}\text{S}$  –  $15^{\circ}\text{S}$ )

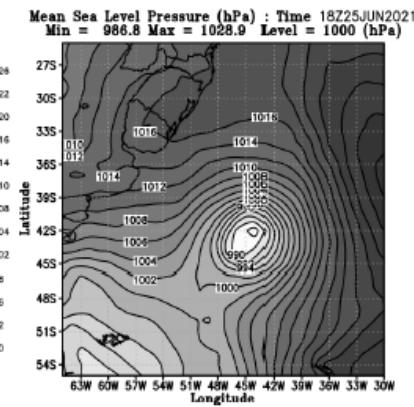
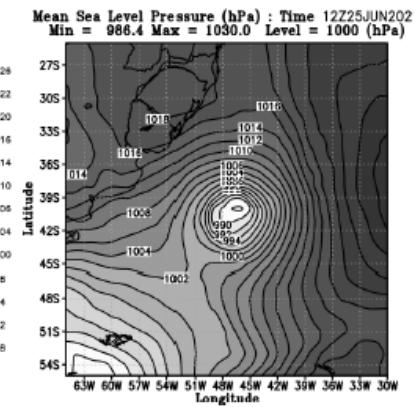
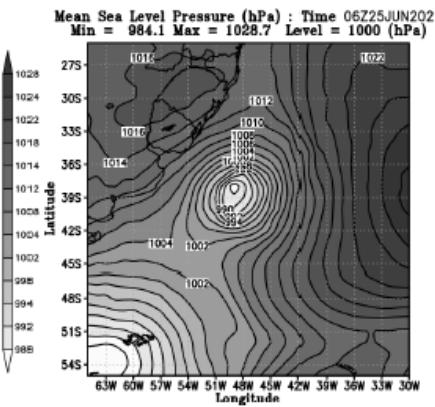
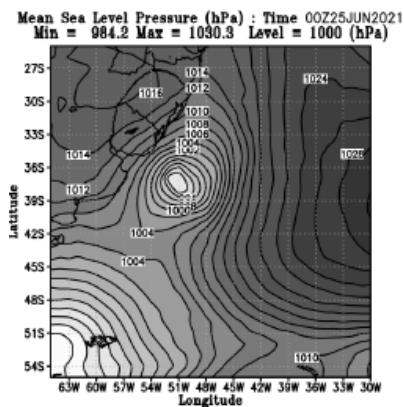
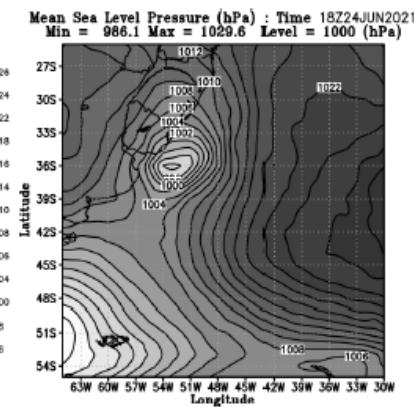
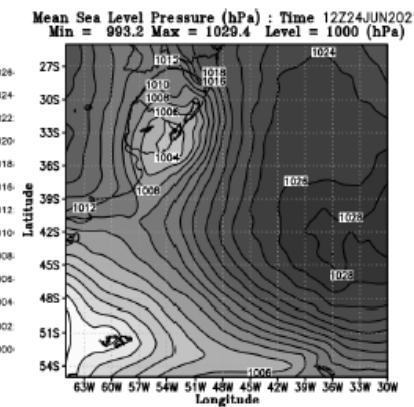
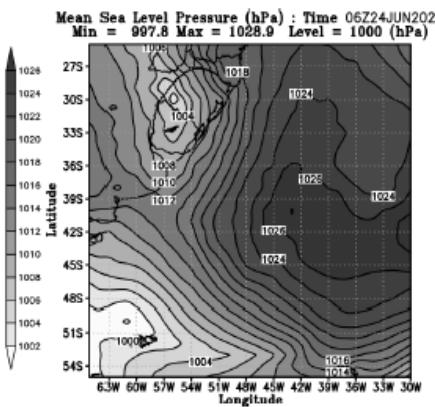
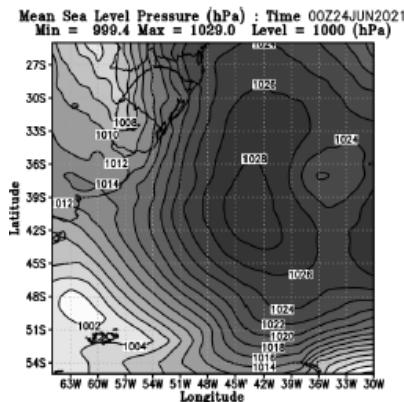
Há a formação de dois ciclones em sequência, sendo o primeiro deles um Ciclone Bomba, e o segundo tem escala menor.

Sanders e Gyakum (1980) definiram queda de 24 hPa em 24 hours da pressão reduzida para um ciclone extratropical ser considerado como ciclone bomba.

Sanders, F., and J. R. Gyakum, 1980: Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”. Monthly Weather Review, 108, 1589–1606.

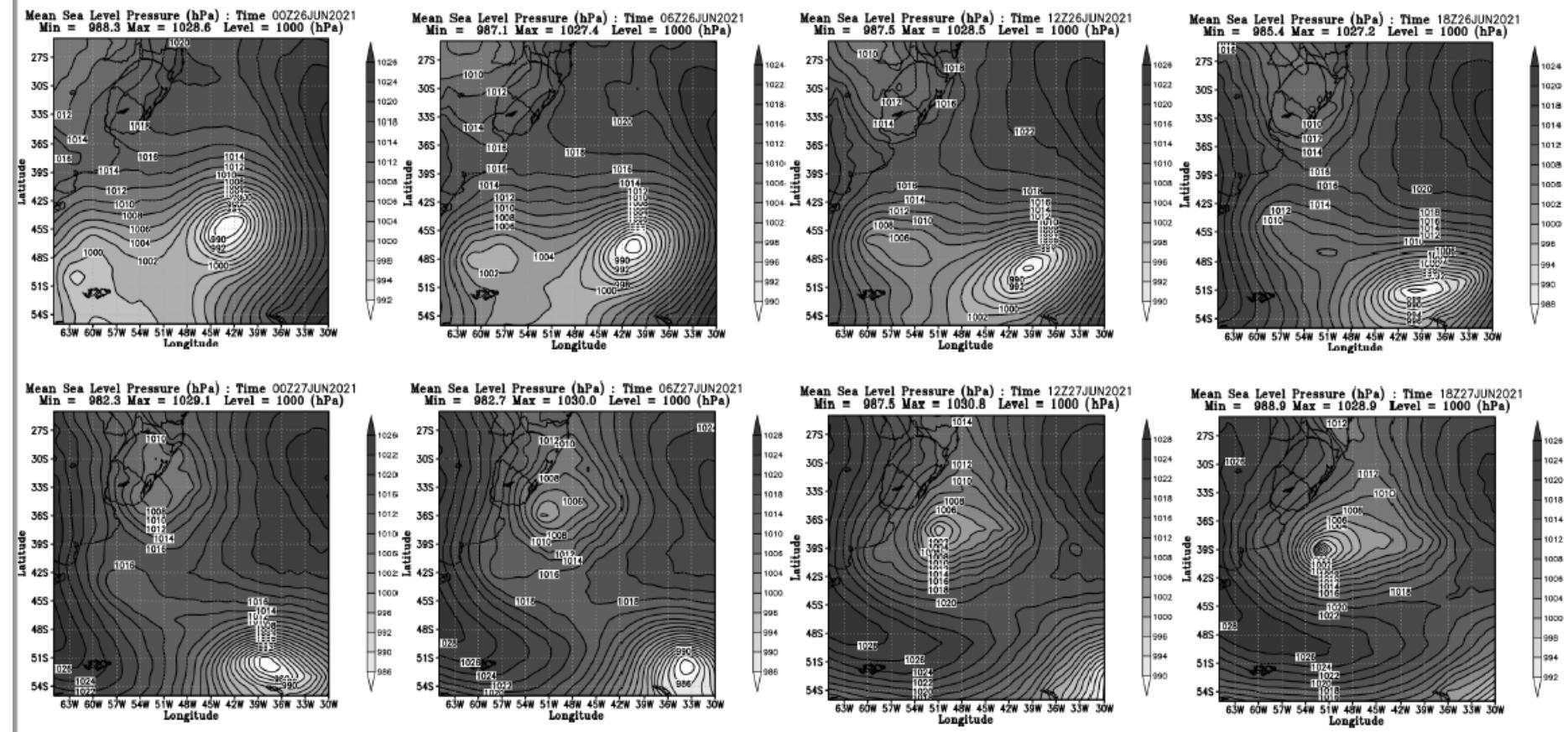
A6) Pressão reduzida ao nível do Mar (Ciclone Bomba)

## Pressão Reduzida ao Nível do Mar 00Z24JUN2021 a 18Z25JUN2021, 06 em 06 UTC



## A7) Pressão reduzida ao nível do Mar (Ciclone Bomba)

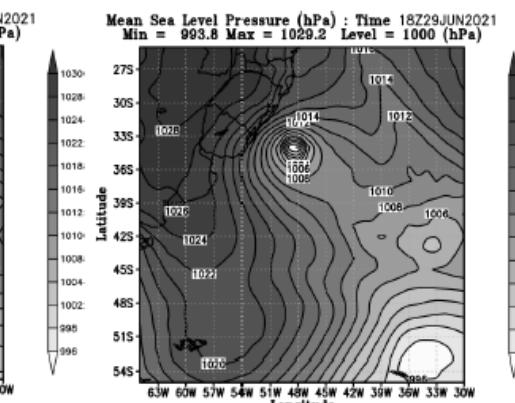
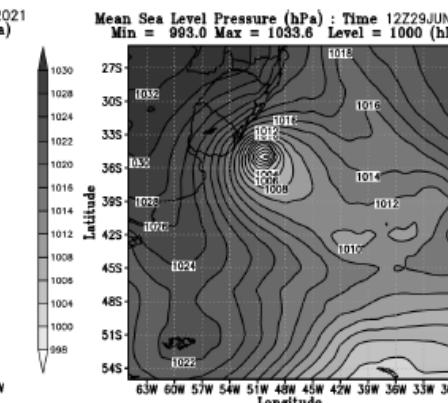
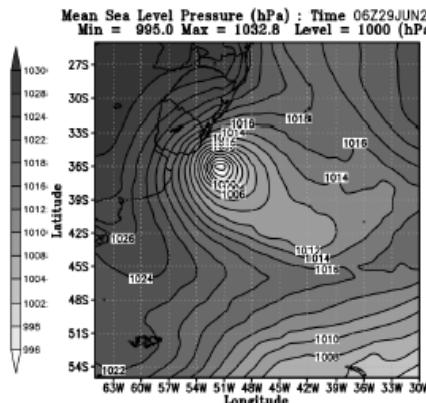
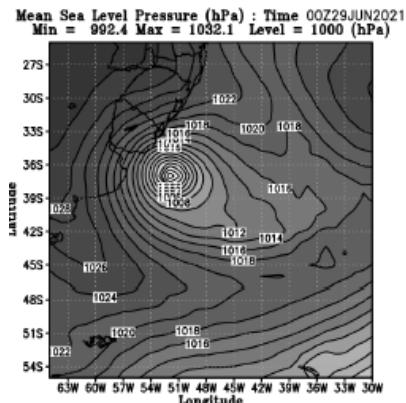
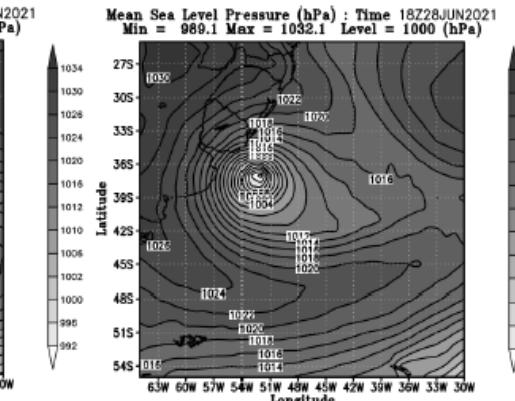
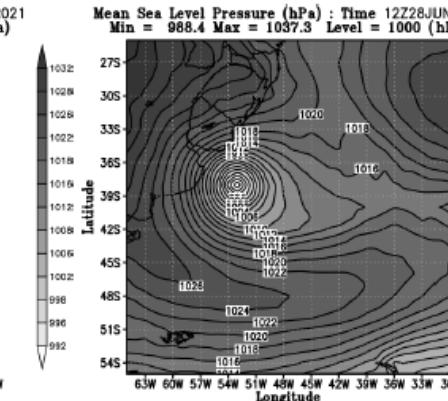
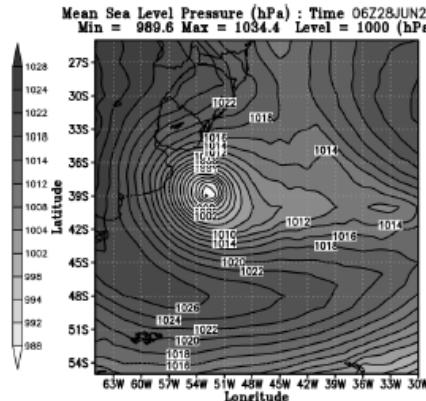
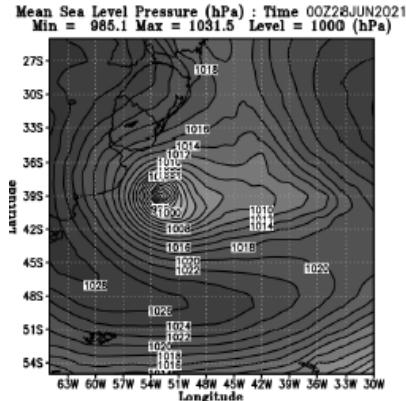
### Pressão Reduzida ao Nível do Mar 00Z26JUN2021 a 18Z27JUN2021, 06 em 06 UTC



**A8) Pressão reduzida ao nível do Mar (Ciclone Bomba)**

# Pressão Reduzida ao Nível do Mar

## 00Z28JUN2021 a 18Z29JUN2021, 06 em 06 UTC

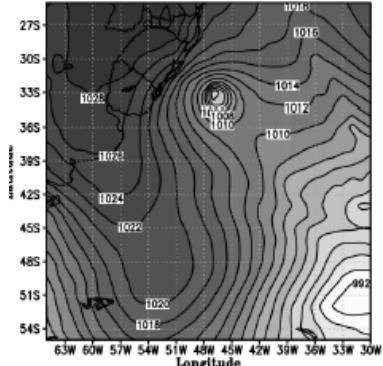


A9) Pressão reduzida ao nível do Mar (Ciclone Bomba)

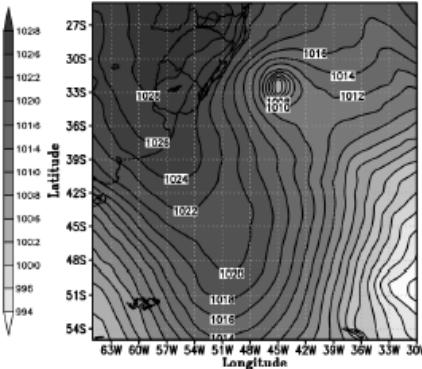
# Pressão Reduzida ao Nível do Mar

## 00Z30JUN2021 a 18Z01JUL2021, 06 em 06 UTC

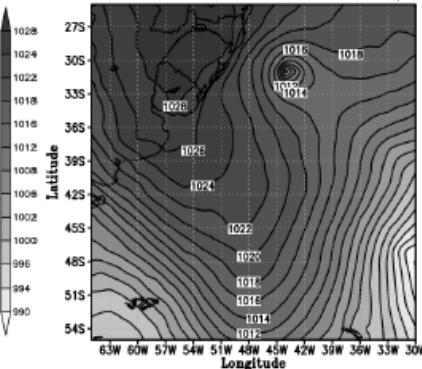
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 00Z30JUN2021  
Min = 990.8 Max = 1030.5 Level = 1000 (hPa)



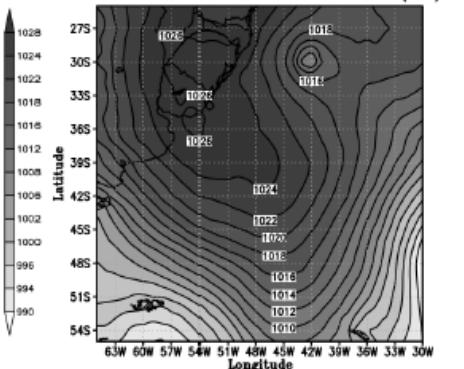
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 06Z30JUN2021  
Min = 987.1 Max = 1030.3 Level = 1000 (hPa)



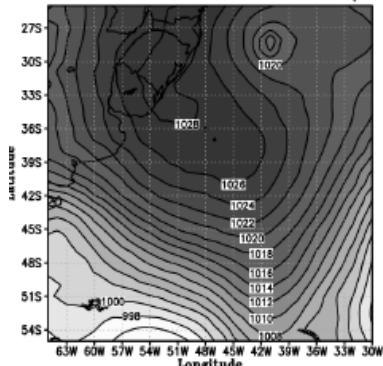
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 12Z30JUN2021  
Min = 987.8 Max = 1030.2 Level = 1000 (hPa)



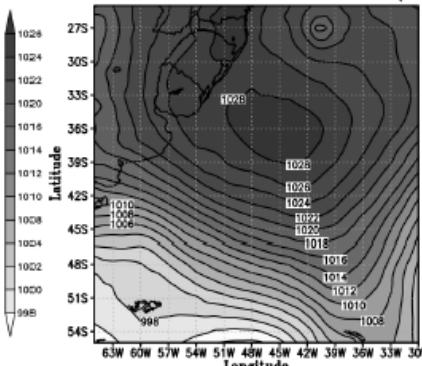
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 18Z30JUN2021  
Min = 992.0 Max = 1027.2 Level = 1000 (hPa)



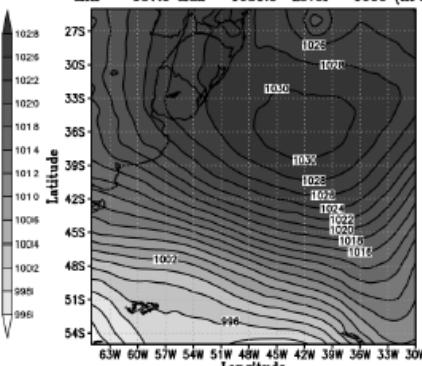
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 00Z01JUL2021  
Min = 994.1 Max = 1029.9 Level = 1000 (hPa)



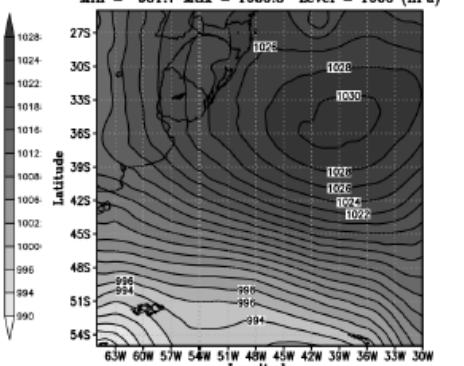
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 06Z01JUL2021  
Min = 993.6 Max = 1030.1 Level = 1000 (hPa)



Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 12Z01JUL2021  
Min = 987.9 Max = 1031.6 Level = 1000 (hPa)



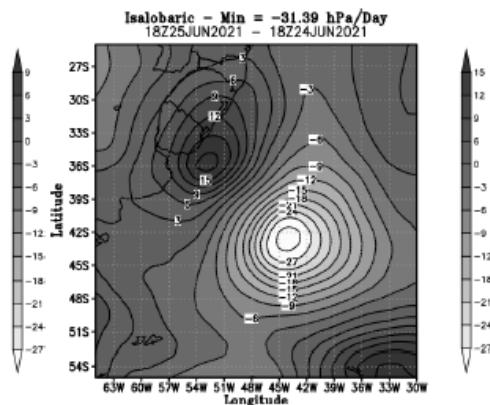
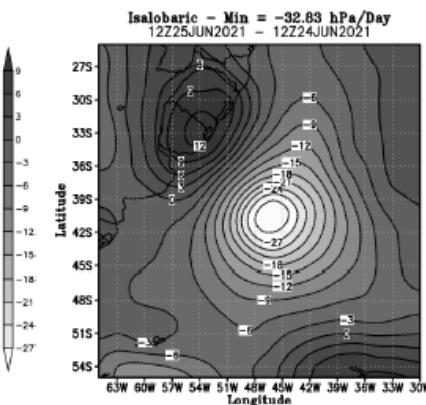
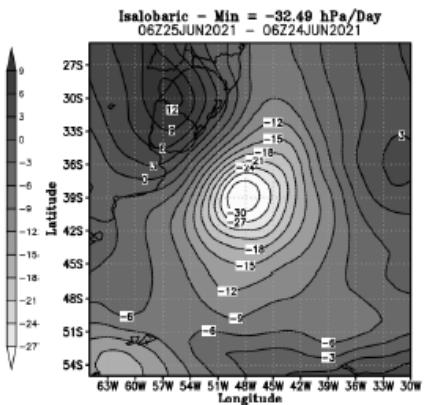
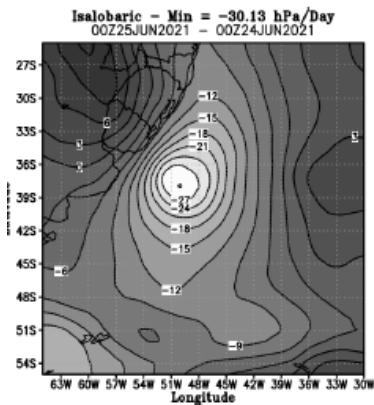
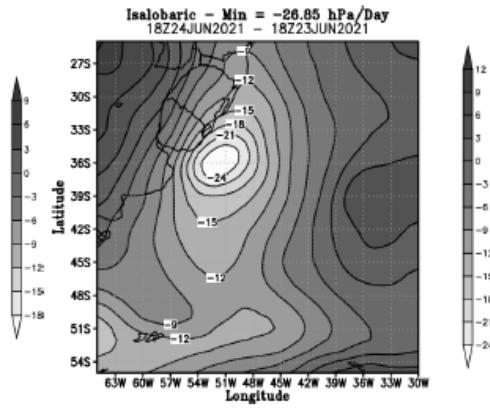
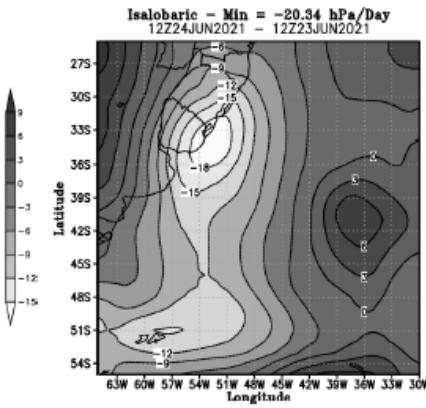
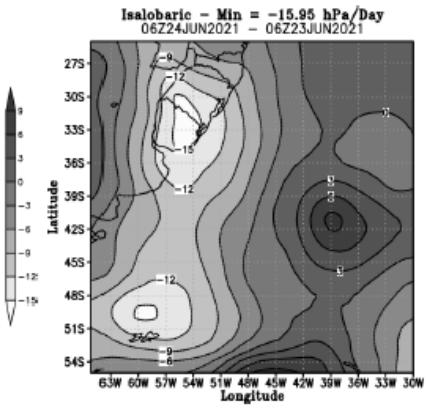
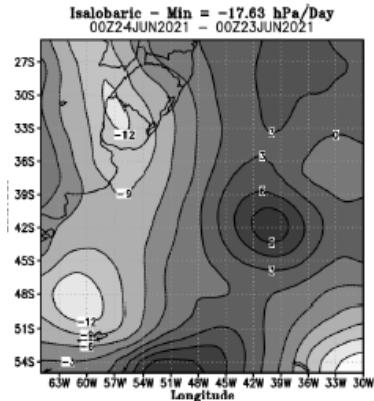
Mean Sea Level Pressure (hPa) : Time 18Z01JUL2021  
Min = 981.7 Max = 1030.8 Level = 1000 (hPa)



A10) Queda de Pressão reduzida ao nível do Mar em 24 horas (Ciclone Bomba)

## Queda de Pressão em 24 Horas (Bomba: > 24 hPa)

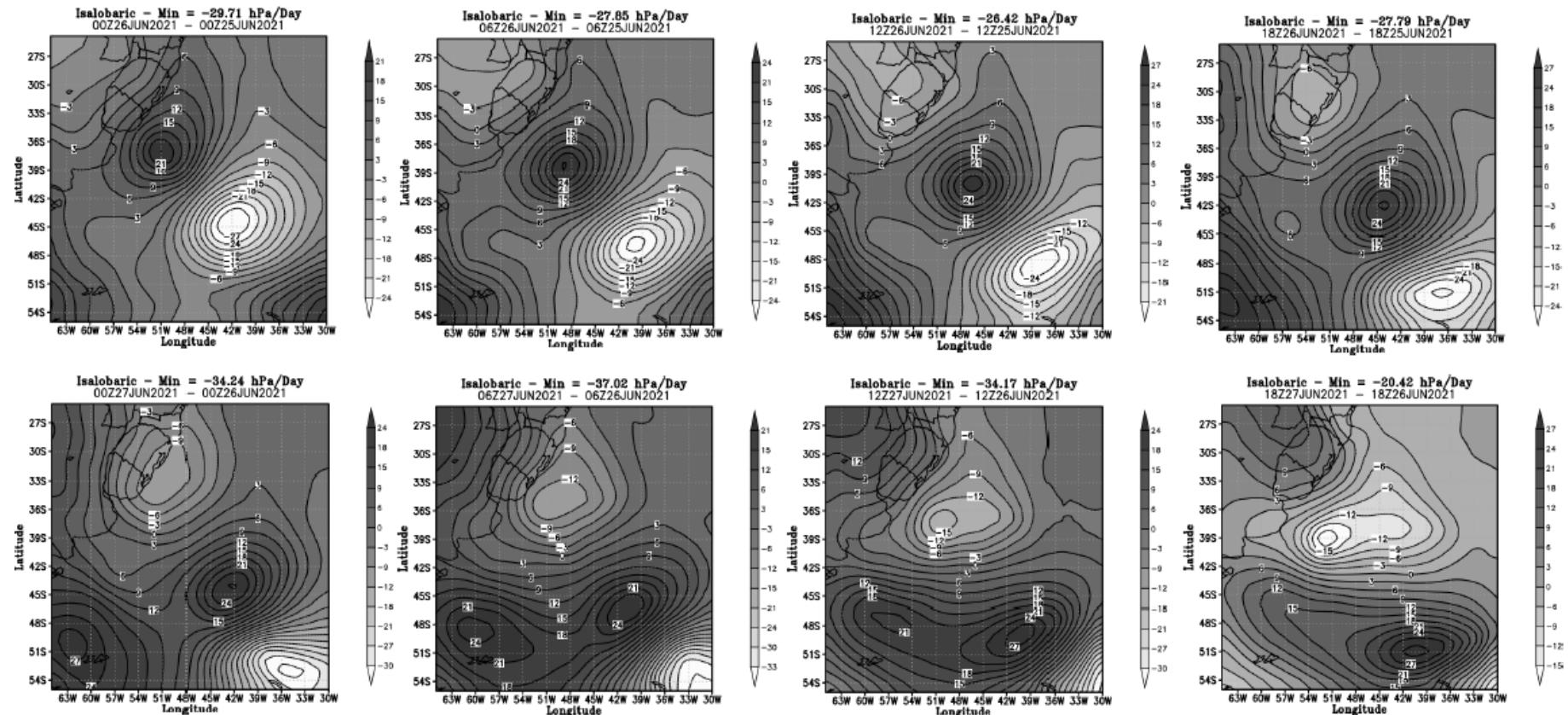
### 00Z24JUN2021 a 18Z25JUN2021, 06 em 06 UTC



A11) Queda de Pressão reduzida ao nível do Mar em 24 horas (Ciclone Bomba)

## Queda de Pressão em 24 Horas (Bomba: > 24 hPa)

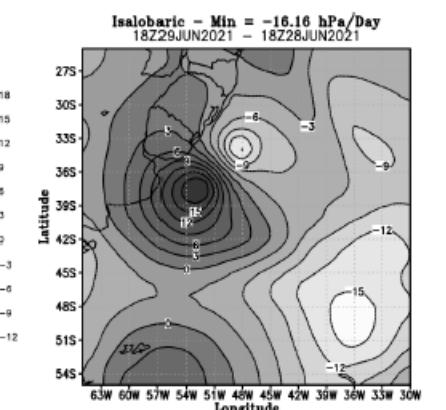
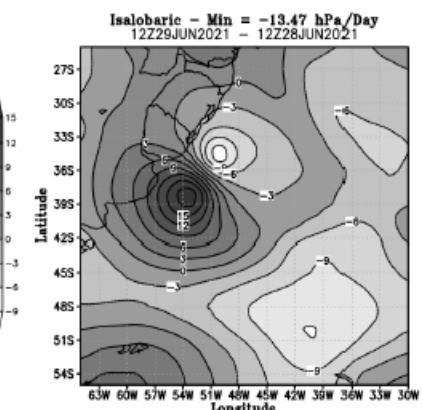
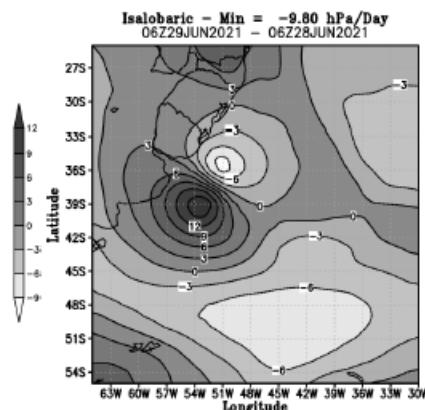
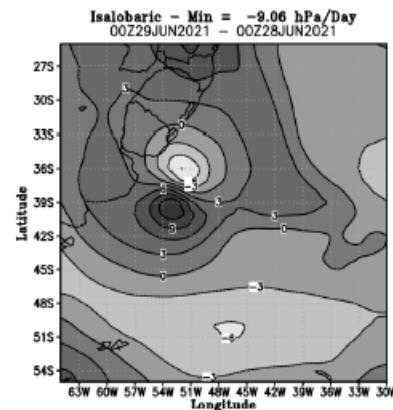
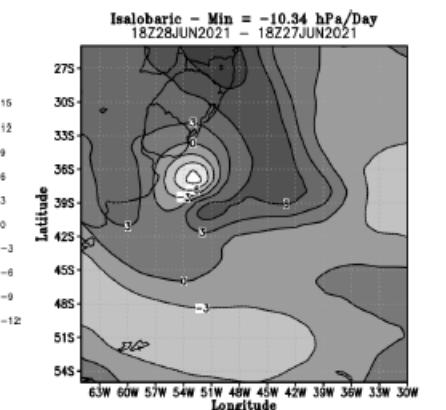
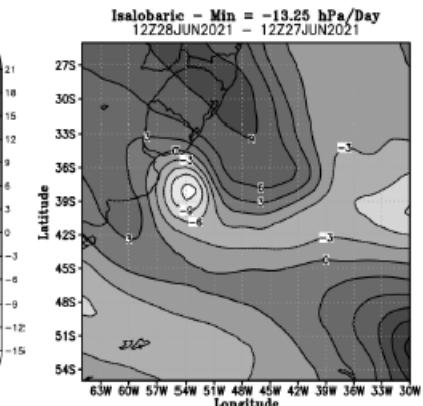
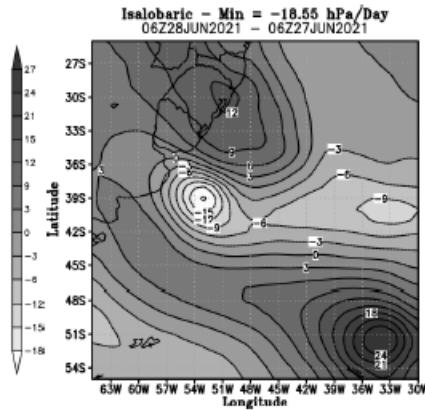
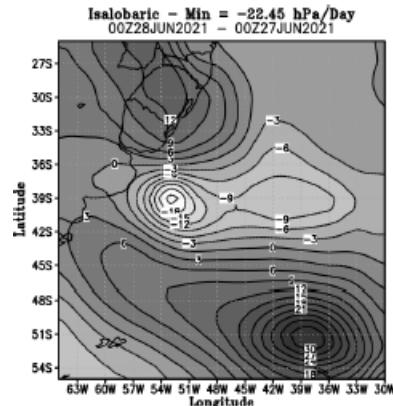
### 00Z26JUN2021 a 18Z27JUN2021, 06 em 06 UTC



A12) Queda de Pressão reduzida ao nível do Mar em 24 horas (Ciclone Bomba)

## Queda de Pressão em 24 Horas (Bomba: > 24 hPa)

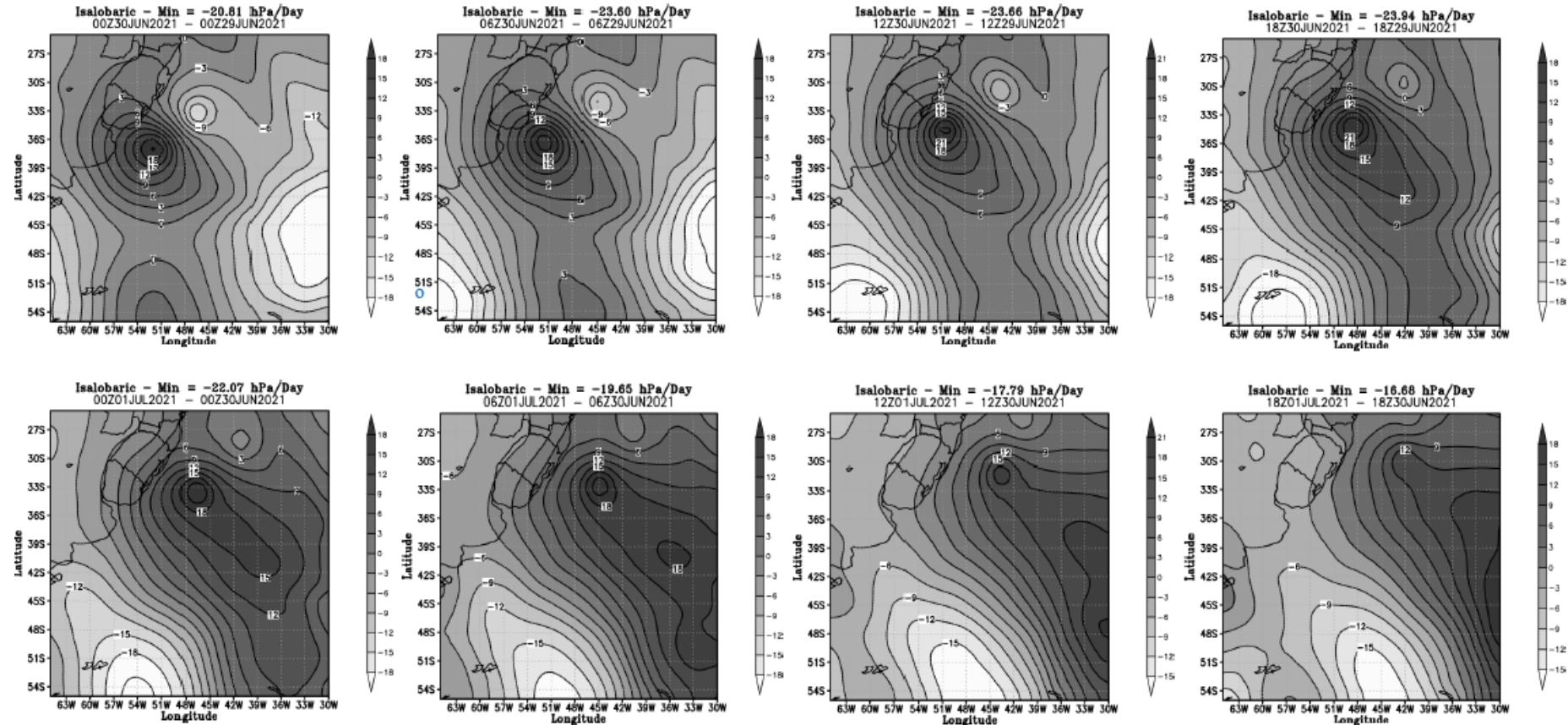
00Z28JUN2021 a 18Z29JUN2021, 06 em 06 UTC



A13) Queda de Pressão reduzida ao nível do Mar em 24 horas (Ciclone Bomba)

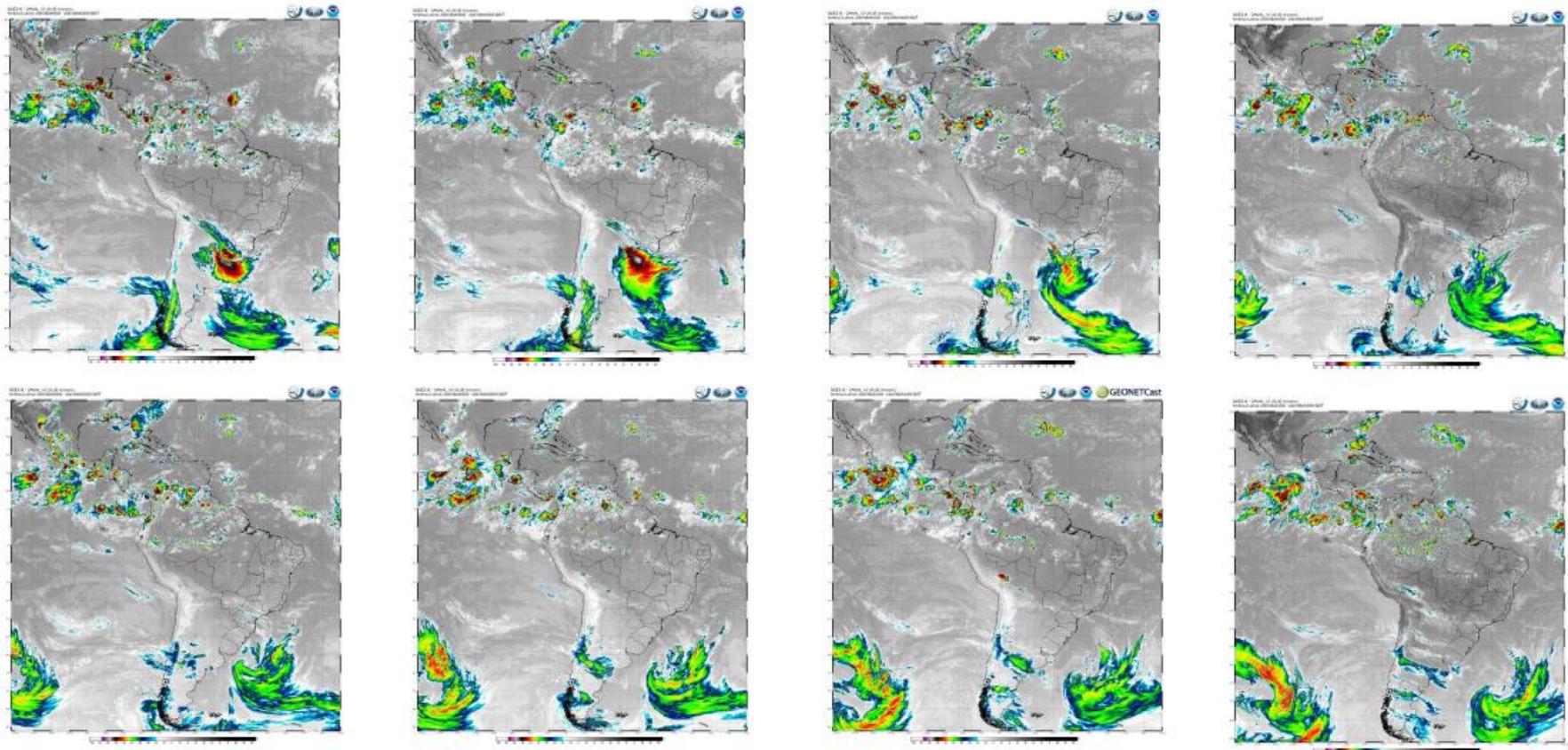
# Pressão Reduzida ao Nível do Mar

## 00Z30JUN2021 a 18Z01JUL2021, 06 em 06 UTC



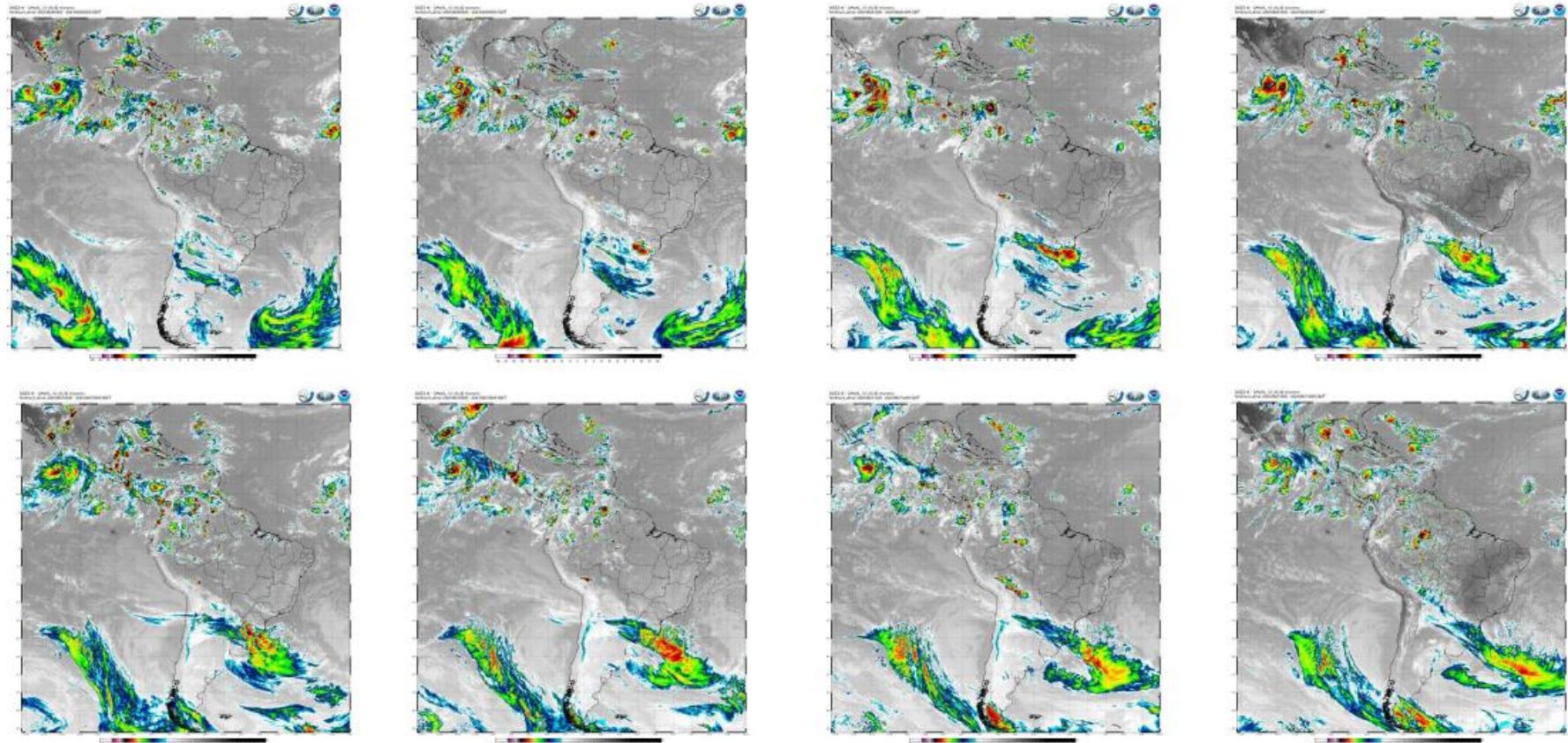
A14) Imagem de Satélite GOES-16 (Ciclone Bomba)

**Imagens de Satélite (AMS Clean Band IR Ch13 10.3 um)**  
**00Z24JUN2021 a 18Z25JUN2021, 06 em 06 UTC**



A15) Imagem de Satélite GOES-16 (Ciclone Bomba)

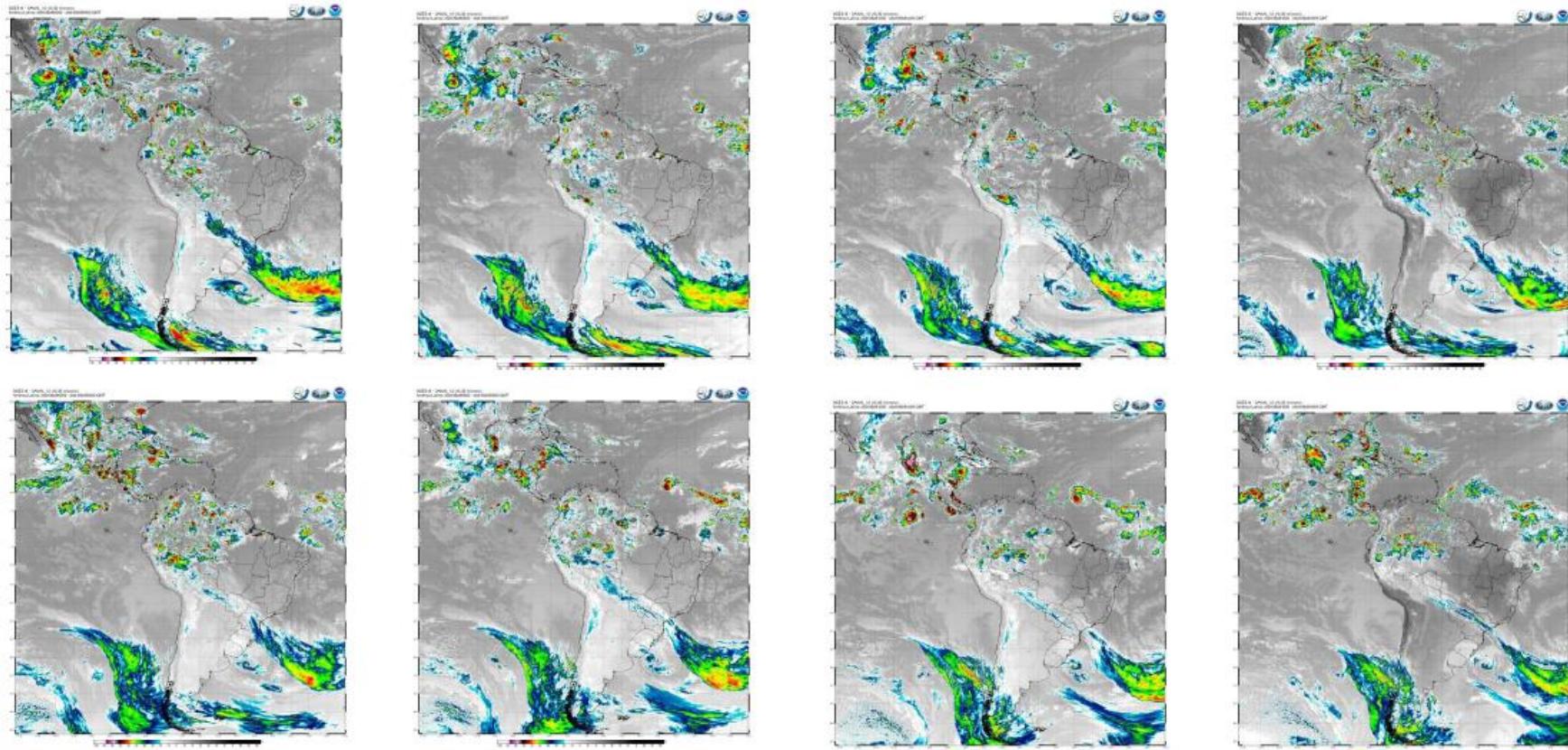
**Imagens de Satélite (AMS Clean Band IR Ch13 10.3 um)**  
**00Z26JUN2021 a 18Z27JUN2021, 06 em 06 UTC**



A16) Imagem de Satélite GOES-16 (Ciclone Bomba)

## Imagens de Satélite (AMS Clean Band IR Ch13 10.3 um)

00Z28JUN2021 a 18Z29JUN2021, 06 em 06 UTC



A17) Imagem de Satélite GOES-16 (Ciclone Bomba)

**Imagens de Satélite (AMS Clean Band IR Ch13 10.3 um)**  
**00Z30JUN2021 a 18Z01JUL2021, 06 em 06 UTC**

