



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.16.15.18-NTC

AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA DA EVOLUÇÃO DO SMG (VERSÃO 2.1.0)

Luiz Fernando Sapucci
Carlos Frederico Bastarz
João Gerd Zell de Mattos
Ivette Hernandes Banos
Christiano Eichholz
Wanderson Santos
Renato Galante Negri
Ariane Frassoni

Relatório técnico periódico sobre a avaliação de acompanhamento da evolução do Sistema de Modelagem Global (SMG). O presente documento se refere a versão TAG de número SMG V2.1.0 em processo de pré operacionalização.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TAMPU2>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

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

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

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

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

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.16.15.18-NTC

AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA DA EVOLUÇÃO DO SMG (VERSÃO 2.1.0)

Luiz Fernando Sapucci
Carlos Frederico Bastarz
João Gerd Zell de Mattos
Ivette Hernandes Banos
Christiano Eichholz
Wanderson Santos
Renato Galante Negri
Ariane Frassoni

Relatório técnico periódico sobre a avaliação de acompanhamento da evolução do Sistema de Modelagem Global (SMG). O presente documento se refere a versão TAG de número SMG V2.1.0 em processo de pré operacionalização.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TAMPU2>>

INPE
São José dos Campos
2019



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Sumário Executivo

O Sistema de Modelagem Global (SMG) do CPTEC é composto pelo modelo *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM), e o sistema de assimilação de dados *Grid-point Statistical Interpolation* (GSI). A finalidade desse sistema é produzir as melhores previsões numéricas de tempo utilizando o que se tem de melhor em relação à modelagem numérica disponível no centro, bem como o melhor conjunto de informações provenientes das redes de observações convencionais e de satélite em um fluxo contínuo ininterrupto recebido no CPTEC, e com a menor latência possível. Esse processo envolve um trabalho conjunto da assimilação de dados, da modelagem numérica global e dos especialistas em dados convencionais e de satélites, sendo estes os principais atores das três divisões do CPTEC. O objetivo final desse sistema é permitir que o modelo BAM atinja seu máximo potencial através do fornecimento de condições iniciais que explorem todas as informações presentes na base de dados observacional disponível no CPTEC. O presente documento visa apresentar uma avaliação diagnóstica da versão SMG V2.1.0 para equiparar, através de métricas quantitativas, a evolução gradativa do sistema em comparação com as suas versões anteriores. Diversos aspectos da assimilação de dados são abordados nessa avaliação aplicando a metodologia de desenvolvimento em espiral utilizada e descrita na versão V1.0.0, na qual cada processo é repetido até que uma modificação impacte positivamente em todas as demais ou que os impactos negativos sejam conhecidos, aceitos ou absorvidos. A versão do SMG, denominada V2.1.0, avaliada nesse documento foi submetida para operacionalização, a qual recebeu significativos investimentos na melhoria da interface para deixá-la flexível com relação a resolução utilizada no modelo e a resolução usada no sistema de assimilação. A versão em avaliação aqui é comparada com a versão anterior (V2.0.2) visando diagnosticar a qualidade dos resultados obtidos e reportar a evolução do sistema. Pretende-se posteriormente elaborar uma série de outras avaliações depois que melhorias e ajustes mais apropriados sejam realizados no sistema, o que deverá ser feito de forma contínua, e que deverão ser incorporadas na versão operacional.

Palavras chave: Previsão Numérica de Tempo, Assimilação de Dados, BAM, GSI, Avaliação de Modelos.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Esquema ilustrativo da metodologia de desenvolvimento e ajustes do SMG, o qual relaciona as frentes de trabalho associadas na evolução do sistema.	6
2.2 Distribuição dos 64 níveis sigma do modelo BAM (TQ0299L064), nas versões SMG V2.0.0 (“a” e “c”) e SMG V2.1.0 (“b” e “d”). As figuras “c” e “d” mostram a distribuição dos níveis sigma em escala logarítmica, ressaltando as diferenças nos níveis mais baixos.	14
4.1 Skill previsões 24 horas a partir das análises do SMG na resolução TQ0062L028.	20
4.2 Skill previsões 48 horas a partir das análises do SMG na resolução TQ0062L028.	21
4.3 Gráficos da função custo (painel superior/esquerdo), o gradiente dessa função (superior/direito), dimensão dos passos no processo de procura do estado de mínima variância (inferior/esquerdo) e o coeficiente de busca (<i>b</i>) (inferior/direito), para o ciclo de assimilação realizado com o uso da versão SMG V2.1.0 na data 06/05/2015 as 12:00 UTC (2015050612).	23
4.4 Valores da função custo no início de cada ciclo de assimilação (curva vermelha) e no final do processo (curva verde) para as rodadas de 00 e 12 UTC (gráfico superior) e de 06 e 18 UTC (gráfico inferior) para o experimento EXP com o SMG V2.1.0.	24
4.5 Composição da função custo, o gradiente dessa função, dimensão dos passos no processo de busca do estado de mínima variância e o coeficiente de busca (<i>b</i>) obtido com o uso da versão SMG V2.1.0 (EXP, curva verde) e SMG V2.0.2 (CNT, curva vermelha) para o período de 01/05/2015 às 06:00 UTC até 14/05/2015 às 00:00 UTC.	25
4.6 Valores mínimos da função custo para cada ciclo. As linhas representam os resultados da versão V2.1.0 controle (CNT, curva vermelha) em comparação com a versão V2.0.2 (EXP, curva verde)	27
4.7 Localização espacial dos valores de umidade negativa na análise gerada pela versão SMG V2.1.0. As figuras superiores são para o primeiro dia do período e as figuras inferiores são para o dia 28 às 12:00 (um dos últimos dias do período avaliado), sendo a esquerda para o <i>first guess</i> e da direita para a análise.	31

4.8	Serie temporal do somatório dos valores de umidade negativa gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (<i>First Guess</i> e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (<i>First Guess</i> e Análise) para diferentes camadas do perfil atmosférico (a esquerda) e para faixas de latitude (a direita).	32
4.9	Perfis verticais do número de casos de umidade negativa gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (<i>First Guess</i> e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (<i>First Guess</i> e Análise) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado.	33
4.10	Espacialização dos valores de umidade supersaturada na análise gerada pela versão SMG V1.0.0. Figura da esquerda é para o primeiro dia do período e a figura da direita é para o último dia do período avaliado. . .	35
4.11	Serie temporal do somatório dos valores de umidade supersaturada gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (<i>First Guess</i> e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (<i>First Guess</i> e Análise) para diferentes camadas do perfil atmosférico (a esquerda) e para faixas de latitude (a direita).	36
4.12	Perfis verticais do número de casos de umidade supersaturada gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (<i>First Guess</i> e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (<i>First Guess</i> e Análise) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado.	38
5.1	Relação dos diferentes tipos de dados considerados convencionais no GSI e as respectivas variáveis a eles relacionadas (assimiladas ou monitoradas) em seus respectivos níveis de pressão.	43
5.2	Distribuição espacial típica das estações de superfície com dados de pressão assimilados, sendo os pontos em cinza as estações com dados de pressão medidos e os pontos em azul são os dados de pressão calculados a partir das medidas do altímetro e altitude, ambos sendo assimilados no GSI.	45
5.3	Distribuição espacial das estações de superfície com dados de pressão assimilados no ECMWF. As cores utilizadas sobre os pontos da posição das observações se referem aos valores médios mensais do OmA. (Fonte: site ECMWF).	46
5.4	Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica de estações a superfície foram assimiladas no experimentos com a versão SMG V2.1.0.	47
5.5	Distribuição espacial dos dados não assimilados por ausência de dados de pressão a superfície.	48

5.6	Distribuição espacial dos dados de vento assimilados provenientes de radiossondas, sendo os pontos verdes as radiossondas e os laranja os dados de Pibal, para os diferentes horários sinóticos para o dia 31/05/2015.	50
5.7	Distribuição espacial dos dados provenientes de radiossondas utilizados na assimilação no ECMWF. A cor dos pontos plotados no mapa se referem aos número médio de observações no período. (Fonte: site ECMWF).	51
5.8	Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica coletados por radiossondas foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda, SMG V2.0.0 no centro e SMG V2.1.0 a direita.	52
5.9	Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em radiossondas foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.1.0 a direita.	53
5.10	Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em balão piloto (Pibal) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.1.0 a direita.	54
5.11	Série temporal da quantidade de dados de radiossondas rejeitados no GSI para o experimento da versão SMG V1.0.0 (em vermelho) e para o experimento da versão SMG V2.1.0 (em verde).	55
5.12	Distribuição espacial dos dados de temperatura provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.	57
5.13	Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.	58
5.14	Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões utilizados na assimilação realizada no ECMWF. As cores utilizadas sobre os pontos da posição das observações se referem aos valores médios mensais do OmA. (Fonte: site ECMWF).	59
5.15	Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.	60
5.16	Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.	61
5.17	Serie temporal dos dados de sensores em aviões que foram rejeitados no GSI. A linha em vermelho são os números de dados rejeitados no experimento V1.0.0 e a linha em verde são os dados rejeitados no experimento V2.1.0.	62
5.18	Distribuição espacial típica dos dados de sensores em aviões rejeitados no experimento V2.0.0 para a camada 300 a 100 e 1000 a 300 para a temperatura e componentes do vento.	63

5.19	Distribuição espacial dos dados de pressão assimilados provenientes de estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) nos diferentes horários sinóticos para o dia 09/05/2015.	64
5.20	Distribuição espacial dos dados de pressão, temperatura, umidade e vento coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) e assimilados as 12 UTC do dia 09/05/2015.	65
5.21	Distribuição espacial dos dados monitorados (devido a ausência de dados de pressão) de temperatura (esquerda) e vento (direita) coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) para as 12 UTC do dia 09/05/2015.	66
5.22	Distribuição espacial dos dados provenientes de navios (figura da esquerda) e de boias (a direita) utilizados na assimilação no ECMWF. A cor dos pontos plotados no mapa se referem aos valores do OmA nos pontos onde os dados foram assimilados. (Fonte: site ECMWF).	67
5.23	Serie temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda, SMG V2.0.0 ao centro e SMG V2.1.0 a direita.	68
5.24	Serie temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.0.0 a direita.	69
5.25	Serie temporal da quantidade de dados SFCSHIP rejeitados no GSI para o experimento da versão SMG V1.0.0 (em vermelho) e para o experimento da versão SMG V2.0.0 (em verde).	70
5.26	Distribuição espacial dos dados das componentes do vento provenientes de perfiladores da rede NOAA, dados recuperados de observações de radar e de boletins reportados por pilotos.	72
5.27	Distribuição espacial dos dados de vento a superfície oceânica obtidos por escaterômetro embarcados em satélites e disponíveis para a assimilação no GSI.	73
5.28	Distribuição espacial dos dados de <i>Integrated Precipitable Water</i> (IPW) de receptores GPS disponíveis para a assimilação mas monitorados pelo GSI. Observa-se que há dados disponíveis nesse período que se concentram sobre a América do Norte.	74

5.29	Distribuição espacial dos dados coletados por sensores rádio acústicos - perfil de temperatura virtual (RAAS) disponíveis para a assimilação mas monitorados pelo GSI. Observa-se que os dados disponíveis nesse período que se concentram sobre a América do Norte.	75
5.30	Distribuição espacial de todos os tipos de dados de vento utilizados na assimilação com o GSI, 06:00 UTC.	77
5.31	Distribuição espacial típica de todos os tipos de dados referentes a vento estimado a partir do rastreamento de nuvens (AMVs) 06:00 UTC.	77
5.32	Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus	78
5.33	Distribuição espacial de todas as observações de vento assimiladas. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus.	78
5.34	Distribuição espacial de todas as observações de vento rejeitadas. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus.	79
5.35	Distribuição espacial da diferença entre a velocidade do vento assimilado e o <i>background</i> . Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus.	79
5.37	Esquema ilustrativo do comportamento do sinal quando esse atravessa a atmosfera terrestre, no momento em que acontece uma ocultação do sinal GPS emitido pelo satélite do sistema e recebido por um receptor a bordo do satélite LEO (Figura adaptada de Lee et al. (2001).	81
5.38	Distribuição espacial dos perfis de ROGNSS assimilados no SMG V2.0.0 para o dia 20150510 às 12 UTC e no SMG V2.1.0 para esse mesmo dia, em função dos satélites utilizados no GSI. A escala de cores nessa figura indicam os satélites assimilados em cada análise. O gráfico de barras no inferior da figura mostra a contagem total de cada satélite.	83
5.39	Série temporal e por níveis verticais da atmosfera dos valores de OmA médios e o seu desvio padrão (painéis superiores e centrais, respectivamente) e da quantidade de dados de refratividade assimilados (painéis inferiores) do satélite LEO COSMIC FM (740), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas.	85
5.40	Série temporal e por níveis verticais da atmosfera dos valores de OmA médios e o seu desvio padrão (painéis superiores e centrais, respectivamente) e da quantidade de dados de refratividade assimilados (painéis inferiores) do satélite LEO MetOp-A (4), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas.	86

5.41	Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 1000 e 0 hPa do satélite LEO MetOp-A (4), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC (painel esquerdo) e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas (painel direito).	87
5.42	Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 1000 e 0 hPa do satélite LEO COSMIC FM (740), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC (painel esquerdo) e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas (painel direito).	88
5.43	Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 300 e 0 hPa dos satélites LEO COSMIC FM (740) (painel esquerdo) e MetOp-A (4) (painel direito), no SMG V2.1.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC.	88
5.44	Distribuição espacial de OmA (K) com correção de bias, durante os horários sinóticos. Considerando o canal 1 usando a versão SMG V2.1.0, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.	91
5.45	Número de observações assimiladas, por canal da versão SMG V2.1.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.	92
6.1	Ganho percentual do VIES em função do tempo de integração do modelo sobre as regiões HN, HS, TR e AS. Os tons de verde, representam melhoria da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.	96
6.2	Ganho percentual do RMSE sobre as regiões HN, HS, TR e AS. As cores mais próximas do verde escuro, representam melhoria da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.	97
6.3	Ganho percentual do ACOR sobre as regiões HN, HS, TR e AS. As cores mais próximas do verde escuro, representam melhoria da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.	98
6.4	Correlação de Anomalia da Altura Geopotencial em 500 hPa (ZGEO-500) sobre a região AS, no período de 2015050100 a 2015053100, das versões V2.1.0 e V2.0.0 do SMG.	100

6.5	Viés (bias, na figura) e RMSE (UMRSE, na figura), comparando a habilidade de previsão das previsões de até 72 horas de precipitação do modelo BAM, inicializado pelas análises do NCEP (curvas vermelhas) e inicializado pelas análises do sistema de assimilação GSI (curvas azuis) e as previsões do modelo GFS do NCEP (curvas verdes). A avaliação é feita para as regiões da Bacia do Prata (La Plata), Sudeste (Southeast), Centro-Oeste (Central-West), Nordeste (Northeast) e Amazônia (Amazon). O período da avaliação corresponde às simulações durante o mês de Junho de 2015.	103
6.6	Diagrama de Taylor comparando o <i>skill</i> das previsões do modelo BAM inicializado a partir das análises do NCEP (pontos roxos), com as análises do sistema de assimilação GSI (pontos verde e azul, nas versões V2.0.0 e V2.1.0, respectivamente), dados observados de precipitação (referência) do MERGE (estrela) e previsões do modelo GFS (pontos amarelos). Os números “1”, “2” e “3”, nos diagramas, representam o <i>skill</i> das previsões de 24, 48 e 72 horas dos experimentos sobre as regiões indicadas.	105
6.7	Série temporal da precipitação (24, 48 e 72 horas) durante o mês de Maio de 2015. A comparação é feita para as regiões a Bacia do Prata (La Plata, figura “a”), Sudeste (Southeast, “b”), Sudeste (Novo-Southeast, “c”), Centro-Oeste (Central-West, “c”), Nordeste (Northeast, “d”), Amazônia (Amazon, “e”) e América do Sul (“f”), entre os modelos BAM inicializado com as análises do NCEP (roxo), BAM com as análises do SMG V2.1.0 (amarelo), GFS (verde) e IMERG (referência, curva preta).	108

LISTA DE TABELAS

Pág.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	2
1.1 Objetivo do Documento	4
1.2 Conteúdo do Documento	4
2 Estratégia de avaliação diagnóstica do SMG	5
2.1 Metodologia	5
2.2 Ferramentas empregadas na avaliação	9
2.3 Protocolos de Avaliação Diagnóstica do GSI	10
2.4 Experimento para a Avaliação Diagnóstica do SMG V2.1.0	11
2.5 Características da versão SMG V2.1.0 em avaliação	12
3 Categoria I: Implementação e Aperfeiçoamento contidos na versão SMG em avaliação	15
3.1 Características da versão SMG V2.1.0 em avaliação	15
4 Categoria II: Monitoramento e Configuração do Sistema de Assimilação	18
4.1 Implementação de melhorias na Matriz B	18
4.2 Minimização e Condicionamento da Função Custo Variacional	21
4.3 Avaliação da Injunção de Umidade no controle de valores não físicos	27
4.3.1 Eficiência da injunção de umidade na qualidade da análise no ciclo de assimilação	28
4.3.2 Avaliação diagnóstica dos valores não físicos de umidade no SMG V2.1.0	30
4.3.2.1 Levantamento dos valores de umidade negativa	30
4.3.2.2 Análise dos valores de umidade supersaturada	34
4.4 Avaliação da Conservação de Massa Seca na rodada cíclica do GSI	39
5 Categoria III: Ampliação Gradativa da Base de Dados	41
5.1 Inclusão dos Dados Convencionais	41
5.1.1 Dados de estações meteorológicas a superfície terrestres (SYNOP e METAR)	43
5.1.1.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados	44
5.1.1.2 Avaliação da Análise em termos do OmA	46
5.1.1.3 Diagnóstico dos dados rejeitados	47

5.1.2	Dados de ar superior na atmosfera (Radiossondas, Balão Piloto, Drop-sondas)	48
5.1.2.1	Avaliação da distribuição espacial dos dados de radiossondas	49
5.1.2.2	Avaliação da Análise em termos do OmA	51
5.1.2.3	Diagnóstico dos dados rejeitados	54
5.1.3	Dados de sensores meteorológicos instalados em aviões (ACARS, AIR-CRAFT e MDCRS)	56
5.1.3.1	Avaliação da distribuição espacial dos dados	56
5.1.3.2	Avaliação da Análise em termos do OmF e OmA	59
5.1.3.3	Diagnóstico dos dados rejeitados	61
5.1.4	Dados de estações a superfície oceânica (Navios, boias e plataformas C-MAN)	63
5.1.4.1	Avaliação da distribuição espacial dos dados	64
5.1.4.2	Avaliação da Análise em termos do OmA	67
5.1.4.3	Diagnóstico dos dados rejeitados	69
5.1.5	Dados de perfiladores acústicos de vento (SODAR)	70
5.1.5.1	Avaliação da distribuição espacial dos dados	71
5.2	Inclusão dos Dados de vento estimados a partir de satélites	75
5.3	Inclusão dos Dados Radio ocultação GNSS	80
5.3.1	Avaliação da distribuição espacial dos dados	82
5.3.2	Avaliação da Análise em termos do OmA e OmF	83
5.3.3	Avaliação da Análise em termos dos dados rejeitados	89
5.4	Inclusão dos Dados de Radiâncias	89
6	Avaliação da melhoria nas previsões do modelo BAM	93
6.1	Avaliação do <i>Skill</i> das Previsões do SMG	93
6.2	Avaliação do <i>Skill</i> das Previsões de Precipitação do SMG	101
6.2.1	Diagnóstico Diário Previsões de Precipitação	101
6.2.2	Diagnóstico Mensal Previsões de Precipitação	106
7	Conclusões, comentários finais e perspectivas futuras	110
7.1	Resultados mais relevantes nos diferentes aspectos considerados	110
7.2	Roadmap de curto prazo para o desenvolvimento do SMG	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

1 Introdução

O Sistema de Modelagem Global (SMG) do CPTEC/INPE contempla como modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) o *Brazilian global Atmospheric Model* (BAM) e o sistema de assimilação de dados *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI). A finalidade principal é produzir a PNT utilizando o que se tem de melhor com relação à modelagem numérica disponível no centro, bem como o melhor conjunto de informações provenientes das redes de observações convencionais e de satélite. Esse sistema também aborda a PNT global por conjunto, a qual em futuras versões, deverá ser realizada utilizando as bases do SMG por meio da assimilação de dados híbrida, em que é utilizada a metodologia do *Ensemble Kalman Filter* com o método variacional em três dimensões para se gerar a análise. Em uma versão mais avançada do SMG, tem-se o ambicioso objetivo de fornecer a estrutura básica que possibilitará os primeiros resultados com a assimilação de dados nas demais componentes do sistema terrestre, como em modelos de superfície e modelagem oceânica.

O objetivo principal desse projeto é desenvolver um sistema que integre todos os módulos principais que possibilitam a obtenção da melhor PNT em escala global, com ênfase sobre a América do Sul, levando-se em conta todas as particularidades regionais. Entende-se por melhor PNT aquela que seja capaz de capturar o comportamento futuro da atmosfera, tanto em domínio espacial quanto temporal, apresentando informações com a melhor qualidade possível e incertezas associadas. Para que este objetivo principal seja atingido, estabeleceram-se os objetivos específicos desse projeto, que envolve (a) contínuo desenvolvimento do modelo BAM; (b) inclusão de dados que explorem todas as informações presentes na base de dados observacional (convencional e de satélite); (c) uso eficiente da base de dados disponível no CPTEC/INPE; (d) integração dos grupos envolvidos nas componentes com o desenvolvimento integrado; (e) integração do sistema de modelagem por conjuntos; (f) preparação de uma estrutura de modelagem global como alicerces para outras componentes dos sistema terrestre como superfície continental, oceânica e dos processos químicos.

Para que o sistema SMG seja capaz de evoluir de forma robusta, é crucial uma avaliação constante e rigorosa de todas as componentes (modelo BAM e sistema de assimilação GSI) em separado e posteriormente a eficiência no acoplamento das mesmas. Ênfase adequada nesse processo deve ser dado para o modelo BAM e suas particularidades com o objetivo de estar devidamente ajustado para utilizar a análise que foi gerada a partir de suas previsões. A avaliação e diagnóstico do sistema

SMG é feita em duas frentes de trabalhos: a primeira nos ajustes específicos do modelo para ser utilizado com as análises geradas, a segunda, nos ajustes do processo de assimilação de dados. Essa avaliação diagnóstica da evolução do SMG envolve um conjunto de ferramentas de avaliação disponíveis no CPTEC e que embora esteja diretamente ligada às atividades em assimilação de dados, conta com o apoio de colaboradores nas demais divisões do centro. Essa cooperação é crucial dada a experiência necessária para o tratamento adequado de toda base de dados envolvida na assimilação. Todos os documentos dessa série terão a mesma estrutura, embora cada uma das versões deverá ser mais sofisticada do que a versão anterior, em função da evolução do processo de avaliação para acompanhar a evolução no uso da base de dados, bem como na integração da modelagem por conjunto e da assimilação de outras componentes do sistema terrestre que estão contempladas na proposta do SMG.

Como a versão do GSI é a mesma em todos os sistemas de modelagem (regional e global) utilizados na DMD, a metodologia utilizada aqui reúne todas as ferramentas de avaliação e diagnóstico da assimilação. Essa metodologia de avaliação tem a prerrogativa de permitir que os diversos aspectos da assimilação sejam tratados simultaneamente na evolução do processo de assimilação. A estratégia é que em cada aspecto da avaliação esteja envolvido um especialista ou equipe de trabalho, desenvolvendo e implementando um protocolo de avaliação, possibilitando que as conclusões sobre o desempenho da assimilação em cada uma das versões seja feita. A ideia central é que os resultados satisfatórios obtidos em um aspecto da assimilação não sejam perdidos com a modificação realizada, visando melhorias em um outro aspecto. A metodologia de avaliação envolvendo os protocolos utilizados na elaboração do presente relatório tem três distintas aplicações, sendo elas:

- **Fase inicial:** diagnóstico de problemas e definição do status na evolução da maturidade dos sistemas de modelagem com assimilação de dados em desenvolvimento.
- **Fase intermediária:** avaliação da qualidade dos resultados obtidos nas versões que definirão sua operacionalidade.
- **Fase avançada:** monitorar os sistemas durante o processo em operação, sendo essa avaliação feita constantemente, também operacionalmente.

1.1 Objetivo do Documento

O objetivo desse documento é apresentar a avaliação diagnóstica da versão V2.1.0 do sistema SMG, que é a versão pré operacional do sistema. Esses resultados serão utilizados como referência para medir a evolução do mesmo com a publicação das futuras versões, já em desenvolvimento na divisão. Detalhes técnicos sobre a versão SMG V2.1.0 podem ser acessados no relatório final de entrega da série V2.0.0 [Mattos et al. \(2018\)](#).

1.2 Conteúdo do Documento

Para a avaliação diagnóstica da versão SMG V2.1.0 o documento reapresenta na Seção 2 a metodologia de avaliação empregada no âmbito da qualidade da análise, a qual se divide em três categorias: (I) implementação do código e *scripts* com *High Performance Computing* (HPC); (II) Monitoramento e configuração da assimilação de dados; (III) Inclusão de dados, os quais são abordadas em detalhes nas Seções 3, 4 e 5, respectivamente. Na Seção 6 é avaliado o impacto da qualidade da análise na melhoria e eficiência do modelo em fornecer previsões de melhor qualidade, no que diz respeito ao impacto dos dados nas previsões, valores de métricas estatísticas na qualidade das previsões das variáveis de estado e na precipitação atmosférica. Na Seção 7, são discutidas as perspectivas futuras e considerações finais a respeito dessa avaliação diagnóstica que indicarão a trajetória para a evolução desse processo corrigindo falhas e tornando o processo de avaliação mais eficiente.

2 Estratégia de avaliação diagnóstica do SMG

A avaliação diagnóstica tem por objetivo acompanhar e diagnosticar problemas durante o aprimoramento do processo de assimilação de dados, o qual envolve correções de erros, ajustes nos parâmetros de minimização no sistema de assimilação, ampliação gradativa de um conjunto de dados de satélites; diagnósticos de problemas na modelagem, assimilação e o processo de não assimilação dos dados; aprimoramentos na representação e aplicação da matriz \mathbf{B} entre outras tarefas. Todos esses trabalhos são correlacionados de forma que a modificação em uma frente impacta diretamente nos resultados de outra. Uma metodologia específica para essa avaliação foi implementada, a qual é descrita em detalhes na Seção 2.1 onde são apresentados os protocolos estabelecidos para a sua aplicação, as lista de ferramentas utilizadas e os experimentos realizados.

2.1 Metodologia

Uma metodologia de desenvolvimento em espiral foi implementada na qual cada processo é repetido até que uma modificação impacte positivamente em todas as demais ou que os impactos negativos sejam conhecidos, aceitos ou absorvidos. Para que esse desenvolvimento tenha êxito é muito importante que se tenha uma metodologia de avaliação para cada um desses aspectos do processo. Estes são tratados aqui como “Protocolos de Avaliação”. A Figura 2.1 abaixo mostra um esquema ilustrativo da metodologia e relaciona as frentes de trabalho com a ideia de desenvolvimento em espiral.

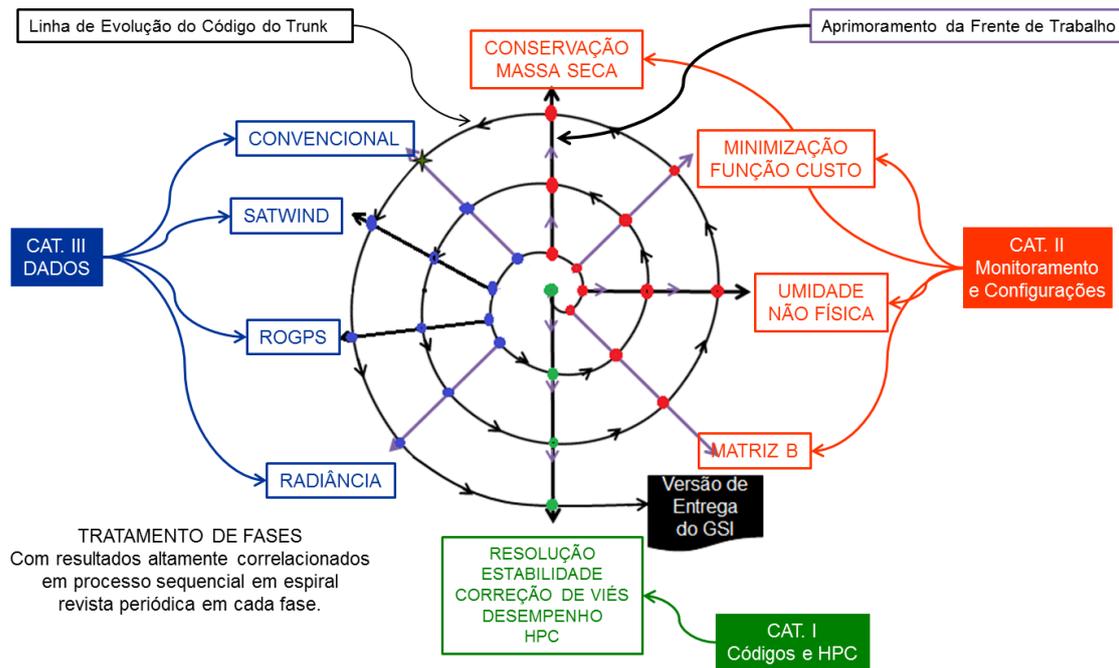


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo da metodologia de desenvolvimento e ajustes do SMG, o qual relaciona as frentes de trabalho associadas na evolução do sistema.

Como mostra a Figura 2.1, o processo envolve 9 frentes de trabalho divididas em 3 categorias. As três categorias são: Códigos e HPC (com correções e melhorias na computação de alto desempenho); Monitoramento e Configurações do sistema; e a última, Dados, que envolve a ampliação da base de dados observacionais. Essas categorias são listadas abaixo e melhor detalhadas nas seções subsequentes onde o sistema é avaliado em cada um desses aspectos utilizando protocolos de avaliação, com resultados apresentados e discutidos apropriadamente.

- **Categoria I: Códigos e HPC**

- Implementação, melhorias e otimização do código visando novas funcionalidades e melhor desempenho computacional. Essa frente de trabalho trata continuamente da evolução das versões da assimilação acoplada ao BAM com a implementação no código de novas funcionalidades e do tratamento da otimização do mesmo, ao envolver o pessoal de *High Performance Computing* (HPC) do CPTEC. O objetivo é melhorar o desempenho do sistema de forma geral com a resolução espacial mais adequada ao encontrar meios de aumentar o desempe-

nho computacional do sistema ao identificar gargalos computacionais e trabalhar para minimizá-los. Nessa frente está envolvida a tarefa de testar diferentes configurações do modelo visando aprimorar o desempenho do sistema na utilização das informações contidas nos dados, o que deve ser refeita durante a evolução da base de dados usada. Além disso, está incluída a identificação e correção de prováveis *bugs* que podem ocorrer ou ser identificados em cada um dos processos, tanto na utilização das novas bases de dados no GSI, como no uso de diversas configurações e novas funcionalidades do modelo BAM.

- **Categoria II: Monitoramento e Configurações**

1. Implementação de melhorias na representação e na aplicação da matriz \mathbf{B} , com o uso de uma base de dados de previsões adequada, provenientes da versão mais estável do SMG com assimilação. Aborda todos os desenvolvimentos associados à determinação e calibração da matriz \mathbf{B} , para uso no ciclo de assimilação de dados e atualizações após modificações significativas no sistema de assimilação de dados, tanto na modificação da base de dados utilizada como em outras melhorias no SMG e no modelo BAM. Em um processo iterativo, essa frente de trabalho visa permitir monitorar o impacto correlacionado com as outras melhorias do SMG;
2. Ajustes nos parâmetros e monitoramento do processo de minimização da Função Custo no sistema de assimilação em função da base de dados utilizados. Com o acoplamento do modelo BAM com o sistema de assimilação GSI, a minimização e o condicionamento da função custo variacional são as partes do sistema de assimilação de dados que irão permitir que a análise possa ser determinada. Diversos parâmetros deverão ser definidos, os quais são correlacionados com a base de dados usada e a interação dessas frentes deve ser monitorada;
3. Avaliação da contribuição da injeção de umidade no controle de valores não físicos de umidade no ciclo de assimilação. Na análise dos campos de umidade gerados no final do processo de assimilação, são observados pontos com valores negativos ou valores de umidade acima do valor de saturação. Esses pontos representam soluções puramente numéricas e em sua maioria são geradas no processo de integração do modelo (e.g., provenientes das transformações entre o espaço espectral e o espaço físico), ou seja, não correspondem à realidade física e

precisam ser tratados durante o processo de minimização da função custo para que não sejam amplificados. O GSI usa um termo adicional na função custo, chamado de “injunção de umidade”. Este termo tem a função de regular o processo de minimização, conduzindo a solução para valores de umidade mais próximos da realidade física. O objetivo aqui é identificar o papel da injunção da umidade na qualidade final das previsões;

4. Avaliação da configuração dos parâmetros de conservação de massa seca na realização cíclica do GSI. Em um dos processos do GSI, existe a possibilidade de acionar e regular um parâmetro para forçar a conservação de massa seca durante o processo cíclico de assimilação de dados, o qual deve ser investigado a fim de se determinar qual o valor mais apropriado para o acoplamento do GSI com o BAM, a partir da base de dados que se pretende usar. Essa frente de trabalho tem o objetivo de determinar o melhor parâmetro para esse caso.

- **Categoria III: Dados**

1. Inclusão dos Dados Convencionais. Avaliar e monitorar o desempenho de todos os diferentes sistemas de observação, avaliando os benefícios e identificando problemas. Uma metodologia de avaliação e monitoramento deverá ser elaborada levando em consideração a grande diversidade de sistemas envolvidos;
2. Inclusão dos Dados de SatWind. Dados de velocidade do vento obtidos por meio do movimento de nuvens observadas por imageadores passivos a bordo de satélites. Em geral esses satélites são de órbita geostacionária posicionados em torno do Equador ao redor do globo, limitando a estimativa de ventos à latitudes menores que 60° . Nessa frente, o impacto desses dados deve ser monitorado em conjunto com todas as demais melhorias do SMG;
3. Inclusão dos Dados de Rádio Ocultação GNSS. Os dados de Rádio Ocultação GNSS (ROGNSS) são perfis de observações indiretas da atmosfera. Os dados podem ser em três níveis de processamento: perfis do ângulo de ocultação em função do parâmetro de impacto; perfis de refratividade em função da altura geométrica e perfis de temperatura e umidade em função da pressão atmosférica. O impacto dos dados em relação a quantidade dos dados disponíveis e utilizados serão diagnosticados e monitorados;

4. Inclusão das observações de radiância. Sendo os dados de maior importância para a assimilação em modelos globais de PNT, os dados de radiância compõem um módulo principal que envolve diversos satélites e sensores. Nessa frente de trabalho será feita uma análise diagnóstica do impacto e da interferência nas outras frentes de trabalho.

2.2 Ferramentas empregadas na avaliação

A metodologia de desenvolvimento empregando protocolos de avaliação para cada uma das frentes de trabalho dentro de um mecanismo de desenvolvimento correlacionado, explora as ferramentas disponíveis no CPTEC e permite a avaliação do SMG de forma robusta. Essas ferramentas são:

- **ReadDiag**: módulo Fortran que permite acessar de forma eficiente, a partir de *scripts* em Python, os dados de saída dos diagnósticos da assimilação de dados do GSI. Esse módulo permite que *scripts* do python possam ser explorados para a avaliação do processo de assimilação dos mais variados tipos de dados. Há um pacote de *scripts* que permite a plotagem da distribuição espacial dos dados, o monitoramento dos dados rejeitados e densidade temporal dos dados, series temporais de Observação menos Previsão e Observação menos Análise (OmF e OmA, respectivamente), entre outras possibilidades;
- **STAT**: pacote de estatística da assimilação de dados no GSI. O STAT é uma ferramenta que faz parte dos protocolos, a qual contém uma série de rotinas Fortran e *scripts* do *Grid Analysis and Display System* (GrADS) destinados a organizar os valores estatísticos da quantidade de dados assimilados com valores do OmF e OmA, de toda a base de dados disponível para assimilação. Esse pacote está sendo mantido, pois para os dados de radiâncias o pacote ReadDiag ainda não foi implementado;
- **SCANTEC**: é o Sistema Comunitário de Avaliação de Modelos Numéricos de Tempo e Clima, que tem o objetivo principal de explorar as métricas básicas para a adequada avaliação dos modelos de PNTC, as quais atendam a todos os quesitos esperados nesta tarefa, tanto pelos desenvolvedores de modelos numéricos, como dos usuários desses modelos. No contexto dessa avaliação o SCANTEC tem a função de quantificar em termos de qualidade das previsões produzidas pelo BAM em comparação com as análises geradas pelo GSI, ambos no SMG.

2.3 Protocolos de Avaliação Diagnóstica do GSI

Para tornar mais fácil, correta e flexível a avaliação periódica dos resultados obtidos na assimilação de dados com o GSI, e permitir a comparação com os resultados obtidos em outras versões do sistema, há a necessidade de se criar uma metodologia padronizada de avaliação desses resultados. Essa padronização é o que se denomina “Protocolo de Avaliação”, os quais são desenvolvidos para cada um dos aspectos abordados nas três categorias apresentadas na seção anterior. Esses protocolos são desenvolvidos baseados em *scripts*, programas *fortran* e usam as ferramentas disponíveis na DMD para gerar figuras que visam sintetizar os resultados de forma a exaltar a evolução do desempenho do SMG em comparação com versões anteriores. Para cada uma das frentes de trabalho destacadas na Figura 2.1, são desenvolvidos protocolos específicos de avaliação dos resultados obtidos na assimilação. Tanto a atividade de desenvolvimento como de avaliação em cada uma dessas frentes de trabalho são tratadas por um pequeno grupo de especialistas, que envolvem atores de diferentes divisões, que do ponto de vista da avaliação devem estar comprometidos em:

- Desenvolver continuamente uma metodologia de avaliação dos resultados obtidos na assimilação de dados no GSI no aspecto abordado, especificando os resultados básicos que devem ser monitorados através da disponibilidade de um protocolo de avaliação onde um valor ou estado tido como referência deve ser disponibilizado;
- Manter uma metodologia de avaliação mais avançada para uma análise mais robusta do que aquela disponibilizada nos protocolos básicos de avaliação, a qual deve ser utilizada para contribuir para a evolução do sistema de forma mais eficiente;
- Interagir com as demais equipes para acompanhar e auxiliá-las na solução de problemas relacionados com a sua frente de trabalho e avaliação;
- Refazer sua avaliação e ajustar o protocolo após modificações no sistema atualizando seus valores de referência e publicando-os periodicamente;
- Elaborar um relatório descrevendo de forma objetiva os resultados gerados, referentes ao aspecto abordado pela equipe para cada uma das versões do SMG publicada no ramo TAG do SVN.

Esses protocolos têm a premissa de permitir que os diversos aspectos da assimilação de dados sejam tratados simultaneamente, na evolução do processo ao fornecer metodologias eficientes que avaliem facilmente todos os aspectos. Associado a isso, como o GSI é o mesmo sistema de assimilação em todos os sistemas de modelagem utilizados na DMD, os protocolos de avaliação desenvolvidos podem servir para diversas versões, tanto regional como global, pois independem dos modelos utilizados. A ideia básica é que os resultados satisfatórios obtidos em um aspecto da assimilação não sejam perdidos com a modificação realizada visando melhorias em um outro aspecto. Essa metodologia de avaliação possui três aplicações distintas, sendo elas:

- **Fase inicial (desenvolvimento):** utilizado no diagnóstico de problemas e definição do status na evolução da maturidade dos sistemas de modelagem com assimilação de dados em desenvolvimento. Nessa fase pode ser implementado um processo automático no SVN (e.g., utilizando a ferramenta [Jenkins](#)) que faz a avaliação baseada em parâmetros e aprova ou reprova a versão depositada no repositório, emitindo um relatório de erros ao usuário;
- **Fase intermediária (validação):** aplicado na avaliação da qualidade dos resultados obtidos nas versões parciais de entrega do sistema, com os resultados reportados nos relatórios técnicos das respectivas versões;
- **Fase avançada (operação):** utilizadas em processos de monitoramento dos sistemas durante o processo em operação, sendo essa avaliação feita periodicamente, também em processos operacionais.

2.4 Experimento para a Avaliação Diagnóstica do SMG V2.1.0

Para avaliar o desempenho do sistema de assimilação da versão SMG V2.1.0, foram realizados diferentes experimentos para todo o mês de maio de 2015 (2015050106-2015053118). Além da versão em avaliação, foi utilizada a versão SMG V2.0.2 (controle). As características mais relevantes desse experimento são listados abaixo:

- **Particularidades da versão:** Nesse experimento foram utilizadas as versões SMG V2.0.2 como controle, a qual é a primeira versão com a implementação da interface que permite flexibilidade na utilização das resoluções do modelo e da assimilação. A resolução usada é a TQ0299L064 no modelo e de TQ0213L064 na assimilação de dados;

- **Dados utilizados na rodada:** Nos experimentos com as versões 2.0.2 e 2.1.0, todos os dados de observações convencionais foram assimilados, bem como dados de SatWind e ROGNSS. Dados de radiância do sensor de microondas *Advanced Microwave Sounding Unit-A* (AMSU-A) foram também assimilados,;
- **Configuração do GSI:** a configuração utilizada ao rodar o GSI nesse experimento foi a mesma utilizada no sistema G3DVAR, quando esse estava na operação. As injunções estavam desligadas e o número de *outer loops* foi de apenas 1 com 100 *inner loop*.

2.5 Características da versão SMG V2.1.0 em avaliação

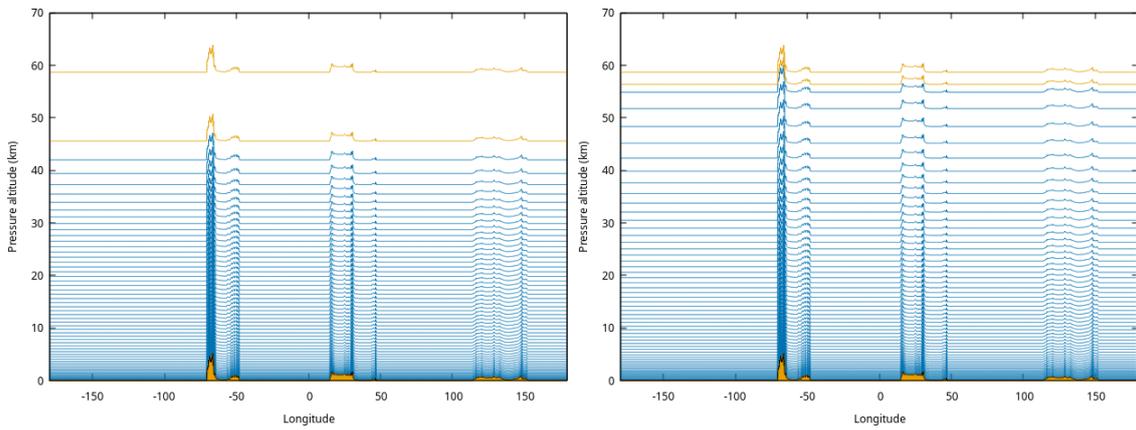
Aqui é apresentado um resumo do que foi contemplado na elaboração da versão SMG V2.1.0. Mais detalhes podem ser obtidos em [Mattos et al. \(2018\)](#), o qual é o relatório de publicação dessa versão. De forma geral, os seguintes pontos podem ser destacados para essa versão:

- **Implementação no código do SMG:** no que compete ao acoplamento do modelo BAM com o sistema GSI, além das modificações e melhorias já contempladas nas versões anteriores do sistema, a implementação mais importante é a melhoria na interface entre o modelo e a assimilação, possibilitando que o modelo possa ser realizado em qualquer resolução, independente da resolução da análise gerada pelo sistema GSI. Essa nova funcionalidade do sistema é bastante pertinente do ponto de vista operacional, o qual pode gerar análises apropriadas para diversas versões do modelo em diferentes resoluções;
- **Configuração do GSI:** a configuração aqui utilizada é a mesma ou similar a configuração do G3DVAR operacional. Foram feitos ajustes nos parâmetros de minimização da função custo com apenas 1 *outer loop* com 100 *inner loops* no processo. As bases de dados de observações convencionais e de satélites, já utilizados na versão V1.0.0, foram mantidas.
- **Otimização do código:** a atual versão em avaliação tem a resolução mais alta do que a anterior e foram feitos testes a para modificação do número de processadores utilizados. Entretanto, esse número não foi implementado por problemas na instabilidade numérica do modelo, o que está sendo tratado para gerar as próximas versões na qual número de processadores mais adequado deverá ser utilizado;

- **Ajustes e configurações na física e dinâmica do BAM:** com o apoio da equipe de modelagem numérica global, alguns problemas no modelo identificados pela equipe da assimilação foram reportados. A equipe da modelagem fez modificações na distribuição vertical dos níveis sigma do modelo (Figura 2.2) e uma execução longa (1 ano, em modo climático) foi realizada para avaliar a estabilidade dessa versão modificada. Essa implementação foi uma modificação importante e gerou a revisão V2.1.0 do SMG;
- **Correções de bugs:** diversos foram os *bugs* encontrados no tanto no GSI, quanto no BAM e também na interface do modelo com o GSI, os quais foram corrigidos e reportados adequadamente. A lista dessas correções pode ser acessada em [Mattos et al. \(2018\)](#).

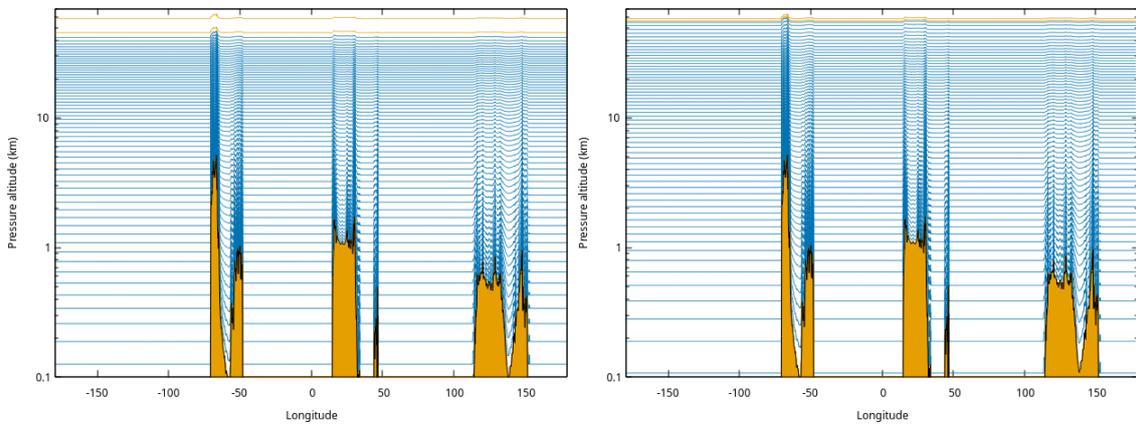
A Figura 2.2 apresenta as diferenças em termos da distribuição dos níveis sigma do modelo BAM, para as versões com 64 níveis verticais. Estas distribuições impactam diretamente as simulações cíclicas do SMG, uma vez que são estes níveis que serão utilizados desde a primeira até a última análise gerada pelo sistema.

A versão do SMG V2.1.0 está em processo de pré-operação na resolução TQ0299L064 (truncamento triangular na onda zonal de número 299 e estrutura vertical de 64 níveis). O presente documento apresenta um diagnóstico dos resultados obtidos para atestar a eficiência do processo e reportar o que é necessário para melhorar o *skill* do sistema em sua evolução em paralelo ao processo operacional.



(a) Níveis Sigma SMG V2.0.0

(b) Níveis Sigma SMG V2.1.0



(c) Níveis Sigma SMG V2.0.0 (*log*)

(d) Níveis Sigma SMG V2.1.0 (*log*)

Figura 2.2 - Distribuição dos 64 níveis sigma do modelo BAM (TQ0299L064), nas versões SMG V2.0.0 (“a” e “c”) e SMG V2.1.0 (“b” e “d”). As figuras “c” e “d” mostram a distribuição dos níveis sigma em escala logarítmica, ressaltando as diferenças nos níveis mais baixos.

3 Categoria I: Implementação e Aperfeiçoamento contidos na versão SMG em avaliação

A frente de trabalho da Categoria I, sendo a primeira da metodologia de desenvolvimento empregada na proposta do SMG, aborda todos os aspectos computacionais que são implementados para dar origem a versão do sistema em avaliação no presente documento. Nessa frente de trabalho, mais associada com a interface do sistema GSI com o modelo BAM, envolve as seguintes tarefas:

- Implementação de novas funcionalidades do SMG com o aprimoramento do sistema no uso de mais dados observacionais, atualizações nas parametrizações e componentes do sistema de modelagem do modelo BAM e ajustes na configuração da dinâmica do modelo realizada pelo grupo de modelagem a fim de melhor aproveitar as correções fornecidas pelas observações na assimilação;
- Implementação e otimização do código visando melhor desempenho computacional com o refinamento da resolução espacial;
- Identificação e correção de prováveis *bugs* em cada um dos processos envolvidos tanto na assimilação com a inclusão de novos dados, como nos ajustes na configurações da física e dinâmica do modelo BAM.

3.1 Características da versão SMG V2.1.0 em avaliação

Aqui é apresentado um resumo do que foi contemplado na elaboração da versão do SMG V2.1.0 e mais detalhes podem ser acessados em [Mattos et al. \(2018\)](#), o qual é o relatório de publicação dessa versão. De forma geral, nessa versão diversos *bugs* foram corrigidos e a interface foi avaliada, além de diversos pontos que foram sendo tratados com a inclusão dos dados observacionais e verificação dos resultados. A presente versão é capaz de assimilar todos os sistemas de observação com a inclusão dos dados de radiâncias contemplados na presente versão. Esse foi um processo bastante intenso e deverá ser continuado no decorrer do desenvolvimento e aprimoramento do SMG, onde diversos outros *bugs* e imprecisões deverão surgir e que necessitarão de atenção. Com relação aos pontos listados acima, podem ser destacados os seguintes aspectos desta versão:

Implementação no código do SMG: com relação ao acoplamento do modelo BAM com a assimilação de dados, a principal modificação está relacionada com

a inclusão do conjunto de dados proveniente de observações de satélites. Foi feita a inclusão da tabela de equivalência dos tipos de solo e vegetação do modelo de superfície *Simplified Simple Biosphere Model* (SSiB) o que permitiu a assimilação de radiâncias, a qual foi a maior e mais importante implementação realizada na presente versão. Foram também modificados alguns itens na configuração da assimilação de dados, como a extensão da janela de dados para 6 horas, e modificações nos parâmetros de minimização da função custo com maior número de *inner loops* no processo. Além disso, novas bases de dados de satélites foram adicionadas:

- Inclusão da assimilação de dados de radiância do sensor AMSU-A;
- Inclusão da assimilação de dados de velocidade do vento obtidos por meio do movimento de nuvens observadas por satélites (SatWind);
- Inclusão da assimilação de dados provenientes dos perfis de ROGNSS.

Otimização do código: na atual versão em avaliação, a análise do sistema GSI tem a resolução TQ0213L064, e melhorias computacionais poderão ser implementada a fim de que o sistema SMG seja mais rápido no cálculo das suas análises. Estas melhorias deverão ser efetivadas no futuro próximo com o apoio da equipe de HPC da DMD;

Ajustes e configurações na física e dinâmica do BAM: com o apoio da equipe de modelagem global da DMD diversos ajustes no modelo BAM foram feitos, tais como: modificações na parametrização de arrasto de ondas de gravidade; atualizações no tratamento dos aerossóis climatológicos; atualizações na escrita de variáveis prognósticas; inclusão da escrita das classes de solo do modelo SSiB. Além disso foi modificada a distribuição vertical dos níveis sigma do modelo visando maior estabilidade numérica.

Correções de bugs: diversos foram os *bugs* encontrados no sistema, tanto no sistema GSI, quanto no modelo BAM e no acoplamento do modelo com o GSI, os quais foram corrigidos e reportados adequadamente, tais como: correção de *bugs* na leitura da tabela “satbias_angle”; correção de *bug* na leitura do campo de pressão à superfície; correção de *bug* durante o processo de conservação de massa seca; correções de *bugs* na recomposição do campo de cobertura vegetada; correções de *bugs* na física unificada; correções de *bugs* nos processos de escrita da análise; correções de *bugs* no *restart* do modelo, relacionadas a convecção.

Essa versão está em fase de pré-operacionalização. O presente documento apresenta um diagnóstico dos resultados obtidos que podem orientar na tomada de decisão ao torná-la operacional.

4 Categoria II: Monitoramento e Configuração do Sistema de Assimilação

O objetivo geral das tarefas associadas a essa categoria é identificar e diagnosticar deficiências no processo de assimilação de dados usando o GSI, tanto na qualidade da matriz \mathbf{B} , como no processo de minimização da função custo, com a configuração adequada das injunções disponíveis. As subseções abaixo descrevem os primeiros resultados dessas avaliações em uma comparação dos experimento CNT (SMG V2.0.2) com os resultados do experimento EXP (SMG V2.1.0), com o intuito de apenas demonstrar a sensibilidade das modificações na base de dados nos resultados da análise quanto a esses aspectos.

4.1 Implementação de melhorias na Matriz \mathbf{B}

A matriz de covariâncias dos erros de previsão (matriz \mathbf{B}), representa a descrição das variações espaço-temporais das correlações dos erros das variáveis do modelo. A sua determinação para a aplicação no sistema SMG é feita com base nas diferentes entre os pares de previsões de 48 e 24 horas, as quais foram obtidas a partir de simulações do modelo BAM para o período de 1 ano. Desta forma, à medida em que o modelo atmosférico é desenvolvido (atualizado, corrigido), novas versões da matriz \mathbf{B} podem ser desenvolvidas visando a melhoria da aplicação dos incrementos de análise pelo sistema de assimilação de dados GSI. Além disso, outro aspecto que deve ser considerado para a melhoria da assimilação de dados, é a aplicação da matriz de covariâncias dentro do sistema de assimilação. Vários são os parâmetros que podem e devem ser ajustados à medida em que o sistema é desenvolvido e especial atenção deve ser dada aos parâmetros que são empíricos.

À medida em que as versão do sistema SMG são lançadas, a a matriz de covariâncias pode trazer também modificações que impactam de forma importante o desempenho do sistema. Na presente versão documentada neste relatório, SMG V2.1.0, foram realizadas diversas modificações nas rotinas que lêem e processam os pares de previsão do modelo BAM. Estas modificações foram feitas para permitir que os pares de previsões nativos do modelo possam ser utilizados no cálculo da matriz de covariâncias. Os detalhes relacionados à estas modificações serão apresentados oportunamente em um relatório técnico da implementação desta versão do sistema.

Dado o custo computacional do custo da matriz de covariâncias e os testes necessários para o seu ajuste inicial, o desenvolvimento da matriz é feito em baixa resolução espacial, mas mantendo-se o mesmo número de níveis na vertical que a versão operacional do sistema SMG deverá possuir. Por exemplo, se a versão operacional for

a TQ0299L064, os testes iniciais em baixa resolução poderão ser feitos na resolução TQ0062L064. Apesar disso, dificuldades tem sido encontradas com a distribuição vertical do níveis sigma do modelo BAM, especialmente com 64 níveis, o que tem trazido dificuldades para os desenvolvimentos. Contudo, os ajustes nas rotinas de cálculo e os testes iniciais com a matriz tem sido feitos na resolução TQ0062L028 (com 28 níveis sigma na vertical), o que possibilita os testes com a nova matriz de covariância serem mais estáveis.

As Figuras 4.1 e 4.2, mostram o *skill* (ou habilidade de previsão) das previsões do modelo BAM a partir das análises do GSI do SMG e em comparação com o modelo BAM sendo inicializado pelas análises do NCEP, ao longo do mês de Junho de 2015. Com a avaliação das figuras, pode-se dizer que as análises do SMG utilizando a matriz na resolução indicada, apresentam maior habilidade de previsão de 24 e 48 horas. Este resultado é indicado pela redução dos erros aleatório (representado pelas curvas de viés) e sistemático (representado pelas curvas de raiz do erro quadrático médio, RMSE nas figuras). A correlação de anomalias também mostra que as previsões do modelo BAM com as análises do sistema SMG, foram melhores para a maioria das variáveis apresentadas. Apesar do desempenho satisfatório, para uma versão inicial da matriz, considerando a margem para ajustes na aplicação da mesma, a altura geopotencial não foi bem representada, sendo esta variável a que tem mostrado menor sensibilidade devido à troca da matriz **B**.

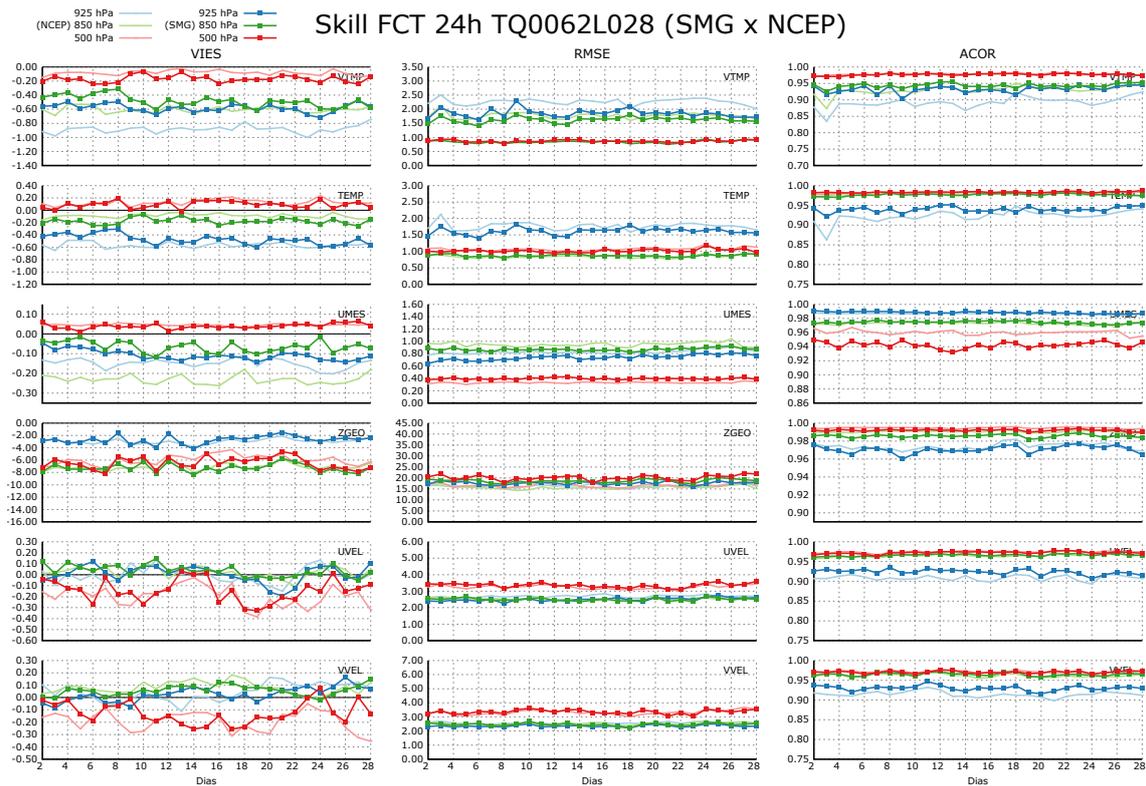


Figura 4.1 - Skill previsões 24 horas a partir das análises do SMG na resolução TQ0062L028.

Utilizando-se uma perspectiva mais restritiva, a avaliação das componentes do vento e a altura geopotencial não apresentam diferenças “significativas” e precisam ser investigadas (necessidade de ajustes na aplicação da matriz de covariâncias). Entre 24 e 48 horas, observa-se o aumento da amplitude dos erros, tornando mais evidente o erro das variáveis em 500 hPa (e.g., UMES - umidade específica). Vale ressaltar que, nestes testes, o experimento com assimilação de dados utilizou configurações padrão, i.e., não foram alterados quaisquer parâmetros de aplicação da matriz, escolha da variável úmida, injunções de umidade ou do algoritmo da minimização da função custo variacional. As diferenças entre a habilidade de previsão das previsões de 24 e 48 horas, se mantiveram, sendo a amplitude dos erros maiores para as previsões de 48 horas.

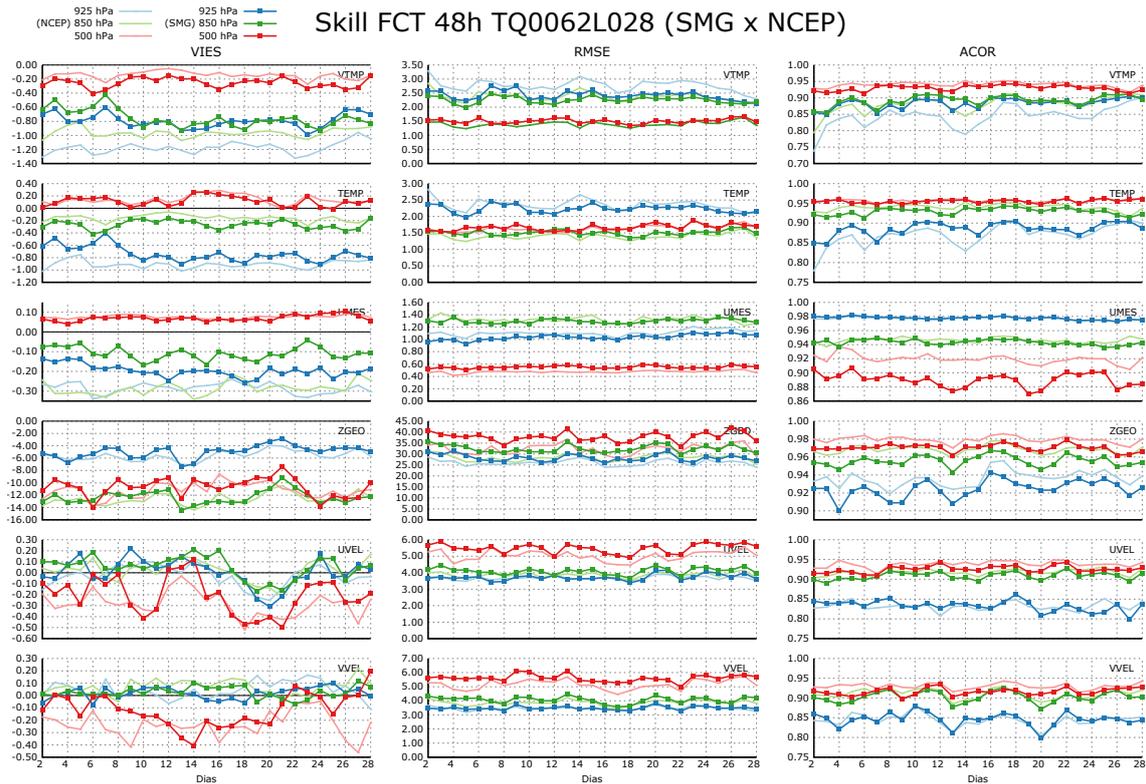


Figura 4.2 - Skill previsões 48 horas a partir das análises do SMG na resolução TQ0062L028.

4.2 Minimização e Condicionamento da Função Custo Variacional

Com o acoplamento do modelo BAM com o sistema de assimilação de dados GSI, a minimização e o condicionamento da função custo variacional é a parte do sistema de assimilação de dados que garante que a análise obtida seja de variância mínima, a partir do conjunto de informações (observações e previsões) e suas respectivas incertezas (matriz de erros das observações e modelo) consideradas no processo. Esta seção apresenta uma avaliação da versão do SMG V2.1.0 do ponto de vista do processo de minimização da função custo do método variacional empregado.

A rotina que gerencia o processo de minimização da função custo no GSI é chamada “glbsoi”, a qual por padrão chama a rotina “pcgsoi” que realiza a minimização pelo método do gradiente conjugado. Saídas “stdout” e “fort.220” do GSI são os arquivos onde as informações a respeito da evolução do processo são disponibilizadas pela rotina. Além deste, há pelo menos dois outros métodos alternativos de minimização disponíveis na atual versão do GSI empregado no SMG V2.1.0, porém ainda não foram testados, o que poderá ser feito futuramente com o desenvolvimento do sistema.

Após correções de *bugs* na compilação do sistema no Tupã, que impedia a utilização da rotina padrão, a mesma pode ser utilizada apropriadamente com o aumento significativo do número de iterações no processo de minimização. Embora na versão anterior do SMG o número de iterações do *outer loop* e do *inner loop* tenham sido 2 *outer loops* com 50 e 150 *inner loops*, nas versões da serie 2.0.0 do SMG, optou-se por reiniciar com apenas 1 *outer loop* e 100 *inner loops*. Isso foi feito para que problemas na minimização sejam avaliados apropriadamente na evolução do sistema, uma vez que nessa versão a resolução é muito maior e um maior número de iterações requer mais tempo de máquina. Para efetivar essa configuração, foram definidos no *namelist* os parâmetros “*miter=1*”, “*niter(1)=100*” e “*niter(2)=1*”. Existe um critério de parada caso a convergência tenha sido alcançada antes do número limite de iterações.

Com relação à minimização da função custo, a avaliação diagnóstica visa mostrar como o sistema que emprega o GSI responde às mudanças nos parâmetros destinados a minimização da função custo, através do seu monitoramento em comparação com o comportamento da curva de minimização da função das revisões anteriores. Nessa análise as informações de saídas disponibilizadas nos arquivos “*fort.220*” de cada rodada são organizados e plotados para facilitar a análise dos resultados.

Essa avaliação é realizada com os resultados do experimento que usou a versão SMG V2.1.0 (vide Seção 2.4) e os valores da função custo, o gradiente da função e a dimensão dos passos de minimização no processo de busca pelo estado de mínima variância, além do coeficiente de busca (*b*). Estes valores são plotados na Figura 4.3. Essa figura foi gerada com os dados da minimização para o ciclo de assimilação da data 06/05/2015 as 12:00 UTC (2015050612) como sendo um caso típico que retrata os demais.

A curva de minimização da função custo apresentada na Figura 4.3 indicam que há uma forte minimização nas 50 primeiras iterações, e após esse período não há um efeito significativo, embora ainda haja a diminuição nos valores da função, como indicado pelo comportamento da curva do gradiente. Após os 50 *inner loops*, recomenda-se iniciar um novo *outer loop* que deve ser estendido (i.e, com um número de iterações maior), como é usado no NCEP. Isso está sendo já testado e deverá se implementado na próxima versão do SMG. Os valores da dimensão do passo da minimização na procura do estado de menor custo, indicam que há grandes oscilações e essa oscilação é observada em todo o processo durante as 100 iterações do *inner loop*. Esse efeito é também observado no coeficiente *b*, do processo de busca na minimização.

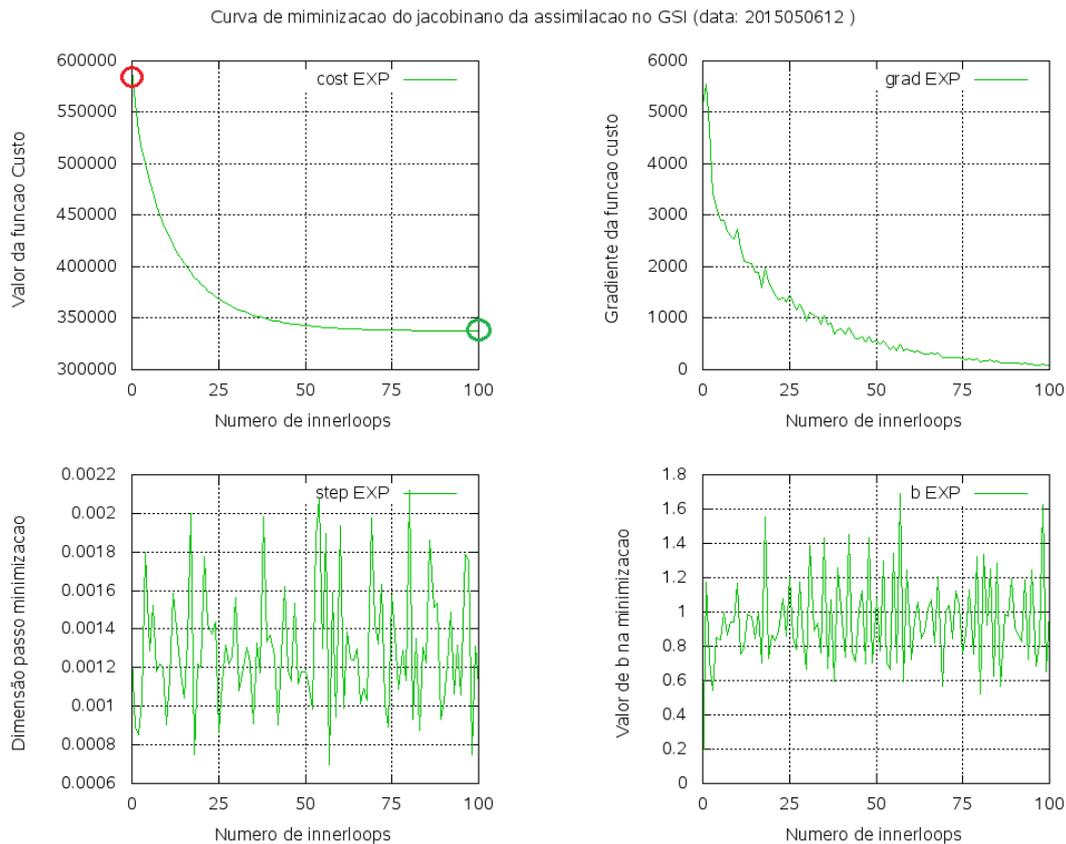


Figura 4.3 - Gráficos da função custo (painel superior/esquerdo), o gradiente dessa função (superior/direito), dimensão dos passos no processo de procura do estado de mínima variância (inferior/esquerdo) e o coeficiente de busca (b) (inferior/direito), para o ciclo de assimilação realizado com o uso da versão SMG V2.1.0 na data 06/05/2015 as 12:00 UTC (2015050612).

O comportamento da curva de minimização da função custo, é o indicador mais direto do sucesso do processo de minimização, pois sintetiza em seu comportamento diversos aspectos envolvidos no processo. O ponto mais preponderante em seu comportamento que pode indicar problemas, é o valor final em relação ao valor inicial da função, a qual deve indicar diferenças significativas, por ser um processo de minimização que se deseja. Assim uma forma rápida de avaliar se o processo evolui adequadamente basta monitorar a série temporal do valor inicial e do valor final em cada passo da assimilação. Esses valores estão destacados por círculos na painel superior esquerdo da Figura 4.3, e os mesmos valores para as demais realizações no período avaliado são plotados na Figura 4.4. Como o número de observações nas diferentes realizações do dia diferem muito entre os horários das 00 e 12 UTC, são plotadas separadas dos horários das 06 e 18 UTC, nessa figura. Observa-se pelos resultados que o processo de minimização evolui de forma adequada e esperada,

com os valores no final do processo menores do que no início sem a tendência de aproximação. Um outro ponto que se destaca é o pico negativo na realização das 2015051212, a qual foi gerada pela diminuição na quantidade de dados nesse dia. Por outro lado, como pode-se observar, o processo de minimização manteve o comportamento observado nos dias anteriores com uma diminuição compatível com a quantidade de dados considerados. Essa avaliação pode ajudar bastante na avaliação operacional, pois antes de problemas críticos impactarem e comprometerem as análises e conseqüentemente as previsões, os mesmos podem ser detectados ao se monitorar o comportamento dessas curvas. Um sistema de monitoramento está sendo desenvolvido e deverá entrar em operação junto com a versão operacional do SMG.

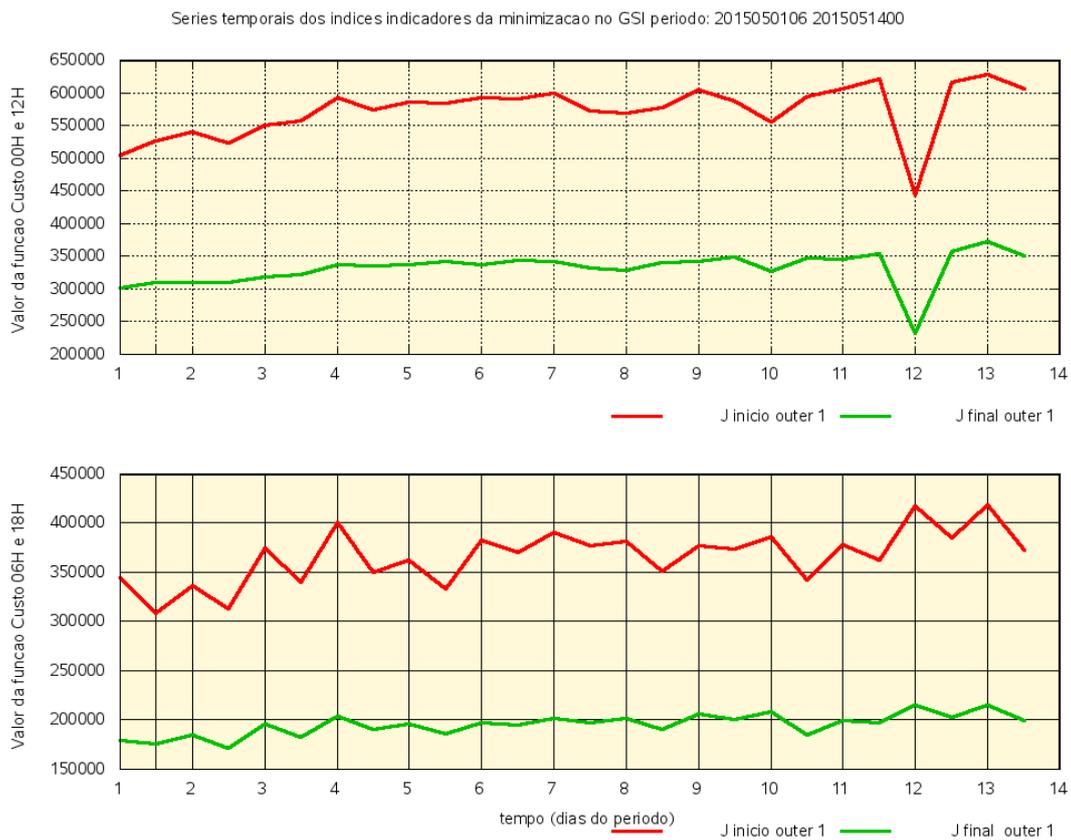


Figura 4.4 - Valores da função custo no início de cada ciclo de assimilação (curva vermelha) e no final do processo (curva verde) para as rodadas de 00 e 12 UTC (gráfico superior) e de 06 e 18 UTC (gráfico inferior) para o experimento EXP com o SMG V2.1.0.

Uma comparação com a versão anterior do sistema em todas essas variáveis (Figura

4.3), é feita na Figura 4.5, mas não apenas para uma data mas para um período maior de dados, em que o sistema SMG foi realizado ciclicamente. Nessa figura a versão V2.0.2 é usada como controle (CNT), com a qual a versão SMG V2.1.0 (EXP) é comparada. Observa-se também que a evolução do processo de minimização é semelhante entre os dois experimentos, com uma sutil diminuição da função custo da versão SMG V2.1.0, no início do *outer loop* e uma menor minimização no final do processo. Esse padrão de diferença vai aumentando com a evolução do período. Os indicadores do passo de procura no processo de minimização indicam que a versão V2.1.0 oscila menos que a versão V2.0.2 (observa-se que os traços mais distantes do comportamento médio são predominantemente vermelhos) o que é um resultado positivo indicando uma melhoria, mesmo que sutil.

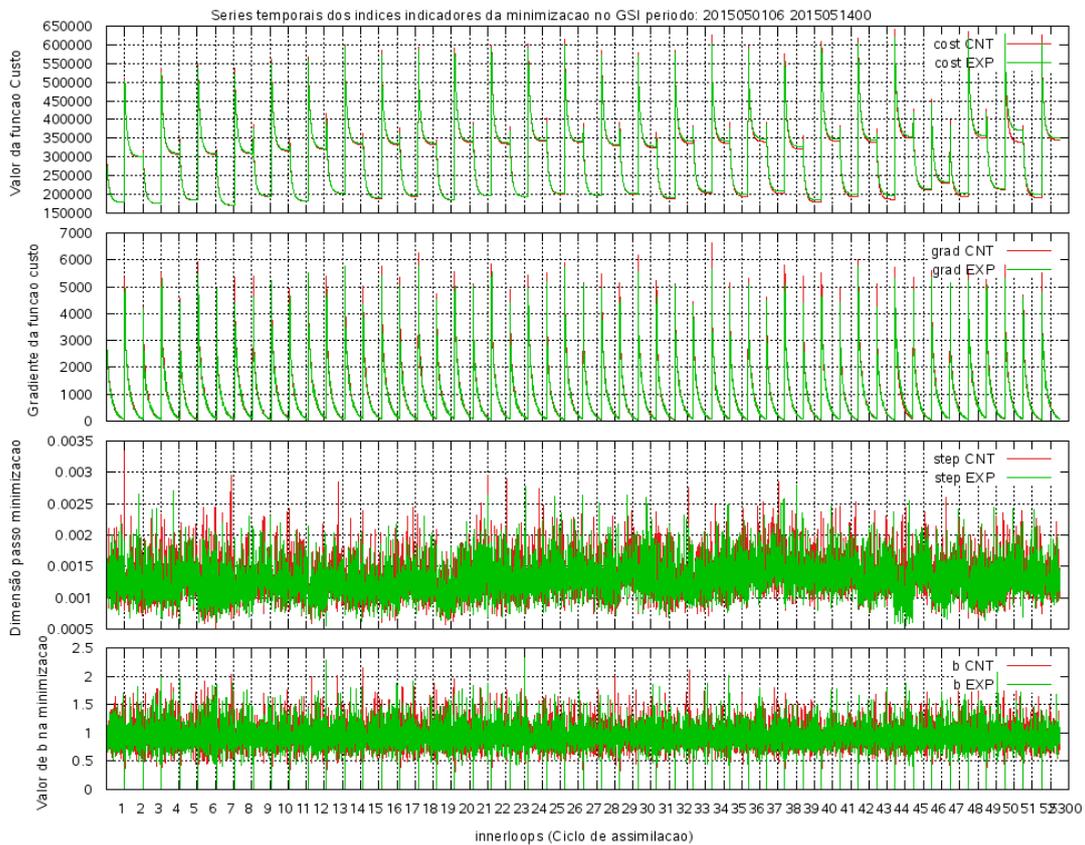


Figura 4.5 - Composição da função custo, o gradiente dessa função, dimensão dos passos no processo de busca do estado de mínima variância e o coeficiente de busca (b) obtido com o uso da versão SMG V2.1.0 (EXP, curva verde) e SMG V2.0.2 (CNT, curva vermelha) para o período de 01/05/2015 às 06:00 UTC até 14/05/2015 às 00:00 UTC.

Para avançar na análise dos resultados mostrados na Figura 4.5, as parcelas que compõem a função custo são mostradas na Figura 4.6. Nessa figura a parcela relacionada ao modelo (J_b), as observações (J_o) e as injunções de conservação de massa e de umidade não física, são mostradas da mesma forma que os dados são apresentados na Figura 4.5. Avaliando os resultados observa-se que com a evolução da minimização o estado ótimo vai se distanciando da previsão de curto prazo (observe o comportamento crescente de J_b em cada minimização) e se aproximando das observações (curva J_o decresce). Na comparação dos dois experimento observa-se que entre as versões há uma sutil diferença no final de cada ciclo de minimização, sendo a versão V2.1.0 com resultados menos expressivos na geração da análise do que a versão V2.0.2 (J_b menor e J_o maior, no final da minimização). Observa-se que a injunção para conservação da massa seca (J_c) é nulo, pois esta injunção está desligada em ambas as versões. Com relação à injunção de umidade não física (J_i), nota-se que na versão V2.1.0 o mesmo tem apresentado modificações no decorrer do processo e é esse item que foi o que mais contribuiu para as maiores diferenças observadas na Figura 4.5. Esse item deve receber maior atenção na evolução do sistema para as próximas versões.

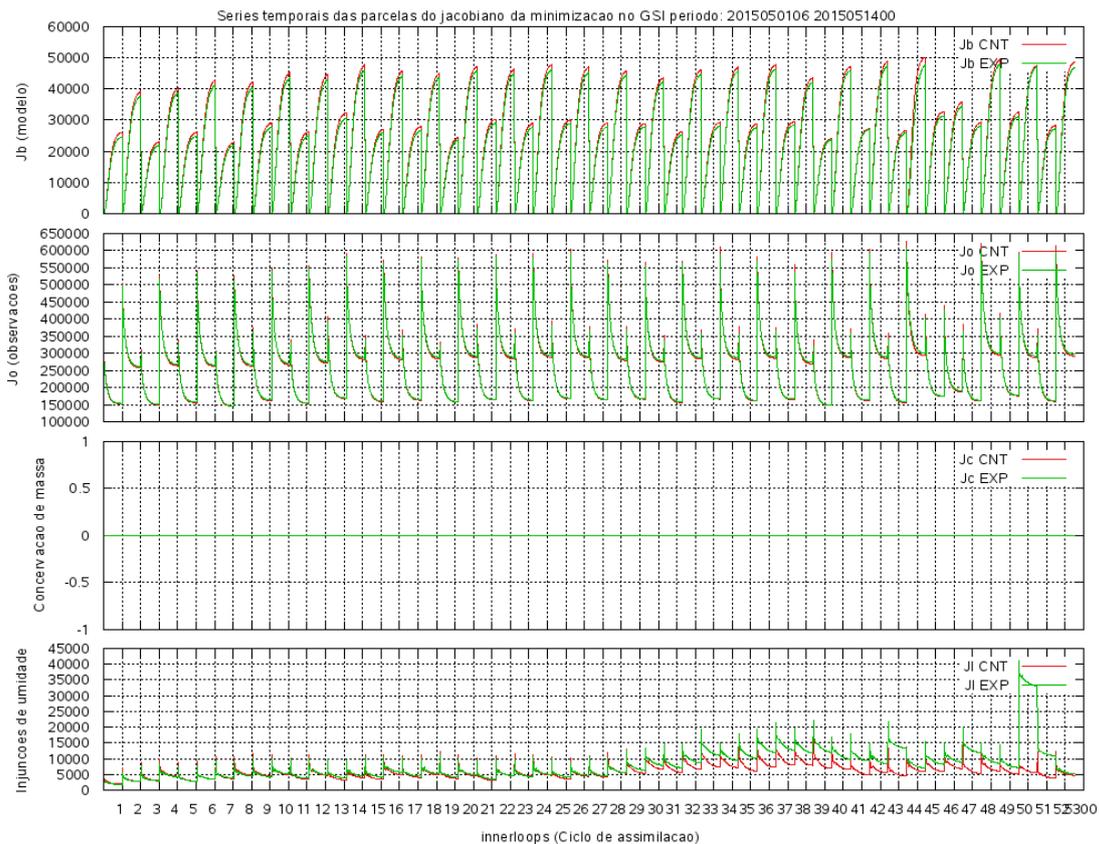


Figura 4.6 - Valores mínimos da função custo para cada ciclo. As linhas representam os resultados da versão V2.1.0 controle (CNT, curva vermelha) em comparação com a versão V2.0.2 (EXP, curva verde) .

Como já tem sido discutido nos relatórios anteriores, esse tipo de avaliação deve sempre ser refeito, de forma que os demais métodos de minimização disponíveis possam também ser testados e verificados quanto à sua eficiência diante de situações em que a quantidade de observações variar (e.g., inclusão de novos canais de radiâncias e de radiâncias hiperespectrais).

4.3 Avaliação da Injunção de Umidade no controle de valores não físicos

Dentro do processo de assimilação na modelagem cíclica é naturalmente plausível que a análise dos campos de umidade apresente valores negativos ou valores de umidade acima do valor de saturação. Essas soluções são puramente numéricas, geradas tanto na assimilação dos dados como no processo de integração do modelo. Obviamente essas soluções não correspondem à realidade física e precisam ser tratadas dentro de cada um desses processos em duas frentes de trabalho: no processo de minimização da função custo para que soluções com o menor número desses casos sejam privilegiadas

e na integração do modelo. Encontrar meios de minimizar essas duas fontes de umidade não física é a função dessa frente de trabalho, a qual no presente documento visa diagnosticar os valores não físicos de umidade na versão do SMG em avaliação ao usar um protocolo de diagnósticos desses casos orientando o desenvolvimento do SMG. Nessa seção é apresentada algumas informações sobre essas duas fontes de umidade não física e posteriormente resultados preliminares dos campos não físicos de umidade são apresentados e discutidos. Esses resultados deverão ajudar no ajuste dos parâmetros que controlam a injunção de umidade a ser feito nas próximas versões do sistema SMG.

4.3.1 Eficiência da injunção de umidade na qualidade da análise no ciclo de assimilação

O GSI usa um termo adicional na função custo, chamado de injunção de umidade que tem a função de regular o processo de minimização, conduzindo a solução para valores de umidade mais próximos da realidade física. Este processo é regulado por parâmetros que controlam a atuação desse termo de injunção adicional. O objetivo dessa frente de trabalho é identificar como explorar apropriadamente a injunção da umidade na qualidade final da análise gerada pelo SMG, em conjunto com iniciativas para minimizar essas soluções dentro do processo de integração do modelo. Esses termos ou parâmetros para regular a ação da injunção de umidade no processo de minimização da função custo (J) para uma determinada solução do estado da atmosfera (x) pode ser relacionada como mostra a equação abaixo:

$$J(x) = (x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1} (x - x_b) + [y - H(x)]^T \mathbf{R}^{-1} [y - H(x)] + J_{q_1} + J_{q_2}$$

$$J_{q_1} = \begin{cases} 0 & \text{se } U \geq 0 \\ \lambda_1 U^2 & \text{se } U < 0 \end{cases}$$

$$J_{q_2} = \begin{cases} 0 & \text{se } U \leq U_s \\ \lambda_2 (U - U_s)^2 & \text{se } U > U_s \end{cases}$$

onde os termos J_{q_1} e J_{q_2} , acrescentados à essa função custo, representam as injunções de umidade - ou seja, termos de penalização adicionados que tem como objetivo ponderar as soluções (candidatas à análise) que apresentem valores negativos de umidade.

dade ou soluções que apresentem valores de umidade acima do valor de saturação, respectivamente. Estes termos são altamente não-lineares, e operam na análise de forma geral durante cada iteração.

O termo U significa a variável de umidade escolhida para a análise de umidade no GSI. Duas são as variáveis disponíveis: umidade relativa normalizada ou a pseudo umidade relativa. Os parâmetros λ_1 e λ_2 representam fatores que dimensionam a ação dos termos de penalização de umidade negativa e umidade supersaturada, respectivamente. Quanto maior for o valor do parâmetro maior a atuação do termo de injeção no processo de obtenção da análise através da minimização da função custo do GSI. Definir esses parâmetros adequadamente é a principal função dessa frente de pesquisa. Esses parâmetros são definidos através do *namelist* do GSI, mais especificamente nas variáveis “factqmin” e “factqmax”. Quando nulos, da forma como foi inicialmente implementado no SMG (versão V1.0.0) os termos de penalidade de umidade não física ficam desabilitados e portanto sem efeito nos resultados. Esses parâmetros foram setados com os valores 0.005 e 0.905 na versão SMG V2.1.0, para a injeção da umidade negativa e supersaturada, respectivamente. Tais valores foram escolhidos por terem sido os valores usados na versão operacional do G3DVAR, os quais requerem portanto uma melhor definição.

Na assimilação de dados, a existência desses traços negativos de umidade tem importante impacto sobre como observações de quantidades úmidas são assimiladas no sistema de assimilação. A injeção de umidade penaliza os estados onde tais soluções são mais frequentes, buscando aquelas que os minimiza; no entanto, essa restrição não retira todos os valores não físicos da análise (DERBER; WU, 1998) e deve ser tratada de forma conjunta com iniciativas que as também minimizam na integração do modelo.

No modelo, dois processos são identificados como sendo responsáveis por este erro. Um deles está na transformação do espaço espectral para pontos da grade. O outro está na advecção vertical. A contribuição do primeiro é pequena e é inevitável em todos os modelos espectrais. O processo de advecção vertical normalmente usa um esquema de diferenciação centrada no espaço e no tempo, conhecido como *leapfrog*. O esquema *leapfrog* é centrado em três pontos de diferenciação no tempo e o valor da derivada é calculado num tempo que está centrado entre a tempo inicial e tempo final da extrapolação (WARNER, 2010). O regime de advecção vertical não é definido positivo o que pode produzir marcadores negativos de umidade. Este processo é a principal fonte da umidade negativa no modelo (YANG, 2009).

4.3.2 Avaliação diagnóstica dos valores não físicos de umidade no SMG V2.1.0

Na primeira avaliação do comportamento e da evolução dos valores não físicos de umidade na assimilação de dados do CPTEC, a análise dos resultados apresentada foi puramente diagnóstica no status da versão SMG V1.0.0. Como não foi modificado os parâmetros das injunções de umidade no processo de minimização no GSI, a comparação entre diferentes experimentos foi para entender a complexidade do problema a ser atacado posteriormente. Nessa avaliação foi evidente que o processo de assimilação tende a gerar valores não físicos de umidade e que são maiores quanto maior o número de dados assimilação. Isso já foi bem marcado mesmo no experimento onde apenas dados convencionais foram assimilados. Um padrão de *zig-zag* entre os passos de análise onde os pontos de maior ocorrência dos valores não físicos foram nos horários de 00 e 12 UTC. Com o aumento de dados observados com a adição dos demais sistemas de observação o número dos casos aumentam. Os resultados mostrados indicaram que claramente que com a intensificação dos valores de umidade supersaturada na baixa atmosfera tem uma relação direta com o aumento do número de dados assimilados.

Como já descrito anteriormente na publicação da versão V1.0.0 do SMG, o protocolo desenvolvido aborda: uma análise visual da evolução dos casos durante o período em estudo, a distribuição vertical dos casos e cria séries temporais do número de valores não físicos em diferentes faixas de latitude visando sintetizar as informações e bem orientar os desenvolvedores do SMG. Nessa avaliação o protocolo foi utilizado nas saídas dos experimentos usando o SMG V2.1.0 e a versão SMG V2.0.2, sendo esse último aqui considerado a versão controle. A umidade negativa e a supersaturada e avaliada separadamente nas próximas subseções.

4.3.2.1 Levantamento dos valores de umidade negativa

A primeira análise aqui apresentada é a localização geográfica e a concentração espacial dos casos de umidade negativa e avaliar se os mesmos cobrem todo o globo e se é possível identificar um padrão que revele suas principais causas. A Figura 4.7 apresenta os resultados dessa análise para os valores de umidade negativa para a rodada da versão SMG V2.1.0.

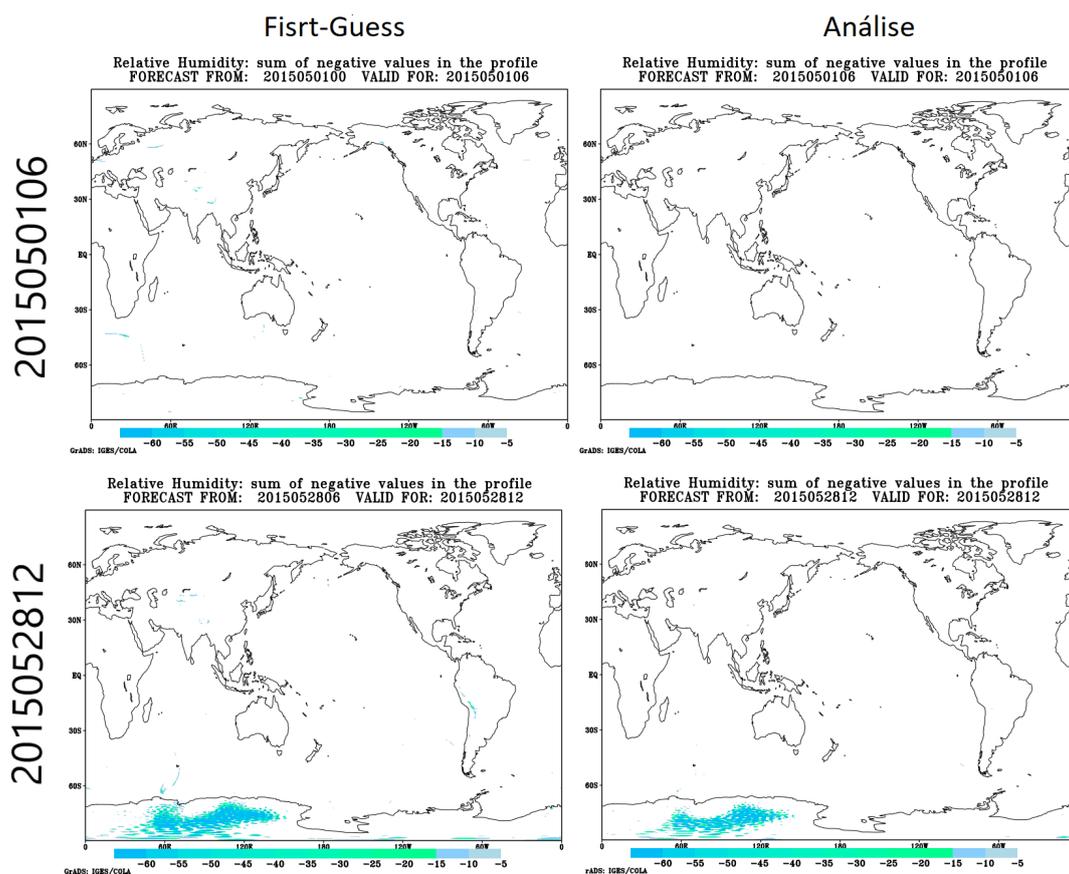


Figura 4.7 - Localização espacial dos valores de umidade negativa na análise gerada pela versão SMG V2.1.0. As figuras superiores são para o primeiro dia do período e as figuras inferiores são para o dia 28 às 12:00 (um dos últimos dias do período avaliado), sendo a esquerda para o *first guess* e da direita para a análise.

A Figura 4.7 mostra que os valores de umidade negativa, embora estejam concentrados em algumas regiões, eles evoluem com o progresso do ciclo de assimilação, ampliando a área de ocorrência e a intensidade dos valores, os quais se concentram na região da antártica. Observa-se também que no processo de assimilação esses pontos de umidade negativa é reduzido em comparação com os campos do *first guess*. Observa-se valores na região dos andes no *first guess* que são praticamente eliminados nos campos da análise. Para melhor descrever o comportamento dos valores não físicos dentro do período de estudo e a ocorrência em função da latitude a Figura 4.8 mostra a série temporal dos mesmos para as versões SMG V2.1.0 e SMG V2.0.2 em diferentes camadas do perfil vertical (figuras da esquerda) e faixas de latitudes (figuras da direita). Os resultados mostrados nessa figura indicam alguns padrões bem definidos da geração de valores negativos de umidade durante o processo cíclico

de assimilação de dados. Nessa figura fica mais evidente a diminuição dos valores de umidade negativa na análise em comparação com o first-guess. Observa-se que não há um padrão de crescimento elevado dos valores com o decorrer do processo cíclico, tendo apenas alguns picos por volta do dia 17 e 28 mas que diminuiu no final do período. Com relação as camadas verticais do perfil observa-se que a camada da alta troposfera é que domina, sendo essa muito semelhante ao padrão do perfil completo (figura da esquerda inferior). Na média troposfera os valores são mais comportados com uma elevação mais significativa no dia 23, de causa não identificada. Na baixa troposfera observa-se os picos de elevação nos dias 17 e 28. Nas diferentes faixas de latitude observa-se que esses picos na baixa troposfera estão concentrados na região antártica, enquanto que nas demais regiões os valores de umidade negativa na análise são reduzidos.

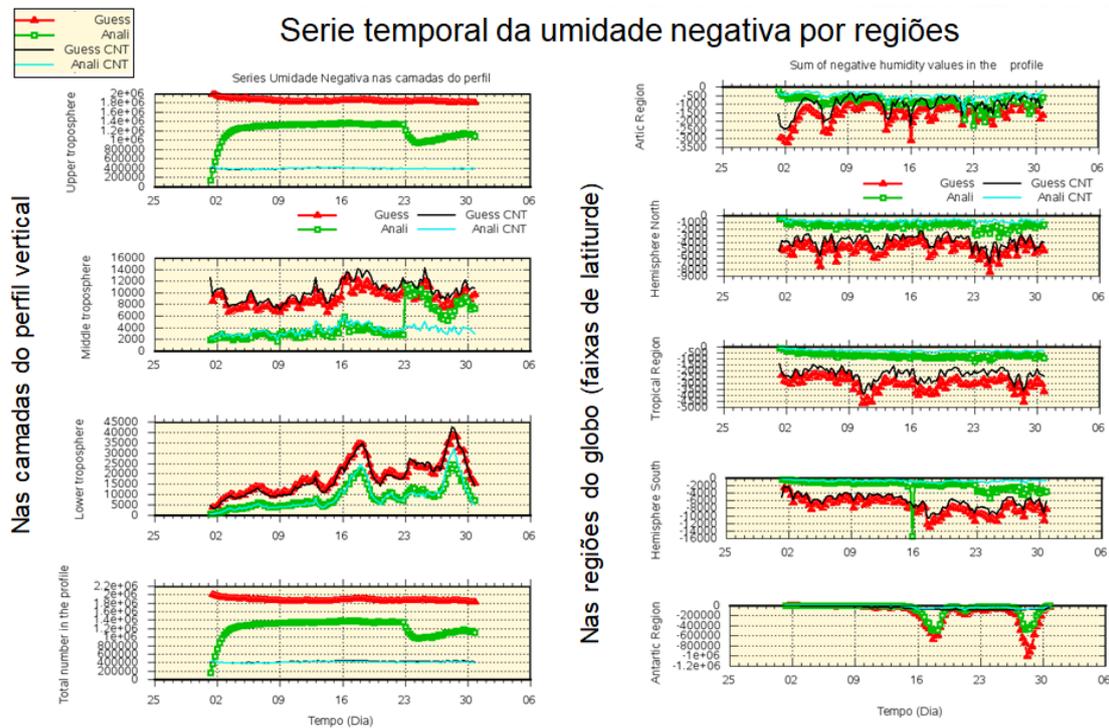


Figura 4.8 - Serie temporal do somatório dos valores de umidade negativa gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (*First Guess* e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (*First Guess* e Análise) para diferentes camadas do perfil atmosférico (a esquerda) e para faixas de latitude (a direita).

A concentração dos valores de umidade negativa com relação ao perfil vertical do modelo são mostrados na figura 4.9 para três instantes no período avaliado. O Dia

01 às 06:00, dia 15 às 12:00 e dia 30 às 18:00 UTC. Uma ampliação nos últimos níveis da atmosfera é também apresentada na figura a direita. Os resultados indicam que os casos de umidade negativa se concentram nos níveis de 30 no início e esse pico vai migrando para os níveis de 18 com uma elevação nos valores com a evolução do processo cíclico.

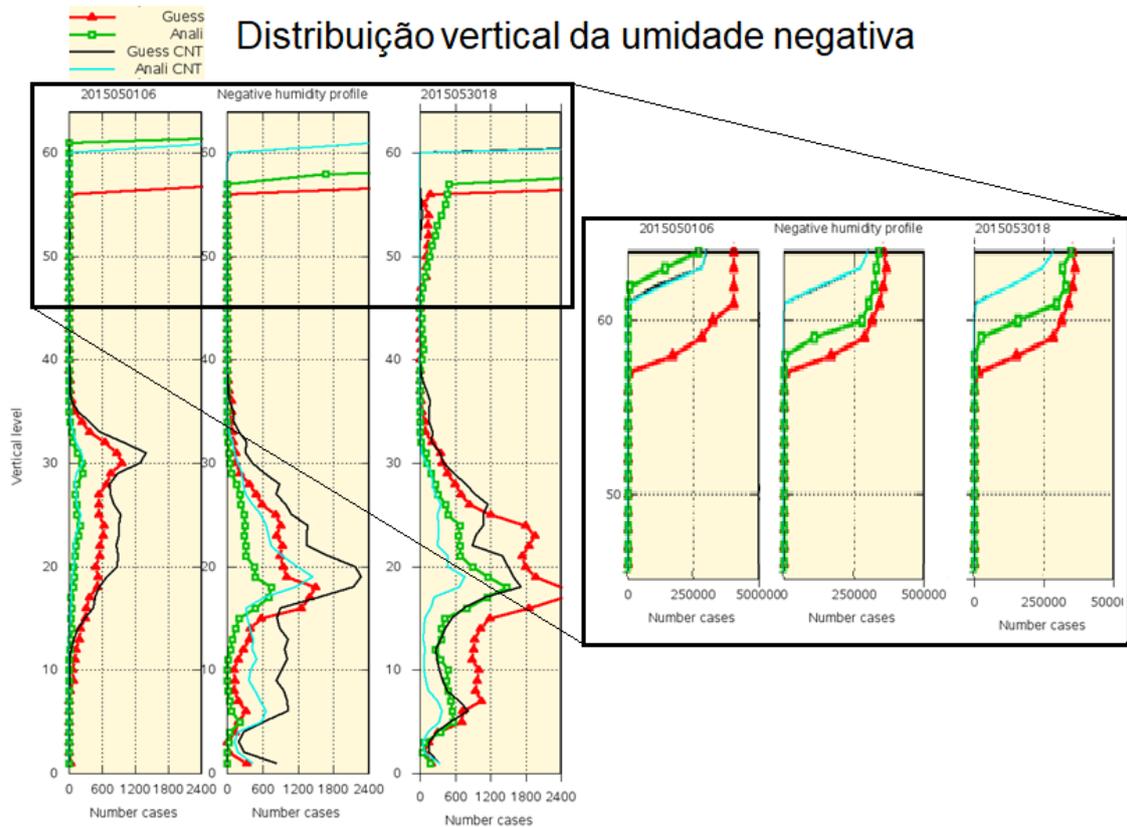


Figura 4.9 - Perfis verticais do número de casos de umidade negativa gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (*First Guess* e *Análise CNT*) e SMG V2.1.0 (*First Guess* e *Análise*) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado.

Em uma comparação das análises das versões V2.1.0 e V2.0.2, observa-se na Figura 4.9 que no início do período os valores são muito semelhantes mas com a evolução do processo cíclico o número de valores negativos na versão V2.1.0 fica ligeiramente maior, com semelhante distribuição vertical. Na ampliação dos últimos níveis do perfil é possível observar que o número de pontos com umidade negativa do *first guess* é sempre elevado em todo o período, e que o efeito de mitigação da análise perde a eficiência no final do período. É preciso mais investigação se esse número elevado de umidade negativas nesses níveis tem impacto na qualidade das previsões

e no processo cíclico de assimilação.

4.3.2.2 Análise dos valores de umidade supersaturada

A Figura 4.10 apresenta os resultados da distribuição espacial dos valores de umidade supersaturada para a rodada da versão SMG V2.1.0. A esquerda os dados para o *first guess* e a direita os dados para a Análise. As figuras superiores são para o início do período e na parte inferior são para o final do mesmo. Essa Figura 4.10 mostra que os valores de umidade supersaturada é muito mais impactante do que os valores de umidade negativa e precisa ser devidamente tratado. A evolução temporal da área em que o problema ocorre é ampliada e com uma intensificação durante a evolução do processo cíclico, a qual pode tender a soluções inconsistentes para o modelo ocasionando uma interrupção do processo. Essa elevação não é tão elevada como foi observado na versão SMG V1.0.0, mas deve ser devidamente tratada. A umidade supersaturada se concentram nas regiões oceânicas de médias latitudes e na região subtropicais com máxima concentração sobre a região norte do pacífico e próxima ao oceano antártico. O que mais chama a atenção nessa figura é o fato de que na análise os valores são intensificados e a região ampliada. Esse problema deverá consumir um bom esforço da equipe para encontrar meios de resolve-lo ou minimizar seus impactos no processo cíclico.

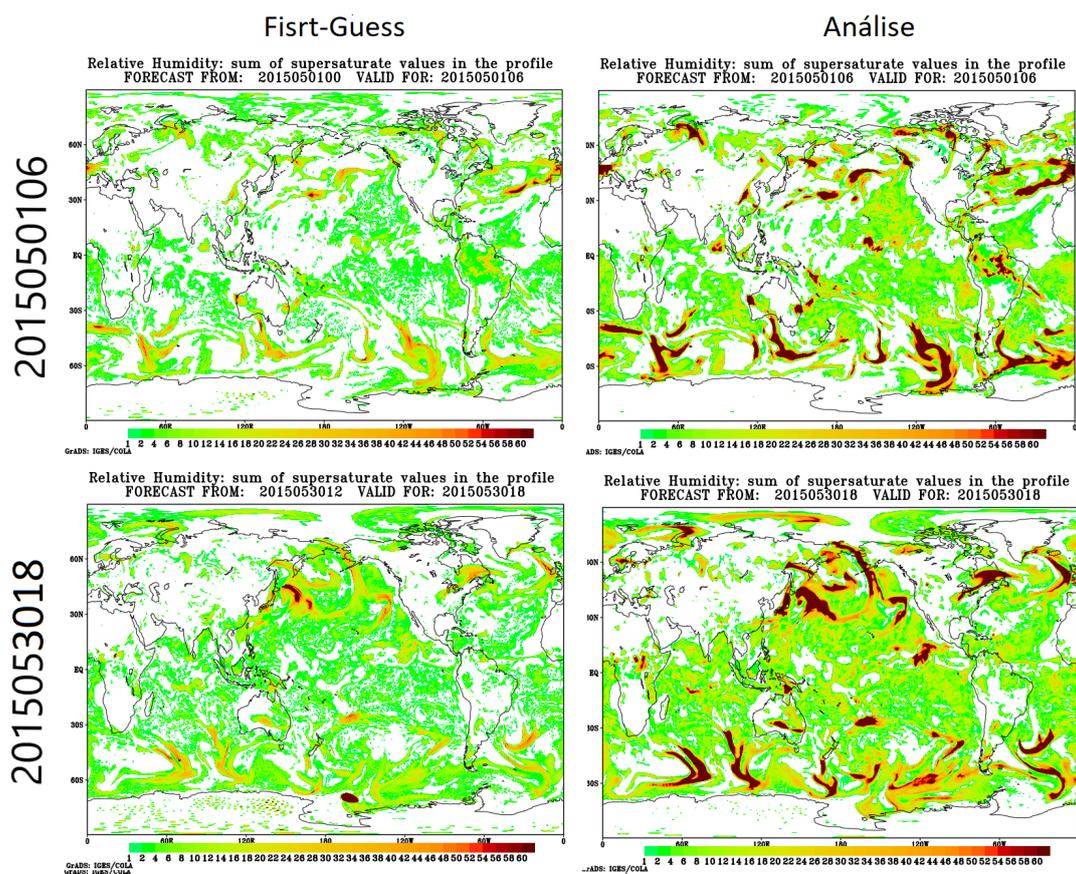


Figura 4.10 - Espacialização dos valores de umidade supersaturada na análise gerada pela versão SMG V1.0.0. Figura da esquerda é para o primeiro dia do período e a figura da direita é para o último dia do período avaliado.

Para os valores supersaturados dentro do período de estudo e a ocorrência dos meses em função da latitude, a Figura 4.11 mostra a série temporal de tais valores para as versões SMG V2.1.0 e SMG V2.0.2 em diferentes camadas do perfil vertical (figuras da esquerda) e faixas de latitudes (figuras da direita).

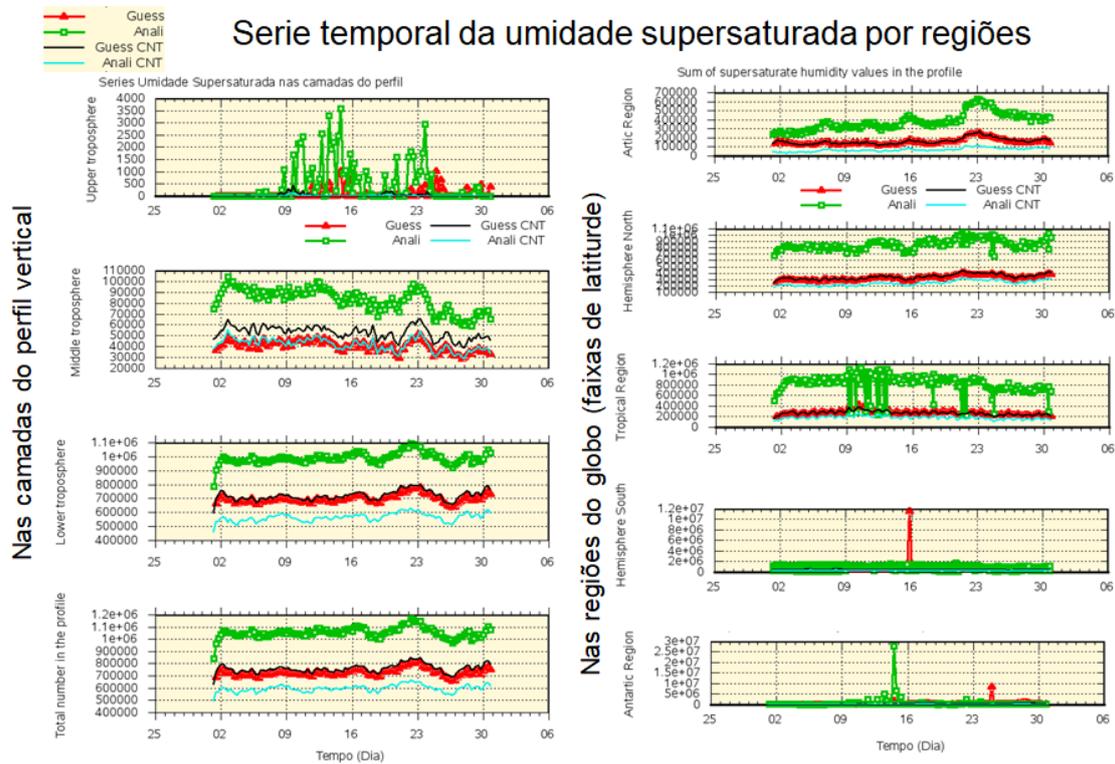


Figura 4.11 - Serie temporal do somatório dos valores de umidade supersaturada gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (*First Guess* e Análise CNT) e SMG V2.1.0 (*First Guess* e Análise) para diferentes camadas do perfil atmosférico (a esquerda) e para faixas de latitude (a direita).

Os valores de umidade supersaturado apresenta um comportamento inverso ao dados de umidade negativa, com o maior número de casos na região tropical e diminuindo em direção aos polos. Esses casos estão associados com a regiões de convecção, as quais são menos frequentes nas regiões próximas aos polos. Como indicam as séries temporais, os valores de forma geral, considerando todo o globo e em todos os níveis (figura inferior à esquerda), tendem a crescer no primeiro dia e se manter em um patamar com leve oscilação. A baixa troposfera domina esse padrão, enquanto que nos níveis médios observa-se uma tendencia de queda e nos mais elevados essas oscilações são fortes, embora nesse caso com menor ocorrência. Observa-se que em comparação com a versão anterior a versão V2.1.0 apresenta na análise um aumento significativo de umidade supersaturada. Essa versão anterior apresentava uma diminuição desses valores com relação ao seu *first guess*, o que não é observado na versão SMG V2.1.0. Esse aumento deve estar associado com as modificações na distribuição dos níveis sigma do modelo, e deve ser aprimorado.

A concentração dos valores de umidade supersaturada com relação ao perfil vertical do modelo são mostrados na Figura 4.12 para três instantes no período avaliado. O Dia 01 às 06:00, dia 15 às 12:00 e dia 30 às 18:00 UTC. Observa-se que os valores se concentram abaixo do nível 30 e apresenta um pico entre os níveis 8 e 10, e há um aumento em função da integração do modelo. Enquanto que na versão SMG V2.0.2 os valores eram minimizados na análise, a versão SMG V2.1.0 o numero de casos são ampliados na análise, o que revela que mais investigação deve ser feita para melhor ajustar os parâmetros da injunção da umidade supersaturada.

Distribuição vertical da umidade supersaturada

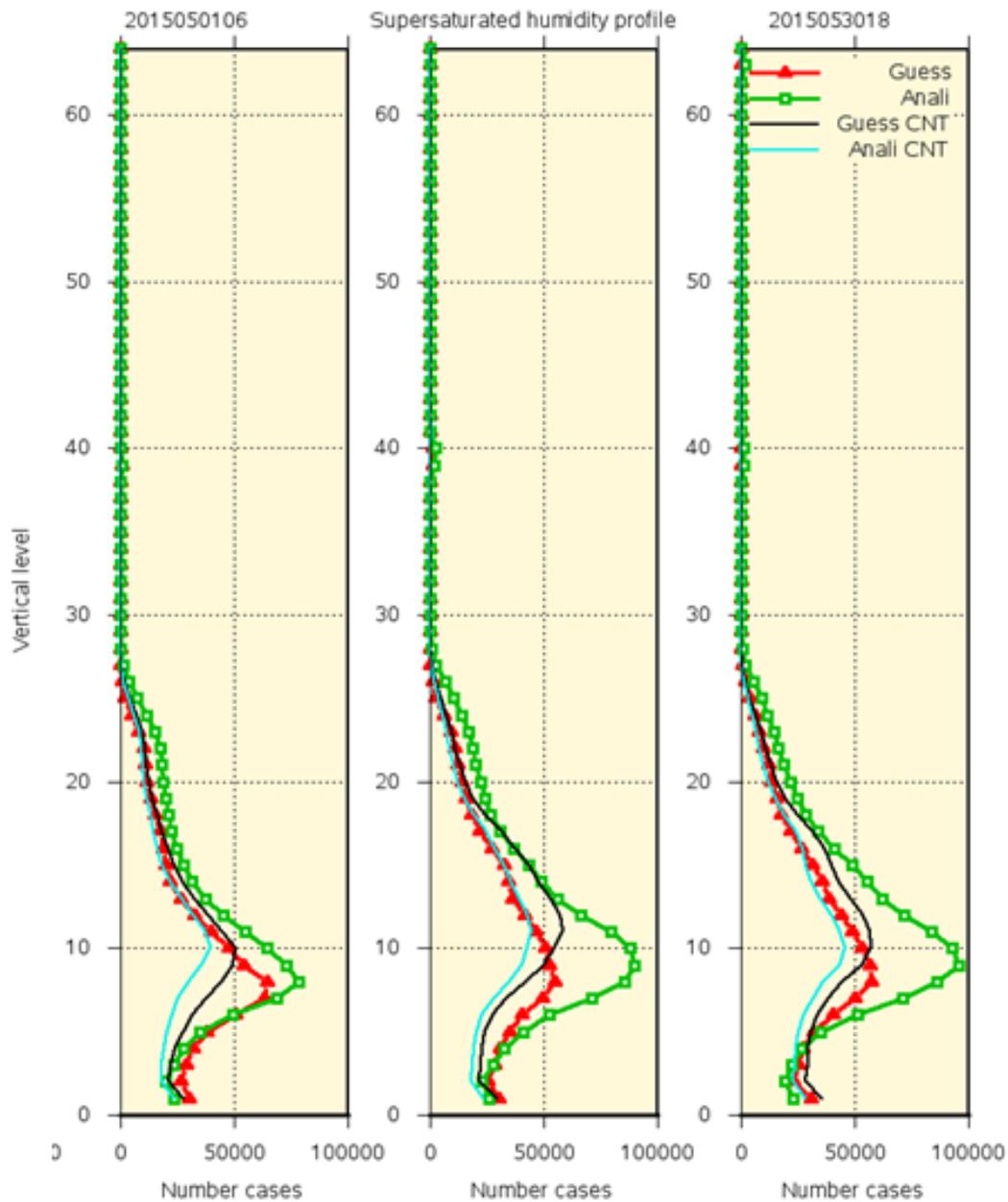


Figura 4.12 - Perfis verticais do número de casos de umidade supersaturada gerados nos experimentos SMG V2.0.2 (*First Guess* e *Análise CNT*) e SMG V2.1.0 (*First Guess* e *Análise*) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado.

4.4 Avaliação da Conservação de Massa Seca na rodada cíclica do GSI

No sistema GSI do SMG, há dois parâmetros que fazem referências à injeção de massa seca, e que são importantes para a conservação de massa da análise. Estes parâmetros são os seguintes (segundo o manual do sistema, [DTC \(2015\)](#)):

- **ljcpdry**: quando verdadeiro (TRUE), utiliza a injeção de massa seca no incremento de análise;
- **bamp_jcpdry**: é um coeficiente a ser aplicado no cálculo da contribuição (incremento) da massa seca (pressão sem a umidade). Esta descrição não está no manual.

Há basicamente duas rotinas no GSI que utilizam o parâmetro “bamp_jcpdry”, quando o parâmetro “ljcpdry” é verdadeiro: “intjcmof.f90” e “stpjcmod.f90”. A primeira (e principal) rotina faz referência explícita à injeção de umidade e quaisquer outros procedimentos que podem ser adicionados ao termo J_c da função custo. A segunda está mais relacionada com a minimização da função custo em que os termos de injeção do J_c são utilizados.

Na rotina “intjcmof.f90”, a subrotina “intjcpdry2” faz o seguinte procedimento:

```
! Remove water-vapor contribution to get incremental dry ps
...
      dmass=mass(n)-mass(nbins+n)
      dmass=bamp_jcpdry*dmass*rcon*rcon
```

Ou seja, o parâmetro “bamp_jcpdry” atua como um coeficiente para a variável “dmass” (dmass = dry mass = massa seca). Ainda na subrotina “intjcpdry2”, a variável “dmass” é utilizada em outros procedimentos para a remoção da água e finalmente se obter o incremento de pressão seca.

Na rotina “stpjcmod.f90”, a subrotina “stpjcpcdry” faz o seguinte procedimento:

```
! Now penalize non-zero global mean dry ps increment
! Notice there will only be a contribution from PE=0
if(mype == 0)then
  do n=1,nbins
    pen = pen + bamp_jcpdry*dmass(n)*dmass(n)
    b = b - bamp_jcpdry*dmass(n+nbins)*dmass(n)
```

```
        c = c + bamp_jcpdry*dmass(n+nbins)*dmass(n+nbins)
    end do
end if
```

Ou seja, o parâmetro “bamp_jcpdry” atua como um coeficiente para a variável “dmass”, mas desta vez na aplicação da injunção, ou seja, penalizando a média global da pressão seca quando esta não for zero. Uma referência para esta condição, está na figura do Slide 11 em [Derber \(2010\)](#).

Em ambas as versões em avaliação nesse trabalho, a injunção para conservação de massa seca não foi aplicada. Isso será feito posteriormente em uma rodada longa da versão, pois nessas condições que o efeito desse procedimento apresenta resultados satisfatórios. Para verificar os resultados em testes de sensibilidade do sistema SMG, ver detalhes em [Mattos et al. \(2017\)](#), na avaliação da versão SMG V1.0.0.

5 Categoria III: Ampliação Gradativa da Base de Dados

Como toda a assimilação de dados é um processo em que todas as informações (fornecidas pelas observações e geradas pelo modelo) são avaliadas simultaneamente uma uma análise global, onde a análise gerada é a que em teoria tem a mínima variância, a inclusão de novas bases de dados, ou novos sensores ou ainda todo um novo sistema de observação, deve ser feito de forma controlada onde os benefícios são medidos com base em uma situação aceita como referência. Nessa seção da avaliação diagnóstica, tanto nesse relatório como nos demais futuros dessa serie, a inclusão de dados será avaliada e o impacto em cada um dos aspectos considerados deverão ser quantificado e publicado para demonstrar a evolução do sistema e a contribuição isolada, isso quando possível, de cada sistema de observação seja avaliado. As quatro principais bases de dados tratadas nas próximas seções são (por grau de crescente complexidade) dados convencionais, dados de vento por satélites, dados de ROGNSS e dados de radiâncias.

5.1 Inclusão dos Dados Convencionais

Como já discutido em [Sapucci et al. \(2016a\)](#), [Sapucci et al. \(2016b\)](#), a definição ou a classificação de dados convencionais ou não convencionais do ponto de vista da assimilação é bastante discutível e normalmente gera diversas dúvidas e divergências entre os atores envolvidos nessa tarefa, em especial quando compara-se a base de dados entre diferentes instituições. Lê-se convencional nesse contexto como sinônimo de tradicional, clássico, usual, normal e habitual. Assim, o que não é convencional em um determinado momento, passa a ser quando rotineiramente esse dados é utilizado e o que não é convencional para um pode ser para outro. Nesse sentido, para evitar tais problemas e simplificar o tratamento do conjunto total dos dados, separa-se desse conjunto os dados de radiância e os dados de ROGNSS, o restante é considerado em um mesmo bloco, sendo denominado de convencional. Essa separação está mais associada a controle de qualidade dos dados que é feito nesses três diferentes subconjuntos de forma distinta. Uma outra modificação, essa mais recente, foi a separação dos dados de vento por satélite desse conjunto de convencionais. Essa modificação não se deu pelo método do controle de qualidade, mas pelo volume de dados que tem crescido com o emprego de diversos satélites e canais, gerando um desequilíbrio na quantidade desse sistema de observação com relação aos demais. Assim os dados são separados em 4 grupos, sendo os dados de vento por satélites, o ROGNSS, as radiâncias e os dados convencionais. Os 3 primeiros são tratados nas outras seções subsequentes e os dados convencionais são avaliados nessa seção.

Uma característica importante dos sistemas de observação convencionais é que por estarem baseados em estações terrestres, os mesmos apresentam uma distribuição espacial muito irregular e favorecem áreas continentais. Além disso, devido ao alto custo para a instalação e manutenção operacional de estações meteorológicas (em especial as de radiossondagens) as observações estão concentradas em países desenvolvidos, como os da América do Norte e Europa. Esses dois fatores contribuem para que haja naturalmente uma concentração dessa base de dados sobre o hemisfério norte, de tal forma que hemisfério sul tem sido pouco amostrado. Um outro ponto é a distribuição temporal dos dados que também não é uniforme, pois a coleta dos dados concentra-se nos horários sinóticos tendo o horário das 12 UTC o momento em que a base de dados é mais completa.

O conjunto de dados de observações convencionais utilizados nessa avaliação da versão SMG V2.1.0 é obtido a partir dos arquivos PrepBUFR provenientes do NCEP através da internet, já com as *flags* de controle de qualidade preparadas. Atualmente, estes arquivos já são produzidos pelo CPTEC empregando o processo de controle de qualidade baseado no modelo utilizado pelo SMG. Nas próximas versões pretende-se avaliar a utilização desses arquivos gerados no CPTEC e avaliar o desempenho do sistema com a inclusão desses, tendo como referência a utilização dos dados Prep-Bufr do NCEP. Maiores informações sobre o processo de controle de qualidade das observações convencionais e não convencionais, podem ser encontradas em [Sapucci et al. \(2016a\)](#), [Sapucci et al. \(2016b\)](#).

Os dados convencionais utilizados na assimilação de dados do GSI, são observações das componentes do vento horizontal (u e v), temperatura do ar (T), umidade específica (q), pressão em superfície (ps) e vapor d'água integrado na coluna atmosférica a partir de receptores GPS (gps). Estes dados, entretanto, são obtidos a partir de diferentes instrumentos em superfície, à bordo de navios, aviões (etc) e são classificados de acordo com a Figura 5.1 a seguir.

Identificação do dado			Variáveis no convinfo					Níveis de pressão															
Tipo de dados	Cod PrepBuffr	Minemônico	Tv	q	PS	UV	IPW	SST	100	900	800	700	600	500	400	300	250	200	150	100	50	0	
Radiossondas	120	ADPUPA			1				X	X	X	X	X	X									
	120	ADPUPA		1					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	120	ADPUPA	1						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	220	ADPUPA			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pibal	221	ADPUPA			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dropsondas	132	ADPUPA			-1				X	X	X	X	X	X									
	132	ADPUPA		1					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	132	ADPUPA	1						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	232	ADPUPA			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RASSDA Profiler	126	RASSDA	-1						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Perfilhador de vento da NOAA	223	PROFLR			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Vento por radar	224	VADWND			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Perfilhador de vento JMA	228	PROFLR			-1																		
Perfil decodificado Buletin Piloto	229	PROFLR			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GPS receptor	153	GPSIPW					-1		X	X	X												
SUPEROBED SCATTEROMETER (ASCAT)	289	WDSATR				1			X	X													
NON-SUPEROBED SCATTEROMETER (ASCAT)	290	ASCATW				1			X	X													
AIREP PIREP Sensores avião	130	AIRCFT	1	-1					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	230	AIRCFT			1				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Boias e sensor navios	180	SFCSHP			1				X	X	X												
	180	SFCSHP	1	1					X	X	X												
	182	SFCSHP			1				X	X	X												
	182	SFCSHP	1	1					X	X	X												
	280	SFCSHP			1				X	X	X												
	282	SFCSHP			1				X	X	X												
Estação a superfície com pressão	181	ADPSFC			1			-1	X	X	X	X	X										
	181	ADPSFC	-1	-1					X	X	X	X	X										
	187	ADPSFC			1				X	X	X	X	X										
	187	ADPSFC	-1	-1					X	X	X	X	X										
	281	ADPSFC					-1		X	X	X	X	X										
Boias a estações sem pressão	183	ADPSFC			-1			-1	X	X	X												
	183	ADPSFC	-1	-1					X	X	X												
	284	ADPSFC ADPSHP					-1		X	X	X												
	287	ADPSFC					-1		X	X	X												

Figura 5.1 - Relação dos diferentes tipos de dados considerados convencionais no GSI e as respectivas variáveis a eles relacionadas (assimiladas ou monitoradas) em seus respectivos níveis de pressão.

Uma avaliação detalhada e criteriosa será feita nas próximas seções para os diversos tipos de dados começando com os mais importantes do ponto de vista de impacto dos dados na previsão. Nessa avaliação três aspectos de cada tipo de dado serão abordados: a distribuição espacial, o comportamento do OMF e OMA em função do tempo de assimilação e um monitoramento dos dados rejeitados.

5.1.1 Dados de estações meteorológicas a superfície terrestres (SYNOP e METAR)

O grupo de observações de superfície continental ADPSFC são observações obtidas de estações sinóticas de superfície (SYNOP) e aeródromos (METAR). Essas observações são obtidas tanto por meio manual, como por meio automático. As va-

riáveis medidas pelas estações de superfície (ADPSFC) são temperatura virtual (T_v) e/ou temperatura do ar (T_s) umidade específica (q), pressão atmosférica na estação (P_s), Velocidade (V_v) e direção do vento (D_v). Para informações mais detalhadas dessa fonte de dados acesse [Sapucci et al. \(2016a\)](#). Embora todos esses valores sejam disponíveis para a assimilação, apenas as informações de pressão a superfície são assimiladas no GSI, pois as demais informações são contaminadas pela grande influência da superfície e são apenas monitorados no processo. Esses dados monitorados deverão ser assimilados ao utilizar modelos em alta resolução.

5.1.1.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados

No que se refere a distribuição espacial dos dados de pressão medidos a superfície em estações SYNOP e METAR, a Figura 5.2 mostra as regiões do globo onde estão concentradas essas estações. Nessa figura é mostrado para um dia qualquer como uma distribuição típica dessa rede de dados. Observa-se que há uma pequena modificação na concentração em algumas regiões em função das diferentes horas sinóticas decorrente da não uniformidade temporal da coleta. Sobre regiões como na América do Sul, Canadá, África e Índia observa-se uma concentração menor nos horários de 06 e 18 do que as 00 e 12 UTC. Essa modificação fica mais evidente em uma animação de todo o período que pode ser acessada na [página de evolução do sistema SMG V2.0.0](#). Nessa página também pode ser observado que em termos visuais o número de observações assimiladas entre as duas versões é semelhante. Uma análise quantitativa poderá ser feita posteriormente para identificar de forma mais rigorosa o aumento dos valores assimilados.

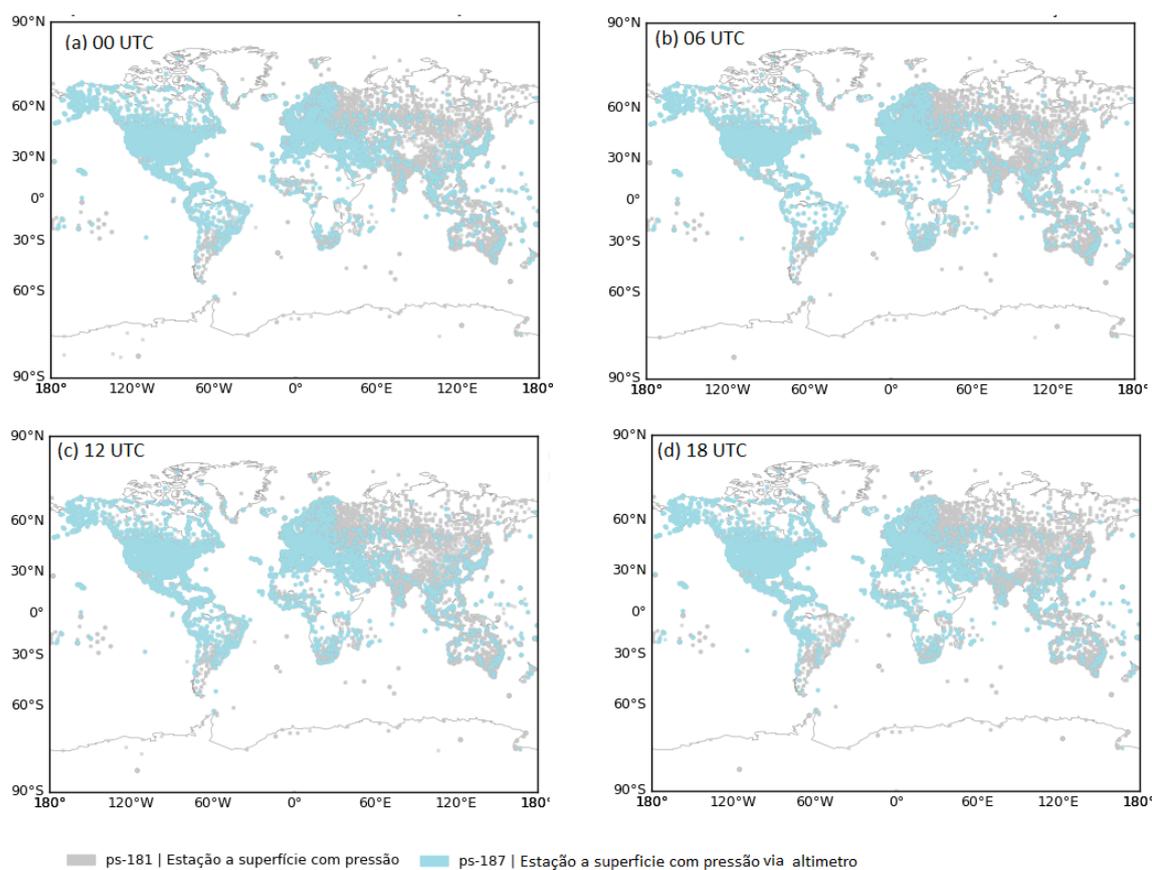
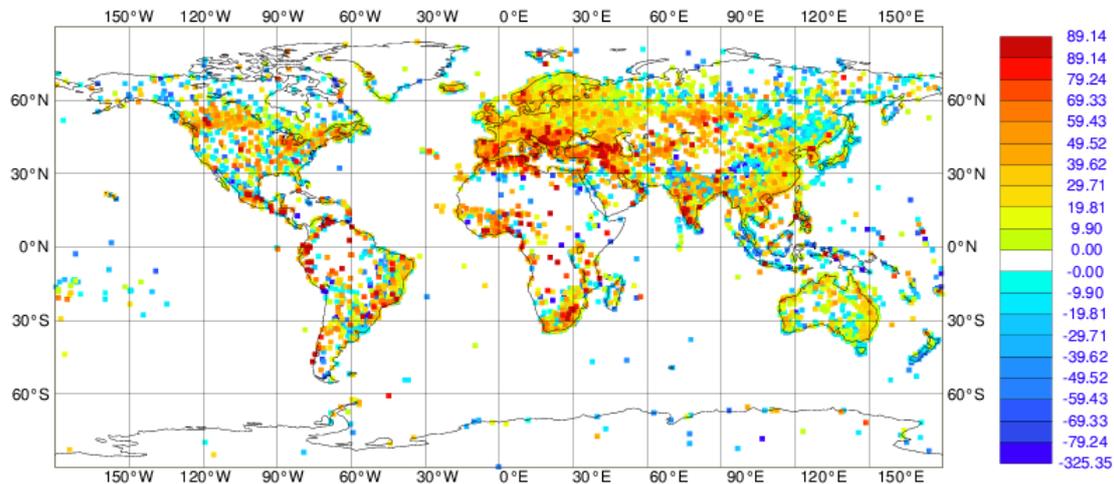


Figura 5.2 - Distribuição espacial típica das estações de superfície com dados de pressão assimilados, sendo os pontos em cinza as estações com dados de pressão medidos e os pontos em azul são os dados de pressão calculados a partir das medidas do altímetro e altitude, ambos sendo assimilados no GSI.

A Figura 5.22 mostra a distribuição espacial dos dados assimilados no ECMWF e a mesma evidência que em termos gerais a versão SMG V2.1.0 apresenta um padrão de assimilação dos dados semelhante ao observado nesse centro. Uma análise mais detalhada poderá ser realizada no futuro para que se possa comparar adequadamente essas duas figuras. O uso do Obstat no CPTEC poderá ajudar nesse processo.

PRESSURE FROM SYNOP
 MEAN FIRST GUESS DEPARTURE (OBS-FG) [PA] (USED)
 DATA PERIOD = 2018-03-21 21 - 2018-04-21 09
 EXP = 0001, CHANNEL = 1
 Min: -315.450 Max: 251.690 Mean: 10.844
 GRID: 0.50x 0.50



Surface pressure

Figura 5.3 - Distribuição espacial das estações de superfície com dados de pressão assimilados no ECMWF. As cores utilizadas sobre os pontos da posição das observações se referem aos valores médios mensais do OmA. (Fonte: site ECMWF).

5.1.1.2 Avaliação da Análise em termos do OmA

Na Análise do OmA a Figura 5.4 mostra os valores médios e desvio padrão em cada um dos níveis atmosféricos assimilados e para todo o globo em uma serie temporal para todo o período avaliado. Na base dessa figura é mostrado a concentração dos dados em função do tempo e também dos níveis de pressão onde as observações foram assimiladas. No plote da esquerda tem-se os dados para as estações de superfície com dados de pressão observadas e da direita as observações estimadas a partir de altímetros. Com relação a concentração dos dados, o número de observações é constante no período sendo mais concentrado nos dois primeiros níveis (1000 e 900 hPa). Algo que chama a atenção é que embora seja em uma concentração baixa, existem dados de pressão sendo assimilados nos níveis de 700, 600 e 500 hPa. Observa-se que nesse níveis acima de 800 hPa existe um bias positivo, o qual é observado em ambos os tipos de dados, ele é maior nos do tipo 181, em especial em 700 hPa em praticamente todo o período avaliado, com uma dispersão também elevada. Os va-

lores apresentados nessa figura são idênticos aos obtidos com a versão SMG V2.0.0, como pode ser visto em acessando a [página de evolução do sistema SMG V2](#) onde uma comparação com o experimento da versão V1.0.0 é também apresentado.

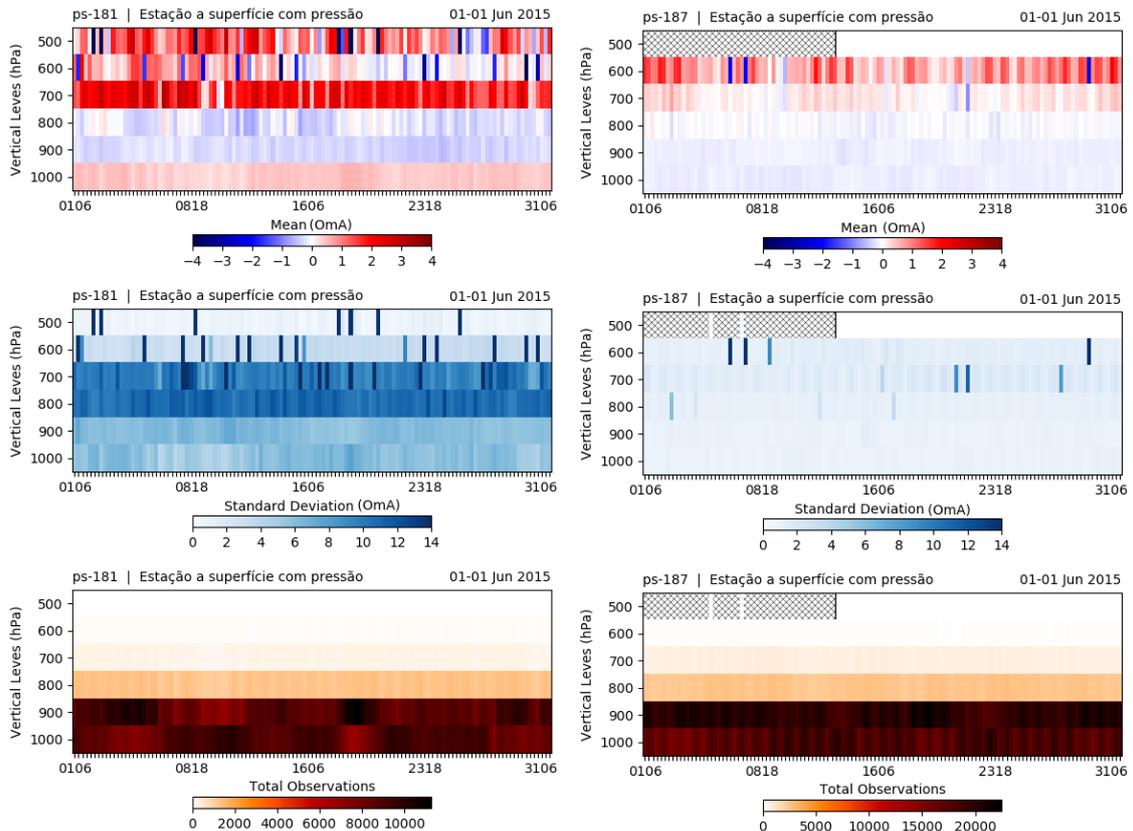


Figura 5.4 - Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica de estações a superfície foram assimiladas no experimentos com a versão SMG V2.1.0.

5.1.1.3 Diagnóstico dos dados rejeitados

Com relação aos dados rejeitados ainda está em processo de desenvolvimento uma metodologia para monitorar esses dados. Resultados preliminares podem ser apresentados na [página de evolução do sistema SMG V2.0.0](#) a qual mostra que o número de dados rejeitados é relativamente pequeno, o que coloca em dúvida esses resultados preliminares, e mostra que a função deve ser revista.

Na Figura 5.5 é mostrada a relação das estações sem dados de pressão e por isso não assimiladas no sistema. Nesses estações devem ser revistas os motivos da ausência

dos dados. Observa-se que há uma concentração ao sul do Brasil que merece atenção.

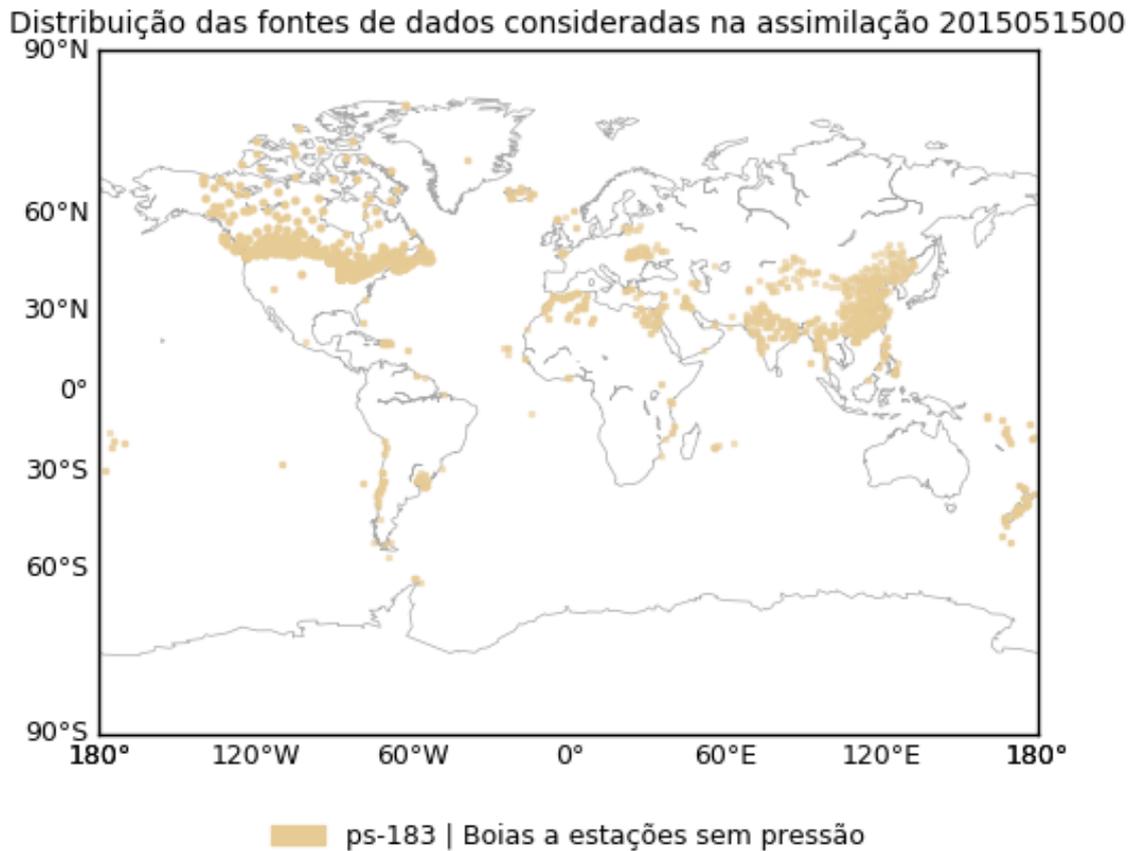


Figura 5.5 - Distribuição espacial dos dados não assimilados por ausência de dados de pressão a superfície.

5.1.2 Dados de ar superior na atmosfera (Radiossondas, Balão Piloto, Dropsondas)

As radiossondas são um sistema eletrônico contendo sensores meteorológicos de medidas de temperatura (T), pressão (P_s) e umidade (q) além de um sistema de posicionamento, o qual permitem estimar a direção e velocidade do vento, ou componentes zonal e meridional (u e v) e um sistema de comunicação via rádio, o quais varrem a coluna vertical atmosférica suspensas por balões inflados com gás hélio. Estes atingem alturas típicas da ordem de 20 a 30 km. Os sensores medem as variáveis atmosféricas durante o período de ascensão na atmosfera e os dados observados, minuto a minuto, são enviados à estação receptora no solo através do sistema de

comunicação via ondas de rádio.

As chamadas Dropsonda são semelhantes as radiossondas, mas diferem pelo fato das mesmas serem despejadas de uma aeronave ou um balão que se encontra em altas altitude. A medida que a sonda cai, vai fazendo as medições de vento, pressão atmosférica, temperatura e umidade. Através de ondas de rádio as informações são transmitidas para a aeronave ou balão em tempo real e posteriormente transmitida para a estação em superfície.

Os pibal são observações estimadas de direção e velocidade do vento obtidas pelo rastreamento da posição relativa de balões utilizando teodolitos em terra operados manualmente.

5.1.2.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados de radiossondas

A distribuição espacial das radiossondas, devido a seu alto custo, está associado com o poder econômico de cada região, sendo mais densificado, portanto, na Europa e América do Norte. Com relação à frequência temporal das mesmas, tem uma concentração maior as 00 e 12 UTC, sendo ainda maior as 12 UTC. A Figura 5.6, mostra essa distribuição espacial dos dados assimilados de radiossondas. Como os dados do vento possuem um maior conjunto de sistemas diferentes baseados em sondas, tais como os Pibal e Dropsondas, esse variável será aqui utilizada para uma avaliação mais rigorosa. Na Figura 5.6 é mostrado um mosaico onde cada uma dos diferentes horários são apresentados para facilitar a análise da concentração espacial e temporal nas diferentes regiões das radiossondas, pibal e dropsondas.

Para as outras variáveis, tais como “temperatura” (disponível em “[avaliação temperatura na versão V2.0.0](#)”), “Pressão atmosférica” (disponível em “[avaliação pressão na versão V2.0.0](#)”) e “Umidade” (disponível em “[avaliação umidade na versão V2.0.0](#)”), das radiossondas, uma análise detalhada é mostrada na página wiki do Readmine. Clique sobre os links acima na versão digital para acessar uma página específica para a distribuição espacial de cada uma delas. Nessa página animações são mostradas (por meio de uma combinação de imagens), além da evolução temporal dos lançamentos no mês de maio de 2015, onde os dados do experimento da rodada da versão V2.1.0 do SMG foi utilizada.

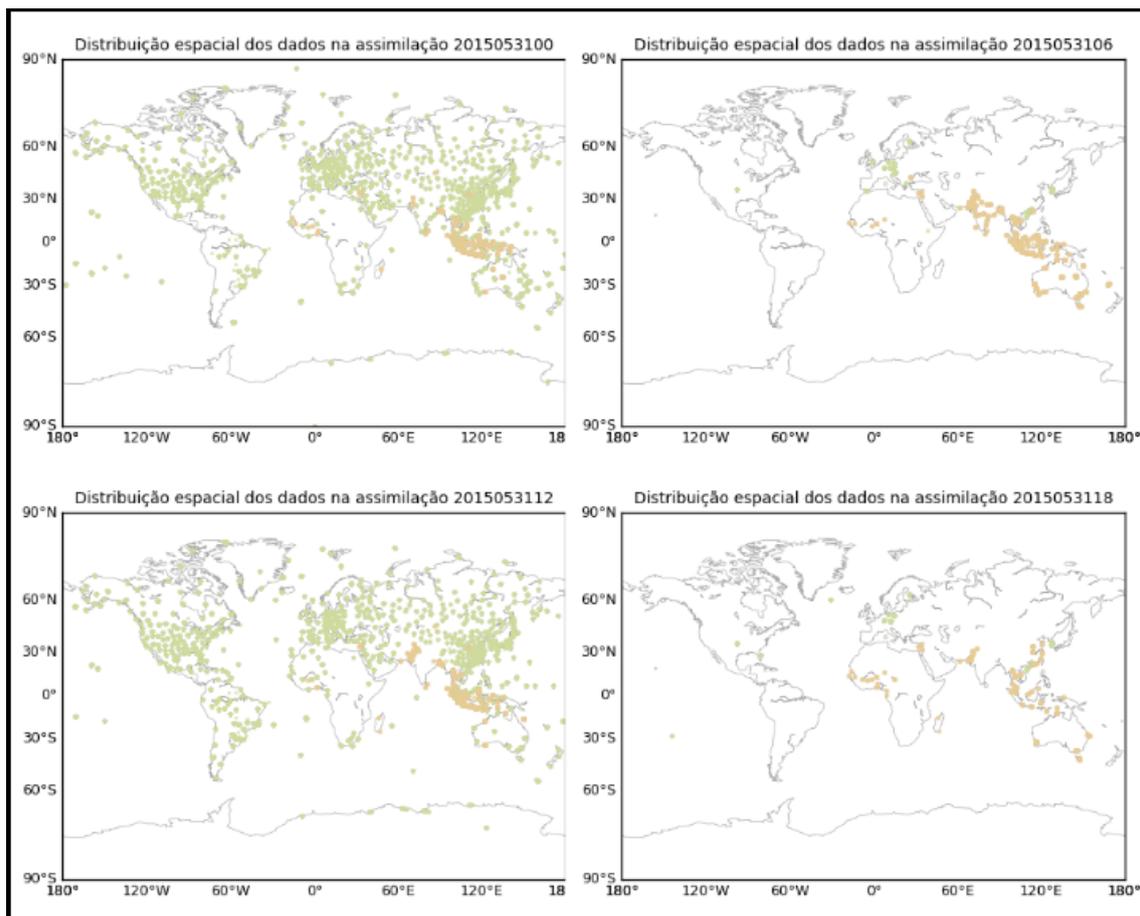


Figura 5.6 - Distribuição espacial dos dados de vento assimilados provenientes de radiossondas, sendo os pontos verdes as radiossondas e os laranja os dados de Pibal, para os diferentes horários sinóticos para o dia 31/05/2015.

A Figura 5.7 mostra a distribuição espacial dos dados assimilados no ECMWF e a mesma evidência que em termos gerais a versão SMG V2.1.0 apresenta um padrão de assimilação dos dados semelhante ao observado nesse centro. Uma análise mais detalhada poderá ser realizada no futuro afim de comparar adequadamente essas duas figuras. O uso do Obstat no CPTEC poderá ajudar nesse processo.

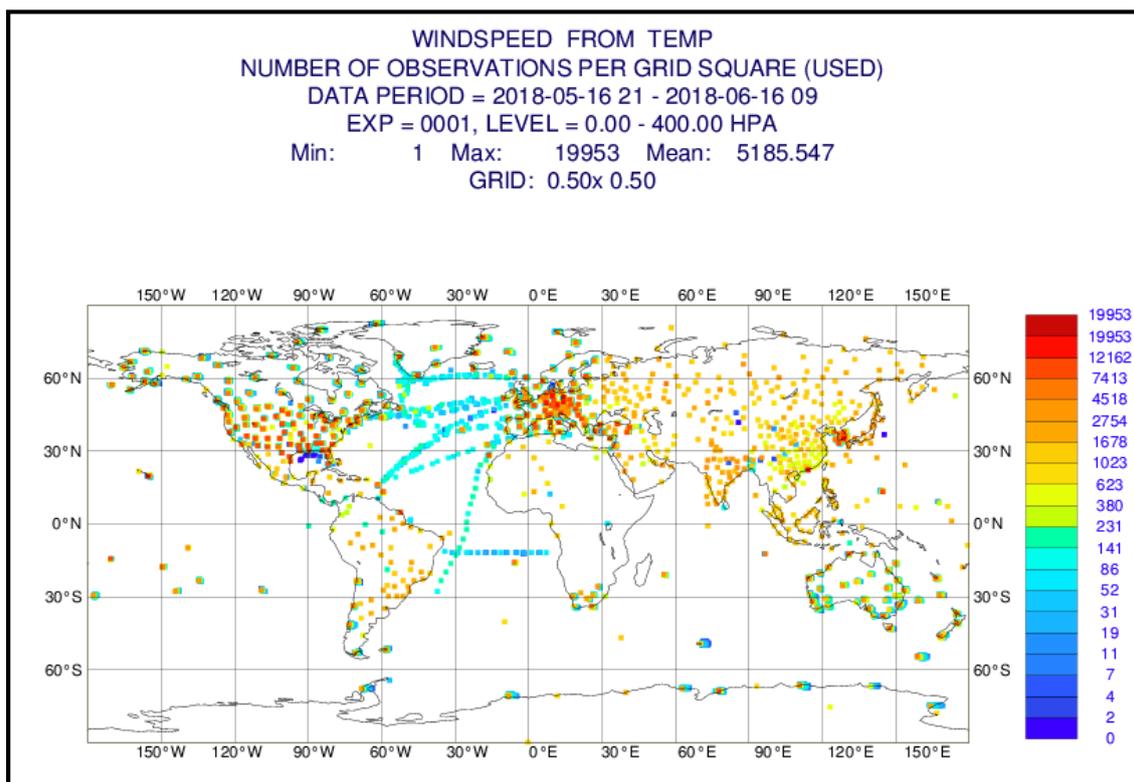


Figura 5.7 - Distribuição espacial dos dados provenientes de radiossondas utilizados na assimilação no ECMWF. A cor dos pontos plotados no mapa se referem aos número médio de observações no período. (Fonte: site ECMWF).

5.1.2.2 Avaliação da Análise em termos do OmA

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 mostram as séries temporais dos valores médios e desvio padrão e quantidade de dados disponíveis nos experimentos V2.0.0 e V2.1.0 para a pressão, e componentes do vento (radiossondas e Pibal), respectivamente. A Figura 5.8 mostra adicionalmente os resultados da versão SMG V1.0.0 para permitir a comparação. Observa-se nessa figura que os resultados das versões V2.0.0 e V2.1.0 são muito semelhantes e por essa razão nessa análise dos dados convencionais serão comparados com a versão V1.0.0. De forma geral, os resultados mostram que os valores dessas métricas estatísticas apresentaram melhora da versão V1.0.0 para a versão V2.1.0 com uma semelhante quantidade de dados utilizados, o que indica um aprimoramento do sistema de assimilação. Os valores do OmA médio são menores e há uma diminuição da dispersão dos resultados em torno dessa média o que é um bom indicativo dessa melhora. Uma exceção desse padrão é na umidade (figura não mostrada) que apresentou um sutil aumento no bias em baixos níveis e diminuição dos níveis mais elevados e com mesmo padrão com relação a dispersão nesses mesmos

níveis.

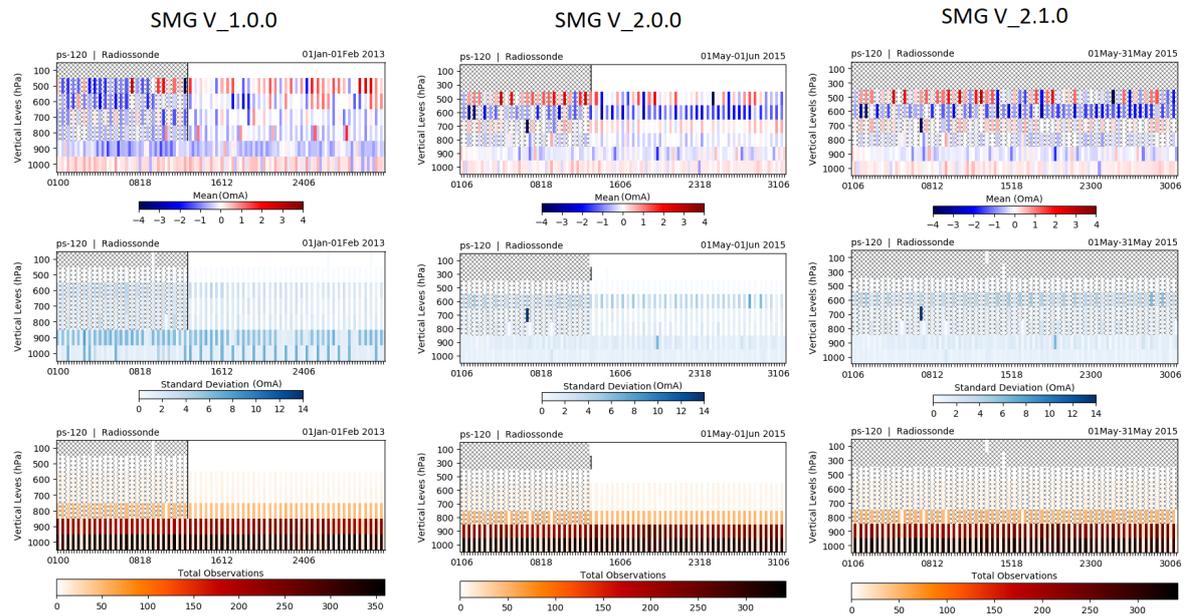


Figura 5.8 - Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica coletados por radiossondas foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda, SMG V2.0.0 no centro e SMG V2.1.0 a direita.

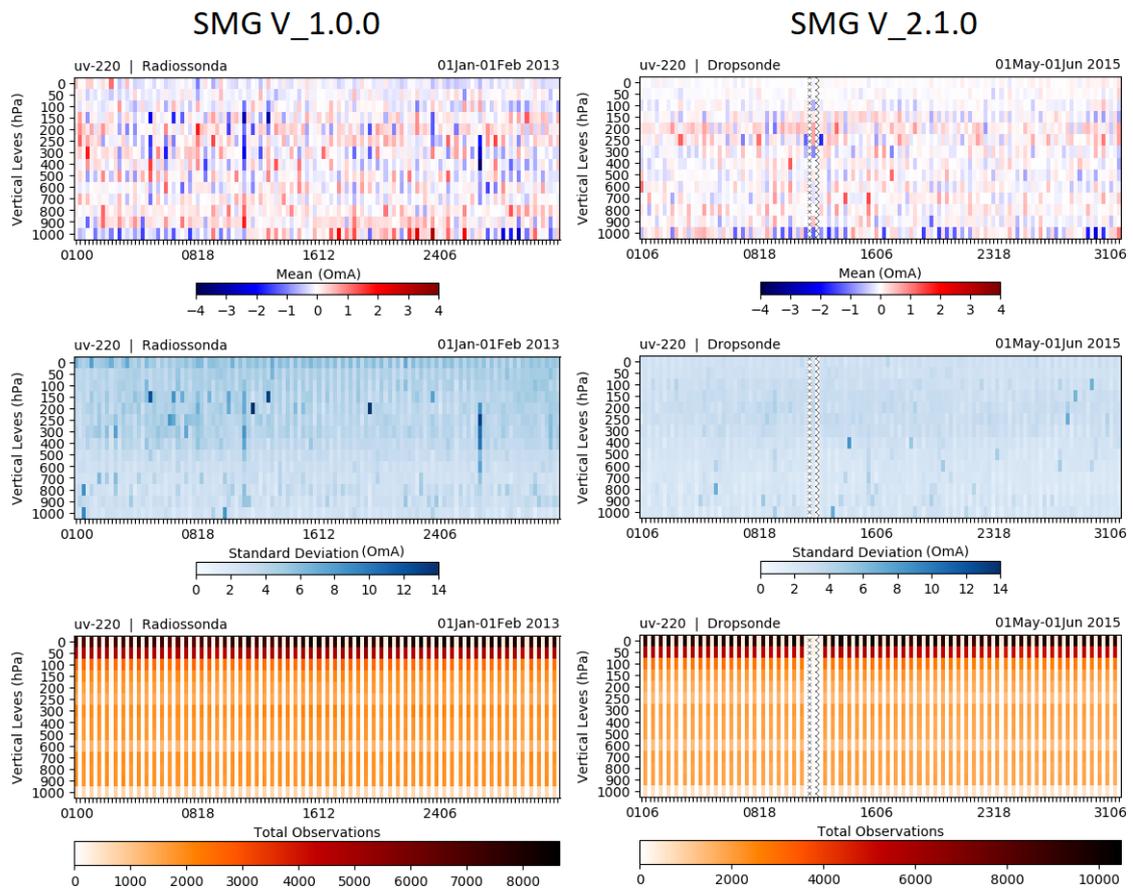


Figura 5.9 - Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em radiossondas foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.1.0 a direita.

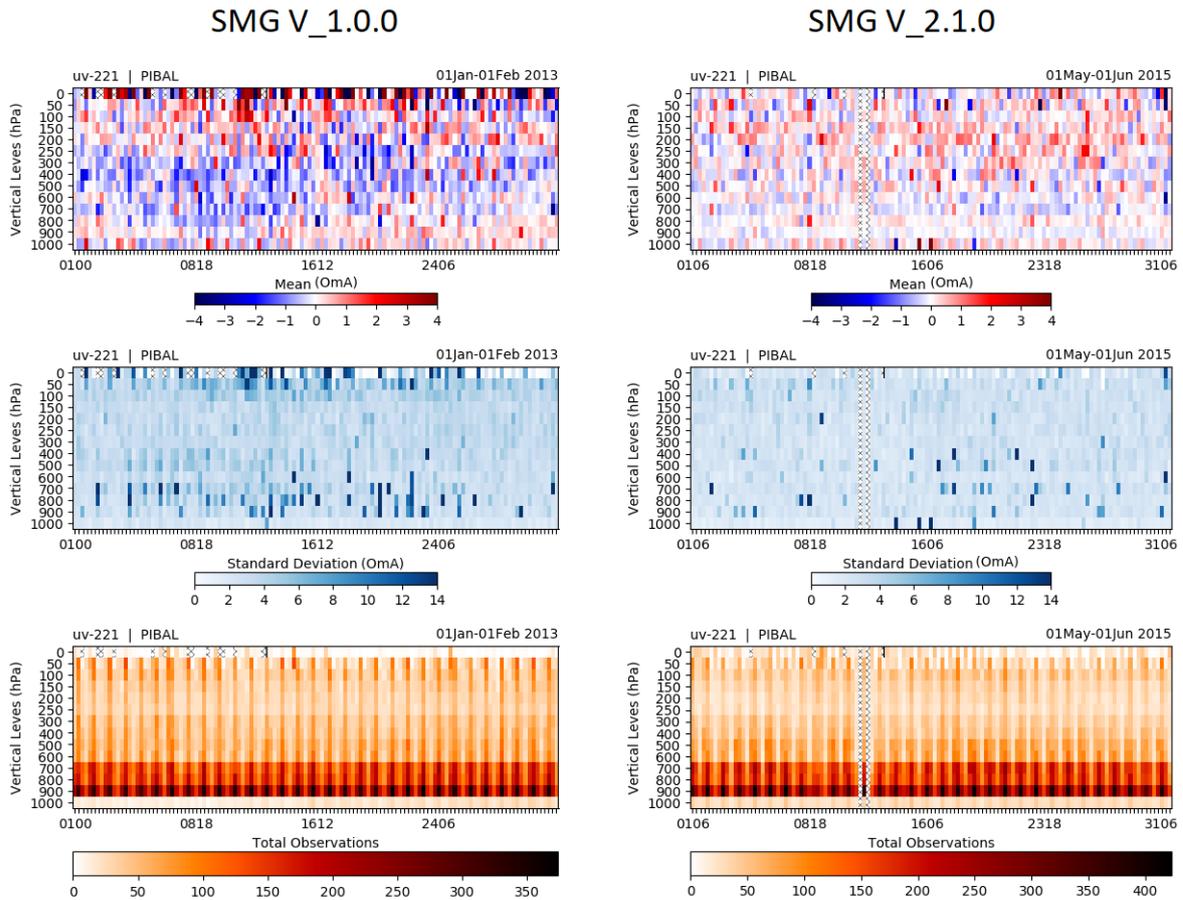


Figura 5.10 - Série temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em balão piloto (Pibal) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.1.0 a direita.

Mais detalhes dessa análise com separação entre as rodadas das 00 e 12 UTC e 06 e 18 UTC são apresentados nas páginas específicas para as variáveis assimiladas nas radiossondas, tais como [Temperatura](#), [Pressão Atmosférica](#), [Umidade](#) e [Componentes \$u\$ e \$v\$ do Vento](#), clique sobre os links para acessar uma página específica para a distribuição espacial de cada uma delas.

5.1.2.3 Diagnóstico dos dados rejeitados

A Figura 5.11 abaixo mostra a serie temporal dos dados rejeitados em cada um dos experimentos V1.0.0 (em vermelho) e a versão SMG V2.0.0 (em verde) para as várias variáveis observadas pelas radiossondas. Observa-se que a quantidade de dados rejeitados não modifica muito nas observações de umidade onde até a versão V2.0.0 rejeita um pouco mais do que a versão V1.0.0, mas é bastante significativa a

modificação no padrão de observações rejeitadas nas demais variáveis sendo maior na temperatura nas componentes u e v do vento nas radiossondas e balão piloto. Nas dropsondas a comparação não é adequada e não se pode nada concluir, pois esses lançamentos são esporádicos e depende muito do período avaliado.

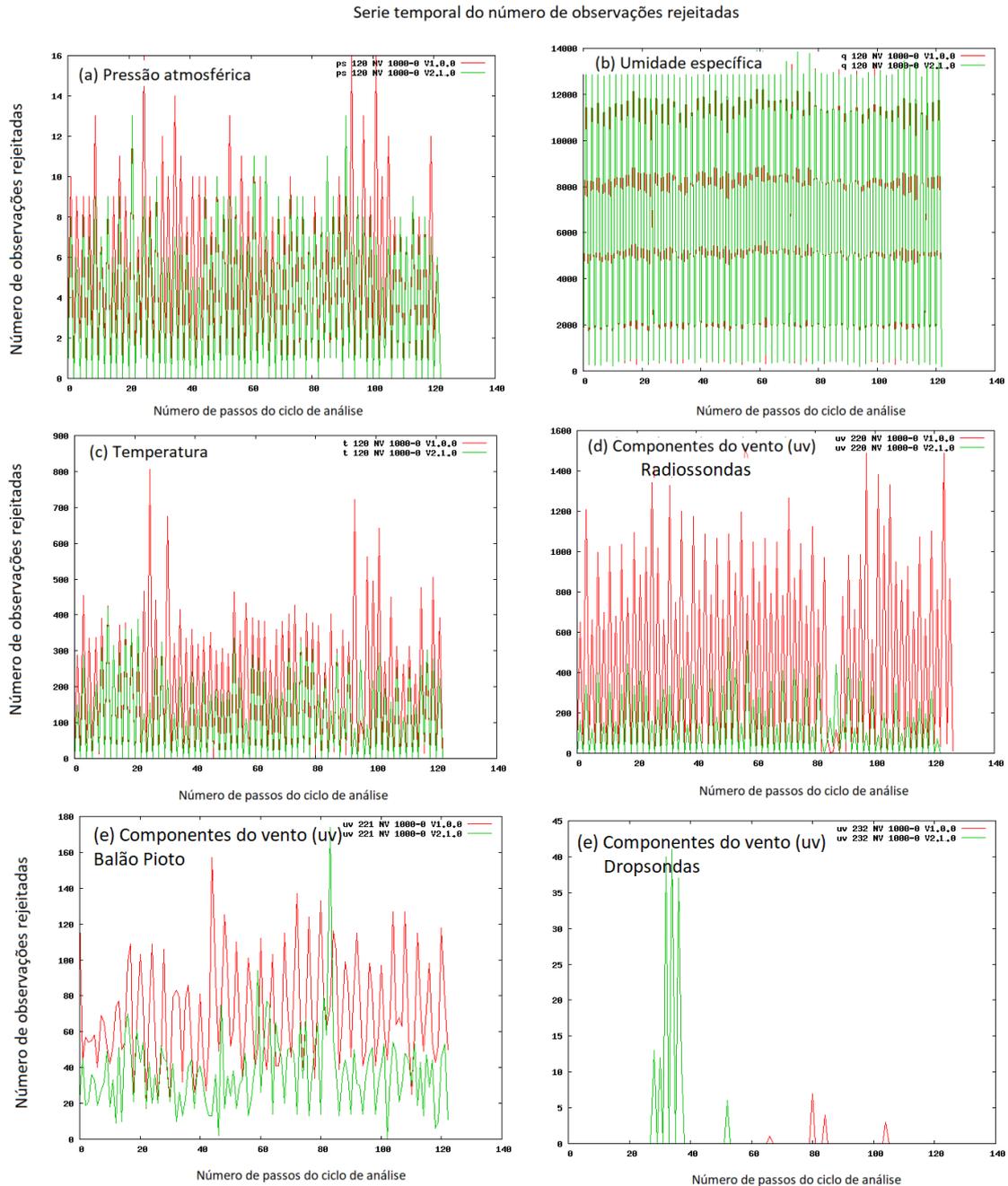


Figura 5.11 - Série temporal da quantidade de dados de radiossondas rejeitados no GSI para o experimento da versão SMG V1.0.0 (em vermelho) e para o experimento da versão SMG V2.1.0 (em verde).

5.1.3 Dados de sensores meteorológicos instalados em aviões (ACARS, AIRCRAFT e MDCRS)

Os dados de aviões no GSI são utilizado de duas principais fontes com cada uma recebendo um mnemônico específico, que são eles:

- **AIRCAR:** Dados de sensores meteorológicos instalados em aviões (ACARS, AIRCRAFT e MDCRS): Para mais informações sobre esse tipo de dados acesse a wiki [AIRCAR](#) no projeto SMG. O AIRCAR são observações feitas em avião por meio automático e enviadas diretamente para satélites geoestacionários e posteriormente enviadas para o solo a fim de serem distribuídas entre os diversos integrantes do GOS. A maior diferença entre as observações de aviões AIRCFT e AIRCAR é que o AIRCAR possui uma maior frequência de fornecimento de dados.
- **AIRCFT:** Dados de sensores meteorológicos instalados em aviões comerciais (AIREP, PIREP, AMDAR, TAMDAR): Para mais informações sobre esse tipo de dados acesse a wiki AIRCFT no projeto SGD. O AIRCFT é composto pelas observações feitas do avião e enviadas para o solo tanto por meio manual como por meio automático. As variáveis usadas no GSI relativo a dados de avião AIRCFT são: (a) Temperatura atmosférica (temperatura do bulbo seco) T_s (b) Medidas da direção e velocidade do vento, gerando as componentes u e v .

5.1.3.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados

As Figuras 5.12 e 5.13 abaixo mostra uma evolução no tempo da distribuição espacial dos dados AIRCFT para a temperatura e componentes u e v do vento para a data 16 de maio de 2015 as 12 UTC, respectivamente. Observa-se que esses dados estão concentrados nas rotas entre a América do Norte e a Europa, sobre o espaço aéreo dos EUA e entre EUA, Nova Zelândia e Austrália. A distribuição entre a temperatura e as componentes do vento são muito semelhantes, sem aspectos que possam privilegiar uma variável em relação a outra.

Distribuição das fontes de dados consideradas na assimilação 2015051612

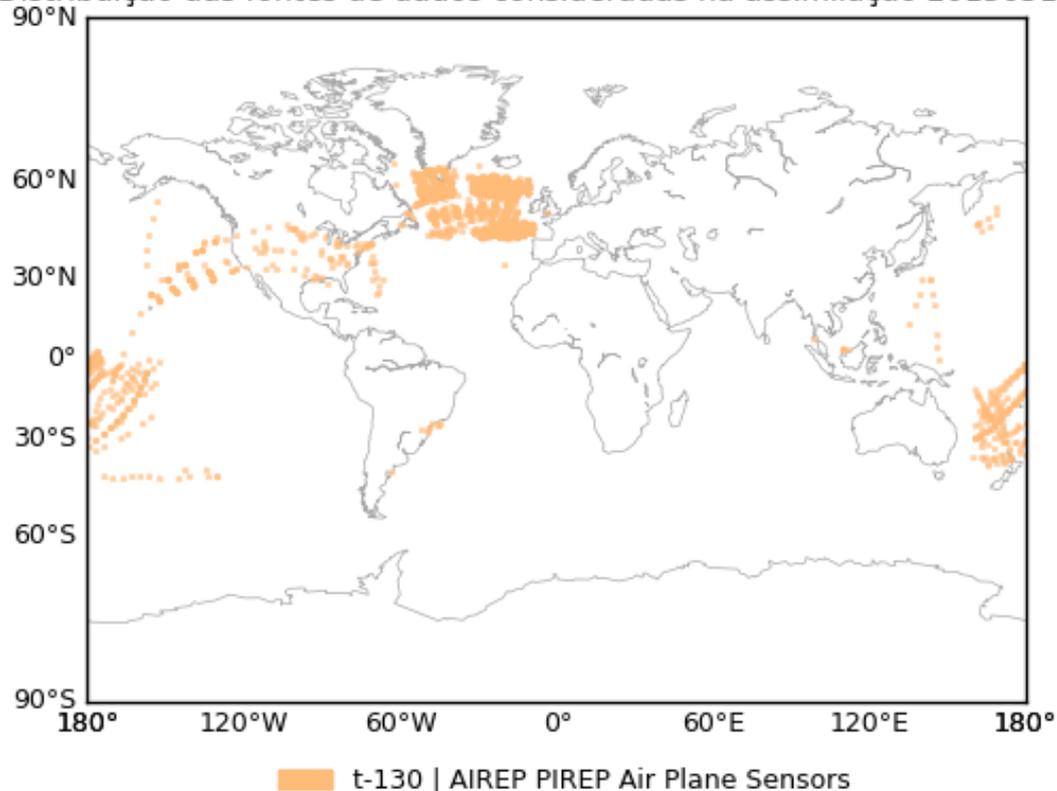


Figura 5.12 - Distribuição espacial dos dados de temperatura provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.

Com relação a distribuição vertical desses dados, a maioria deles se encontram nos níveis entre 250 a 100 hPa, pois são as observações feitas durante o período de cruzeiro dos aviões, enquanto que nos níveis inferiores são as observações realizadas durante os procedimentos de pouso e decolagem das aeronaves.

Distribuição das fontes de dados consideradas na assimilação 2015051612

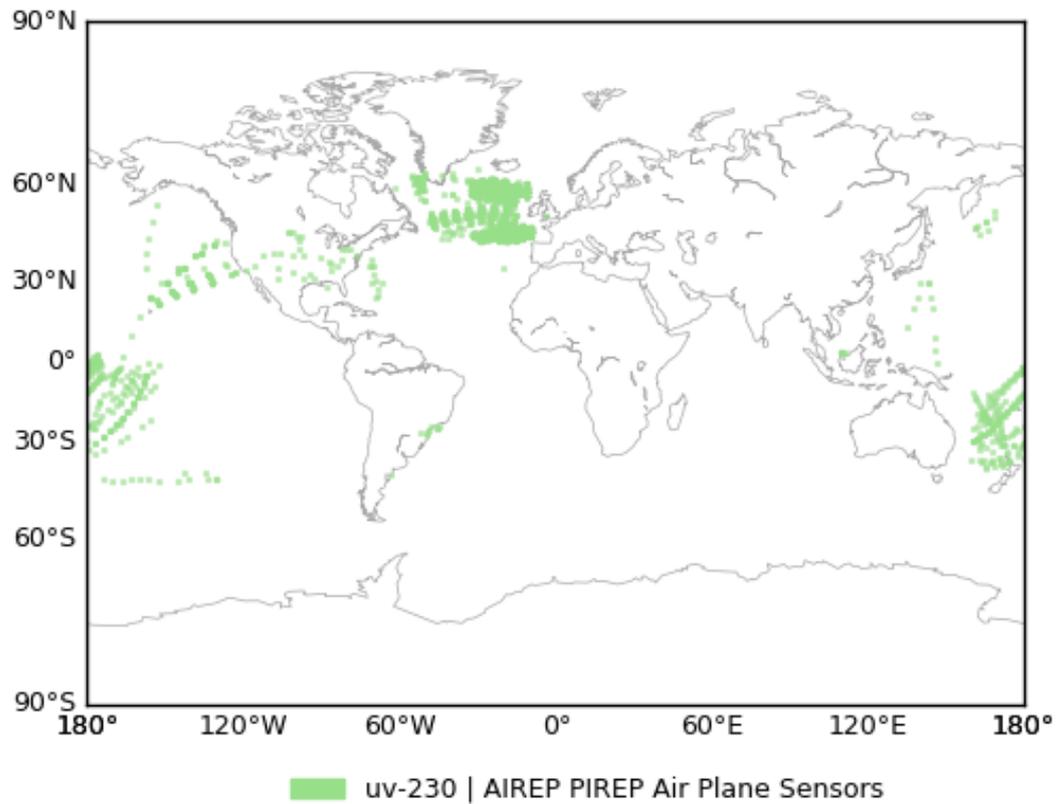
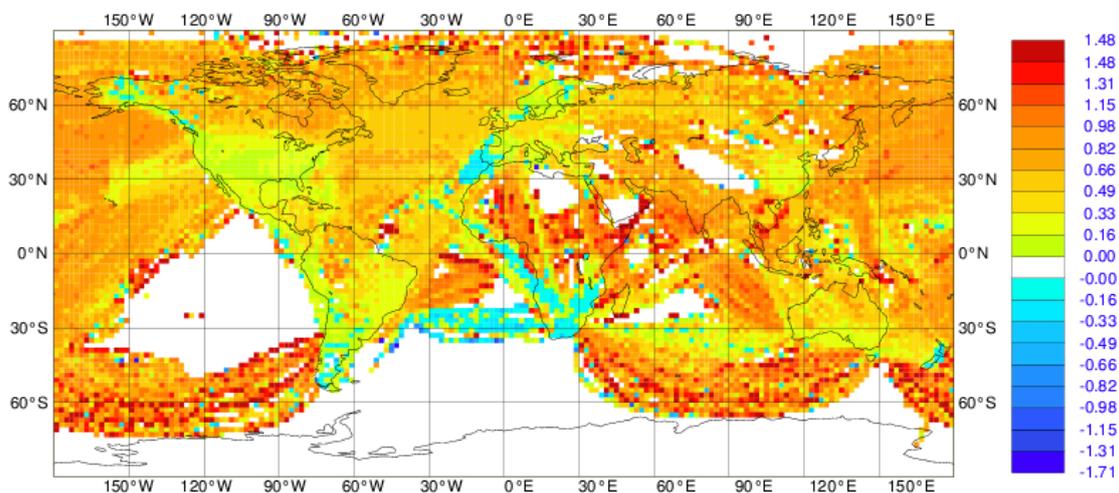


Figura 5.13 - Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.

A Figura 5.14 mostra os valores médios do OmA para diferentes regiões do globo para um período de mês e essa figura pode dar uma indicação da regiões onde os dados tem sido assimilados no ECMWF. Observa-se que embora não tão bem coberta por essa base de dados, existem uma boa base sobre a América do Sul, os quais não estão disponíveis para a assimilação nessa versão do SMG V2.1.0. Há a necessidade de aprimorar a recepção desses dados sobre a América do Sul.



TEMP FROM AMDAR
MEAN ANALYSIS DEPARTURE (OBS-AN) [K] (USED)
DATA PERIOD = 2018-04-04 21 - 2018-05-05 09
EXP = 0001, LEVEL = 0.00 - 400.00 HPA
Min: -1.549 Max: 4.596 Mean: 0.314
GRID: 2.00x 2.00



EXP = 0001, LEVEL = 400.00 - 700.00 HPA
Min: -2.499 Max: 4.651 Mean: 0.146
GRID: 2.00x 2.00

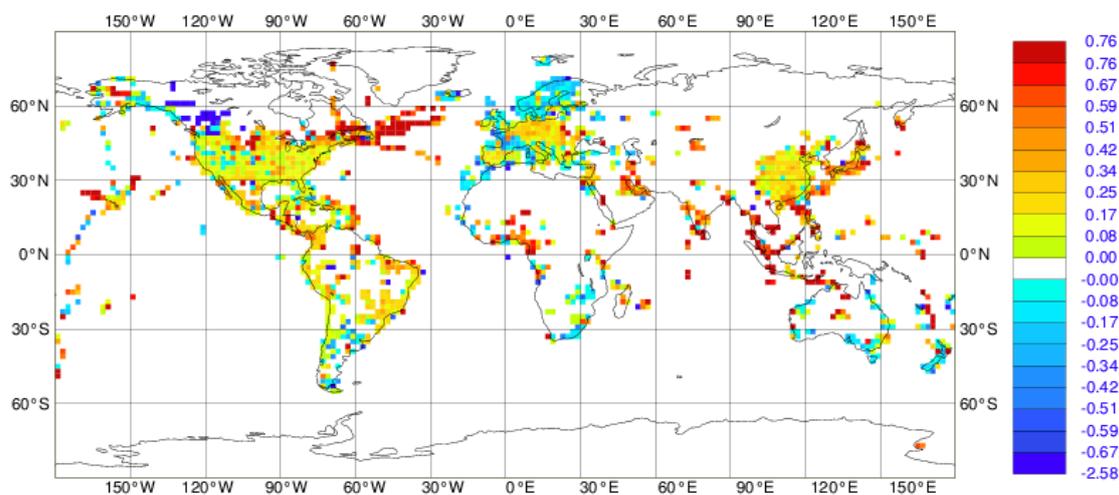


Figura 5.14 - Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões utilizados na assimilação realizada no ECMWF. As cores utilizadas sobre os pontos da posição das observações se referem aos valores médios mensais do OmA. (Fonte: site ECMWF).

5.1.3.2 Avaliação da Análise em termos do OmF e OmA

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram as series temporais dos valores médios e desvio padrão e quantidade de dados disponíveis nos experimentos V1.0.0 e V2.1.0 para

a temperatura e esses mesmos com a adição do experimento V2.0.2 para as componentes do vento, respectivamente. Os resultados mostram que os valores dessas métricas estatísticas tem uma correlação com a quantidade de dados assimilados, sendo menores nos níveis de 250 a 150, onde há uma maior concentração de dados para a assimilação. Entre os dois experimentos na temperatura observa-se resultados muito semelhantes tanto na quantidade de dados como na média do OmA com uma sutil melhora na versão V2.0.0 no desvio padrão nos níveis de 250 a 150 hPa.

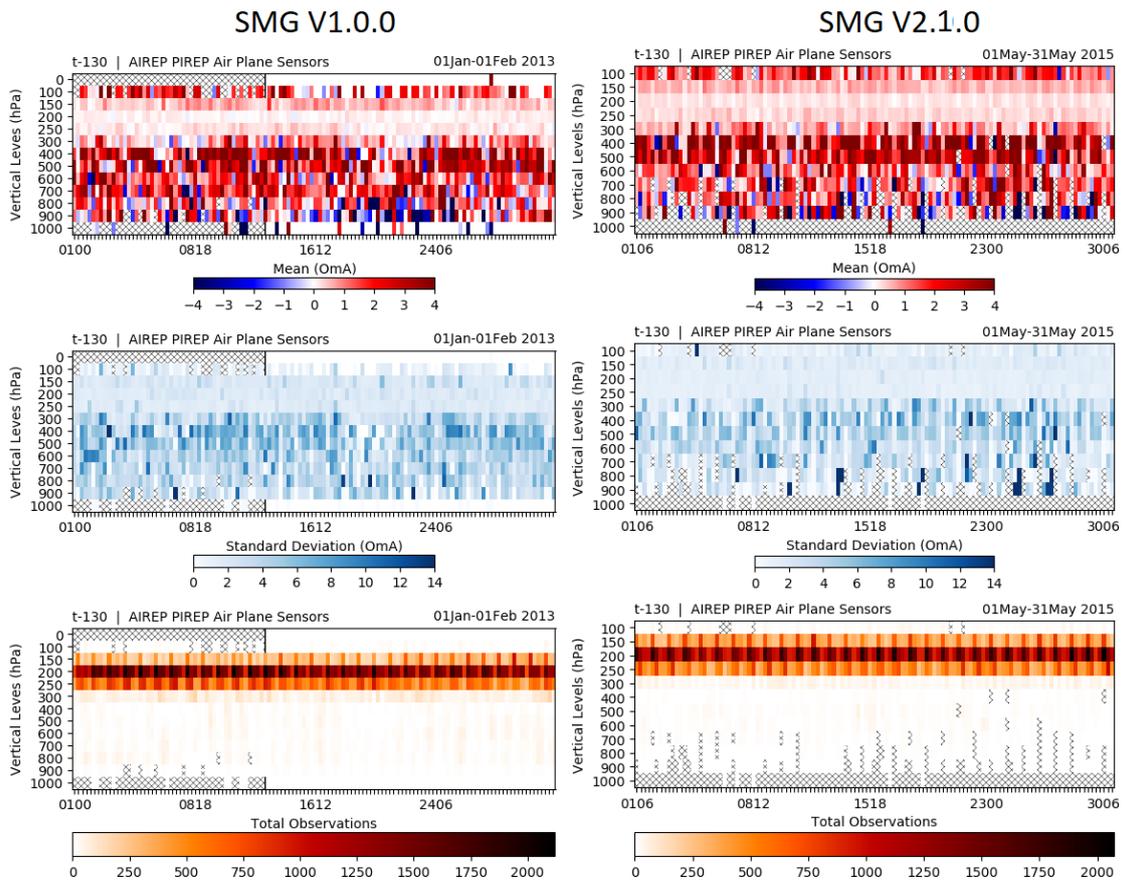


Figura 5.15 - Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.

Nos valores do OmA para as componentes do vento observa-se uma melhora significativa na versão V2.1.0 com relação as anteriores. Uma diminuição do desvio padrão, em especial nos níveis mais elevados da atmosfera. Observa-se também uma mudança na tendência do viés de valores menos elevados e de predominância negativa para positiva. Esse é um importante sinal que indica a melhora na versão a ser

operacionalizada.

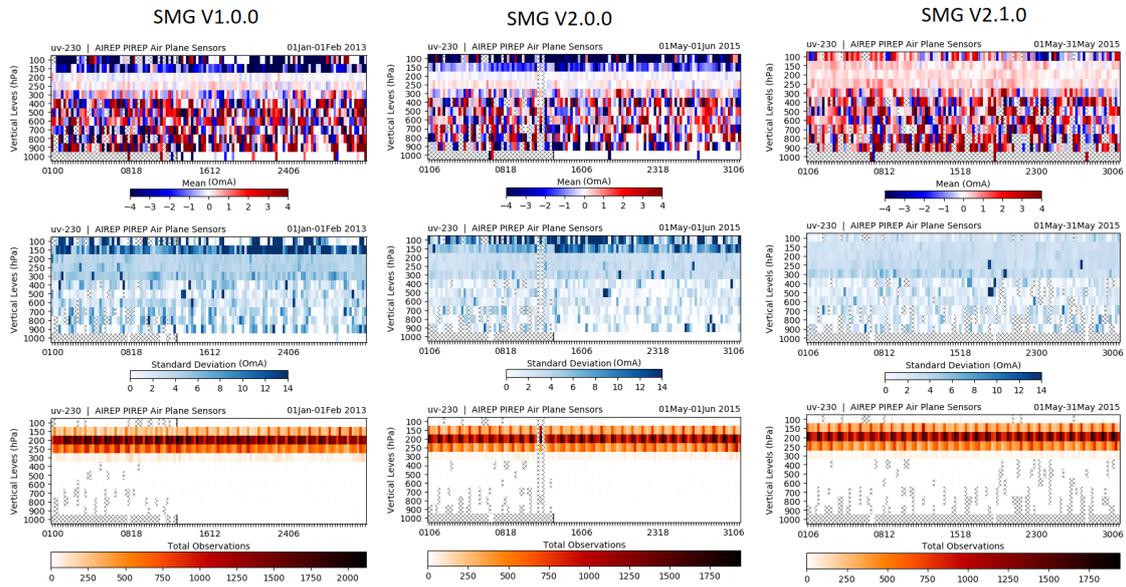


Figura 5.16 - Distribuição espacial dos dados da componentes u e v do vento provenientes de sensores em aviões disponíveis para a assimilação no GSI.

5.1.3.3 Diagnóstico dos dados rejeitados

Com relação aos dados rejeitados na Figura 5.17 são apresentados as series temporais da quantidade de observações rejeitadas em cada um dos experimentos para a temperatura (figuras da esquerda) e componentes u e v do vento (figuras da direita) sendo o perfil vertical dividido em duas parciais. A primeira de 1000 a 300 hPa (gráficos inferiores na figura) e de 300 a 100 hPa (gráficos superiores na figura). Essa divisão vertical foi feita em função da concentração dos dados apresentados no plot inferior da 5.16. Os resultados mostrados na figura abaixo evidenciam que a versão V2.1.0 nos níveis de 1000 a 300 hPa redução significativamente a quantidade de dados rejeitados, tanto para o vento quanto para os dados de temperatura. Por outro lado nos níveis entre 300 a 100 hPa a diferença não é grande e há rodados em que o número de dados rejeitados na versão V2.1.0 foi bem maior do que a versão V1.0.0 (ciclos 66 e 75). No final do período a versão V2.1.0 indica um diminuição no número de dados rejeitados enquanto que na versão V1.0.0 há uma tendência de aumento, o que pode ser considerado um bom resultado que indica uma evolução do sistema SMG.

Serie temporal do número de observações de sensores em aviões rejeitadas no GSI

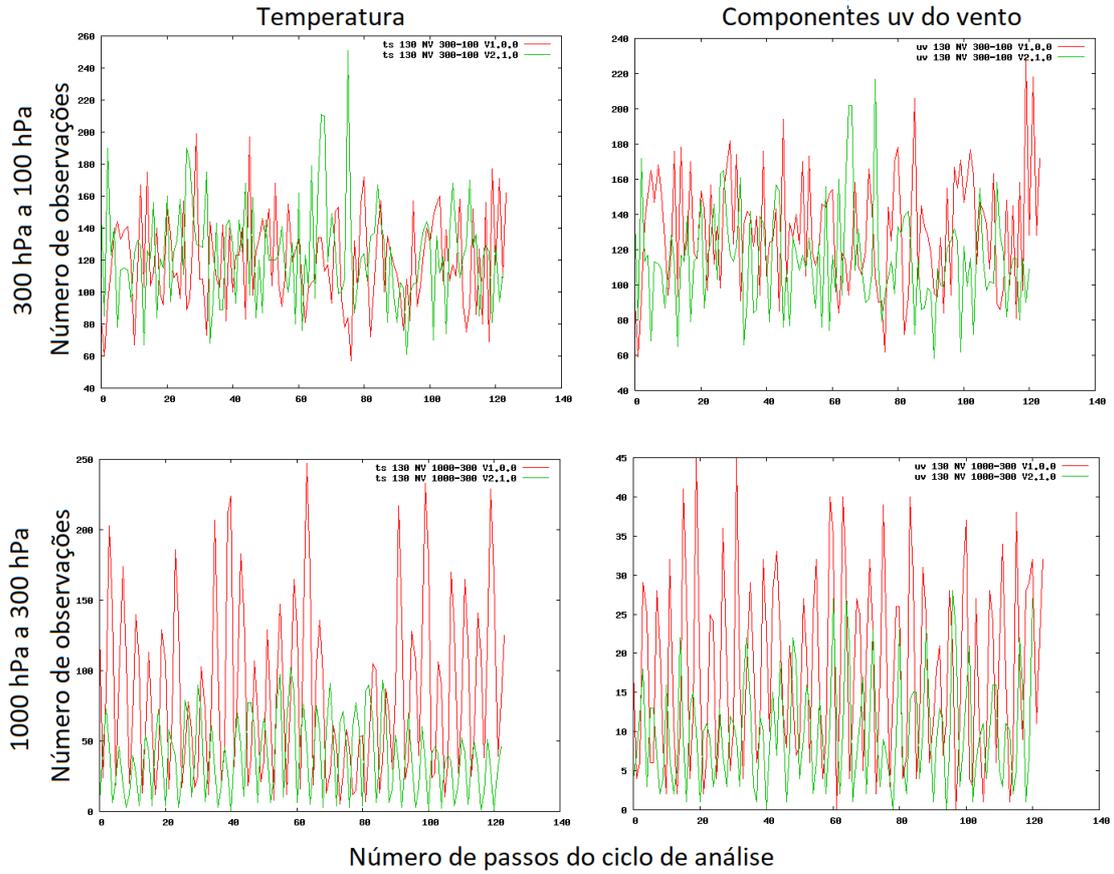


Figura 5.17 - Serie temporal dos dados de sensores em aviões que foram rejeitados no GSI. A linha em vermelho são os números de dados rejeitados no experimento V1.0.0 e a linha em verde são os dados rejeitados no experimento V2.1.0.

A Figura 5.18 abaixo mostram uma distribuição espacial típica dos dados rejeitados na assimilação no GSI durante o período do experimento V2.1.0 para a temperatura e para as componentes u e v do vento, na baixa e alta troposfera.

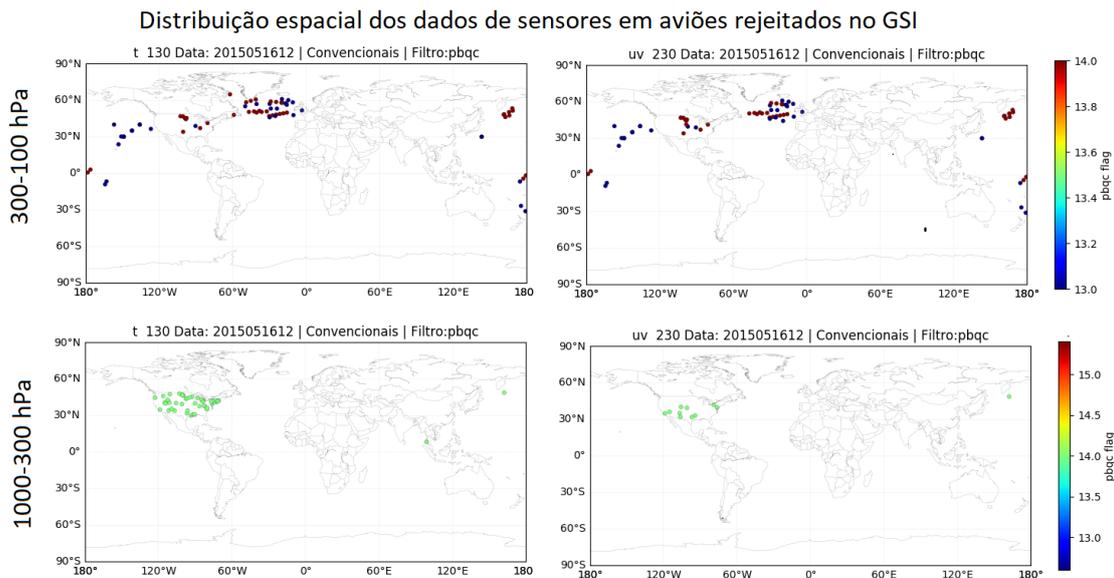


Figura 5.18 - Distribuição espacial típica dos dados de sensores em aviões rejeitados no experimento V2.0.0 para a camada 300 a 100 e 1000 a 300 para a temperatura e componentes do vento.

5.1.4 Dados de estações a superfície oceânica (Navios, boias e plataformas C-MAN)

Os dados com o mnemônico SFCSHIP no GSI se referem aos dados sobre superfície oceânica provenientes de sensores em Navios mercantes, em boias ancoradas e plataformas oceânicas. As variáveis observadas e assimiladas nesses sensores são pressão atmosférica, umidade e temperatura, bem como dados das componentes do vento (meridional e zonal). Como indicado na tabela resumo abaixo, todas essas variáveis são assimiladas no GSI. Dois são os códigos prepbuf para Pressão Temperatura e umidade (PTU) (180 e 182) e outros dois para as componentes do vento (280 e 282). A diferença entre as observações entre os códigos 180 e 182 (280 e 282) para as medidas de PTU (para as observações do vento) é que nas primeiras os valores de pressão são medidos diretamente no barômetro, enquanto que na segunda (182 e 282) os valores de pressão são recuperados dos valores de altitude medidos nos altímetros, sendo portanto medidas indiretas. Quando por algum motivo esses dados não podem ser recuperados dos altímetros as observações são codificadas com o código 183 (284 e 287 para as observações de vento), sendo nesse caso apenas monitoradas no GSI e, portanto, não são assimiladas.

5.1.4.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados

A Figura 5.19 mostra a distribuição espacial dos dados de pressão classificados como SFCSHP no GSI nos diferentes horários sinóticos para o dia 9 de maio de 2015, representando uma distribuição típica observada regularmente. Nessa figura observa-se que os dados de pressão são mais densos nas regiões de maior circulação de mercadorias via transporte marítimo, tais como a costa litorânea da América do Norte e Europa, portanto no Hemisfério norte. No hemisfério sul observa-se mais concentração na região onde há maior fluxo de navios mercantes. Entre os diferentes horários sinóticos não se observa nenhuma diferença que mereça destaque. Com relação aos dados de pressão recuperados de altímetros (código 182) observa-se que a ocorrência é muito esporádica no tempo e no espaço, observando apenas as 00 e 12 UTC em alguns pontos isolados da costa dos EUA.

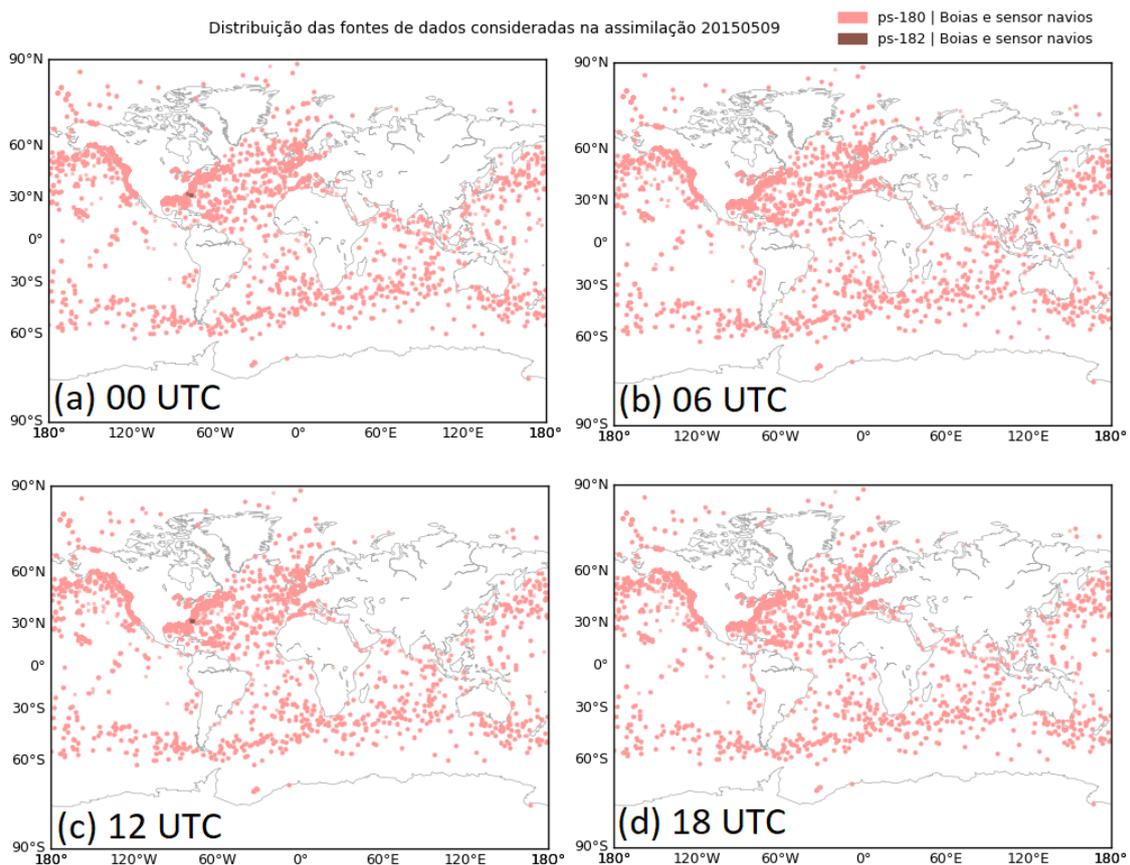


Figura 5.19 - Distribuição espacial dos dados de pressão assimilados provenientes de estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) nos diferentes horários sinóticos para o dia 09/05/2015.

A Figura 5.20 mostra a distribuição espacial das demais variáveis atmosféricas assimiladas no GSI com o mnemônico SFCSHF para o dia 9 de maio de 2015 às 12 UTC. OS dados de pressão para esse horário e dia são repetidos nessa figura para permitir a comparação da distribuição espacial com as demais variáveis. Observa-se que a quantidade de dados dessas outras variáveis modifica de forma significativa com grande diminuição na quantidade de dados assimilados. Os padrões de concentração observados na pressão são ainda observados mas a quantidade de dados é diminuída em especial em alto mar, ficando mais concentrada em regiões mais próximas dos continentes. Algo que se pode enfatizar é a ausência de dados no hemisfério sul com a quantidade de dados reduzida drasticamente nas rotas comerciais nessa região. OS dados de vento para o código 282 (valores de pressão recuperados das medidas de altímetro) são observados em boias oceânicas na região tropical do Pacífico.

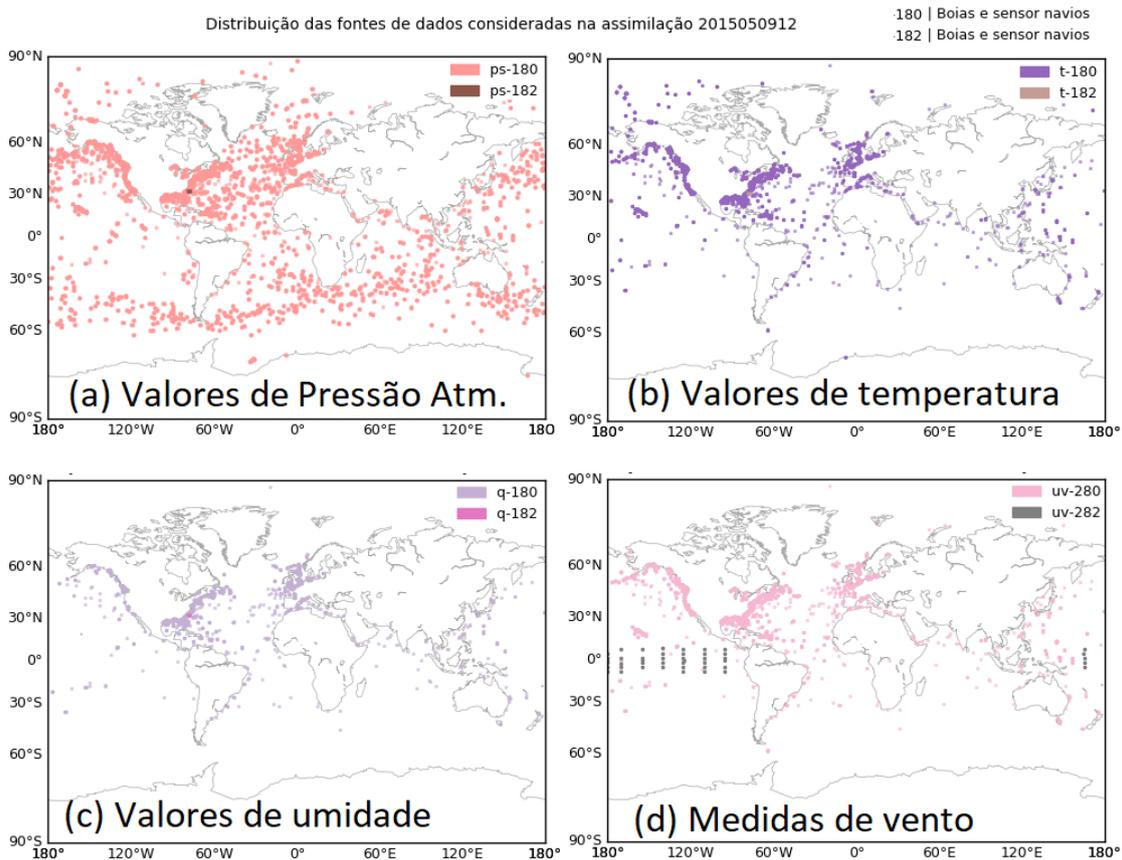


Figura 5.20 - Distribuição espacial dos dados de pressão, temperatura, umidade e vento coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) e assimilados às 12 UTC do dia 09/05/2015.

A Figura 5.21 mostra a relação dos dados de boias e de sensores em navios onde dados de pressão não foram registrados, os quais recebem o código 183 para PTU e 284 e 287 para dados de vento. Nessa figura é apresentada a esquerda os dados de temperatura (que tem uma distribuição semelhante para a pressão e umidade) e a direita os dados de vento. Como o mesmo código é utilizado para as estações de superfície continental, observa-se que a figura da direita tem a mesma distribuição dos dados apresentados na Figura 5.5. O que merece destaque nessa figura são os pontos em regiões oceânica que se referem a boias e sensores em navios, que como pode ser observado são inexpressivos.

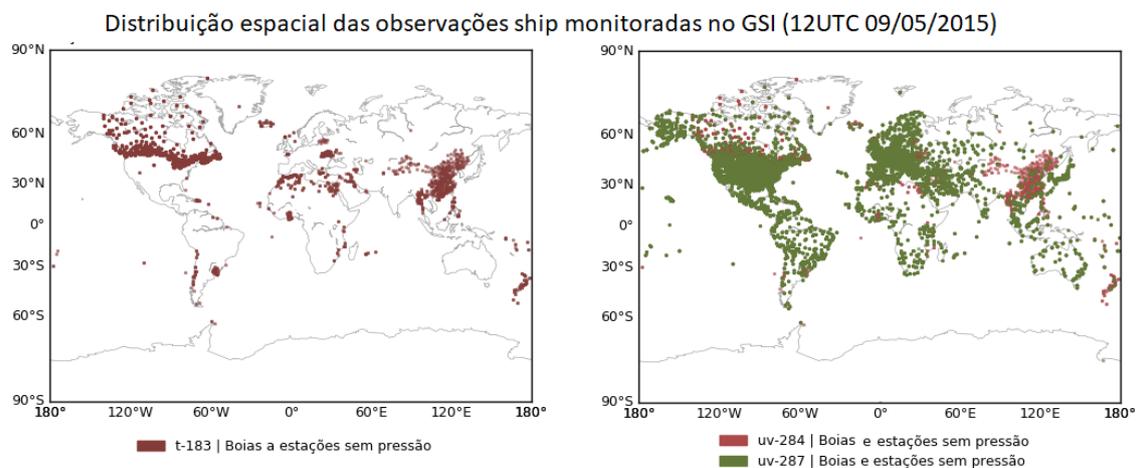


Figura 5.21 - Distribuição espacial dos dados monitorados (devido a ausência de dados de pressão) de temperatura (esquerda) e vento (direita) coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) para as 12 UTC do dia 09/05/2015.

A Figura 5.22 mostra a distribuição espacial dos dados assimilados no ECMWF e a mesma evidência que em termos gerais a versão SMG V2.1.0 apresenta um padrão de assimilação dos dados semelhante ao observado nesse centro. Uma análise mais detalhada para ser realizada no futura para que se possa comparar adequadamente essas duas figuras. O uso do Obstat no CPTEC poderá ajudar nesse processo.

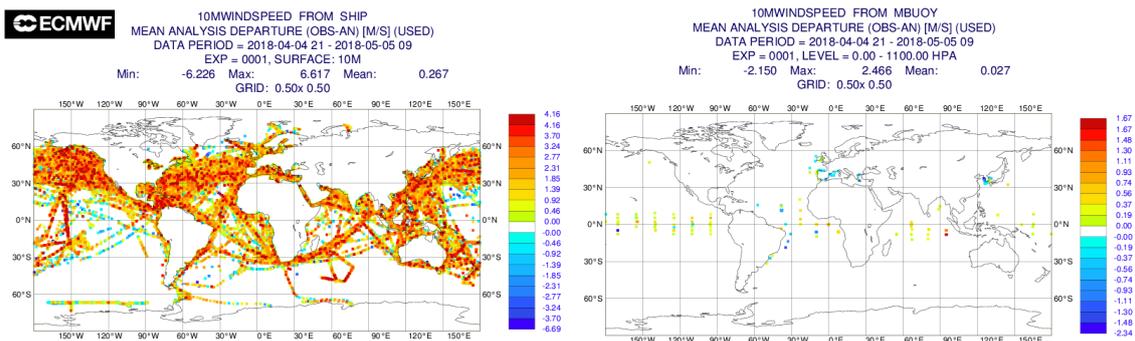


Figura 5.22 - Distribuição espacial dos dados provenientes de navios (figura da esquerda) e de boias (a direita) utilizados na assimilação no ECMWF. A cor dos pontos plotados no mapa se referem aos valores do OmA nos pontos onde os dados foram assimilados. (Fonte: site ECMWF).

5.1.4.2 Avaliação da Análise em termos do OmA

A Figura 5.23 mostra a serie temporal do valor médio no globo do OmA para os experimentos SMG V1.0.0 e para o SMG V2.1.0 para os dados de pressão do tipo SFCSHIP, bem como o desvio padrão e a quantidade de dados utilizados em função do tempo, para os diferentes níveis em que as observações forma assimiladas. Essa figura permite verificar em quais níveis os dados de SFCSHIP são assimilado e revela que embora a maior quantidade é no primeiro nível, como era de se esperar pois a maioria dos dados estão sobre regiões oceânicas, existem também uma grande quantidade de dados nos níveis de 900, 800 e outros também em 700, 600 e até 500 hPa. Esses dados são provenientes de lagos em regiões continentais. Os resultados comparativos entre os experimentos permitem verificar que as versões mais nova com maior resolução houve uma diminuição no OmA médio com menor desvio padrão em especial no nível de 900 hPa. Observa-se que para essa variável não houve modificação nos resultados entre as versões SMG V2.0.0 e SMG V2.1.0.

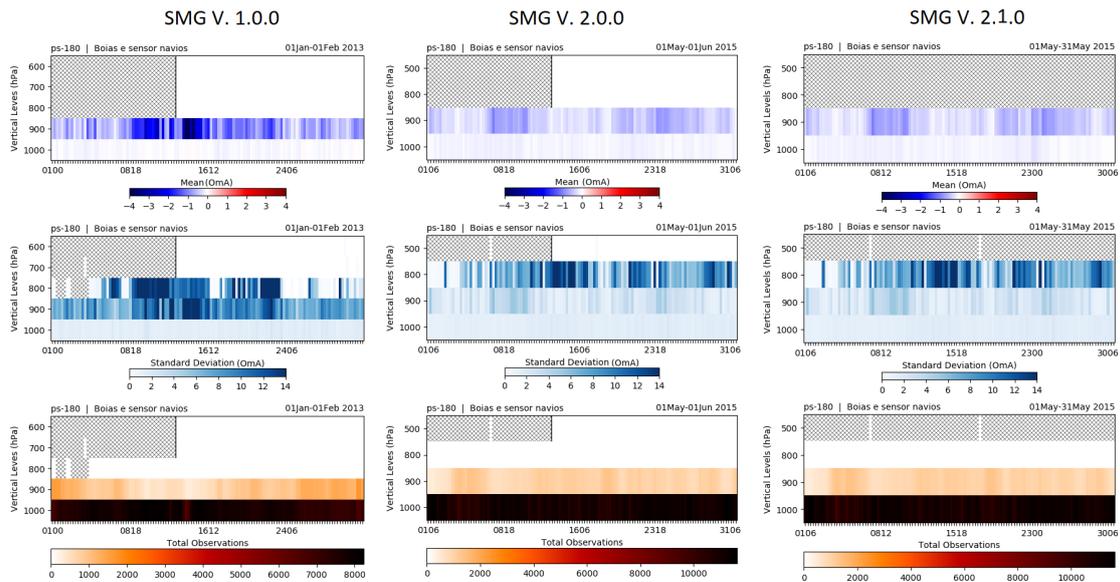


Figura 5.23 - Serie temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de pressão atmosférica coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda, SMG V2.0.0 ao centro e SMG V2.1.0 a direita.

A Figura 5.24 mostra o mesmo que a figura anterior para os dados de vento do tipo SFCSHV usado no GSI. Essa figura indica que, assim como na pressão, os dados de vento mostraram uma diminuição no OmA médio na versão 2.0.0 em comparação com a versão anterior avaliada, embora o valor da desvio padrão não tenha mostrado alteração ficando semelhante ao mostrado no experimento anterior. Com relação a versão V2.1.0 em relação a versão V2.0.0 observa-se que o viés se intensifica modificando de sinal, passando de negativo para positivo em especial no nível de 1000. Esse resultados é algo que merece atenção e deve ser monitorado por um período maior.

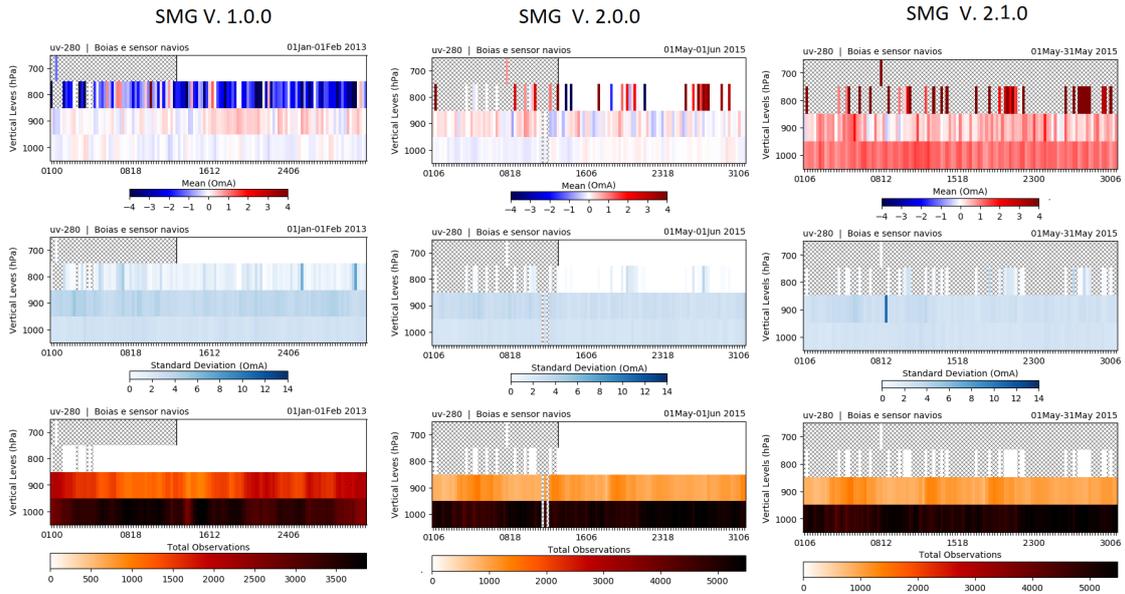


Figura 5.24 - Serie temporal do OmA médio global para cada nível de pressão onde as observações de vento coletados em estações oceânicas (boias, navios e plataformas C-MAN) foram assimiladas na versão do SMG V1.0.0 a esquerda e SMG V2.0.0 a direita.

5.1.4.3 Diagnóstico dos dados rejeitados

A Figura 5.25 evidencia uma informação importante que é a quantidade de dados rejeitados em cada uma das rodadas dos períodos avaliados nesse trabalho e indica que houve uma modificação drástica no padrão de rejeição dos dados do tipo SFC SHP no GSI. Essa figura mostra a serie temporal da quantidade de dados rejeitados para as diferentes variáveis avaliadas e pode-se observar que os dados de pressão essa diminuição na rejeição é muito menor que nas outras variáveis com diferenças menores do que 10 observações. Na umidade a diminuição é maior sendo na casa da centena, com maior diferença no início do período e principalmente no final do mesmo com uma tendência de crescimento no experimento V1.0.0 e uma estabilidade para valores menores do que 20 no experimento V2.1.0. O mesmo padrão é observado nos dados de temperatura, mas com valores acima de 350 para o SMG V1.0.0 no final do período. Com relação aos dados de vento o número de observações rejeitadas na versão V2.1.0 é maior que as demais variáveis, mas é bem menor do que na versão V1.0.0, sendo praticamente a metade dessa.

Serie temporal do número de observações rejeitadas

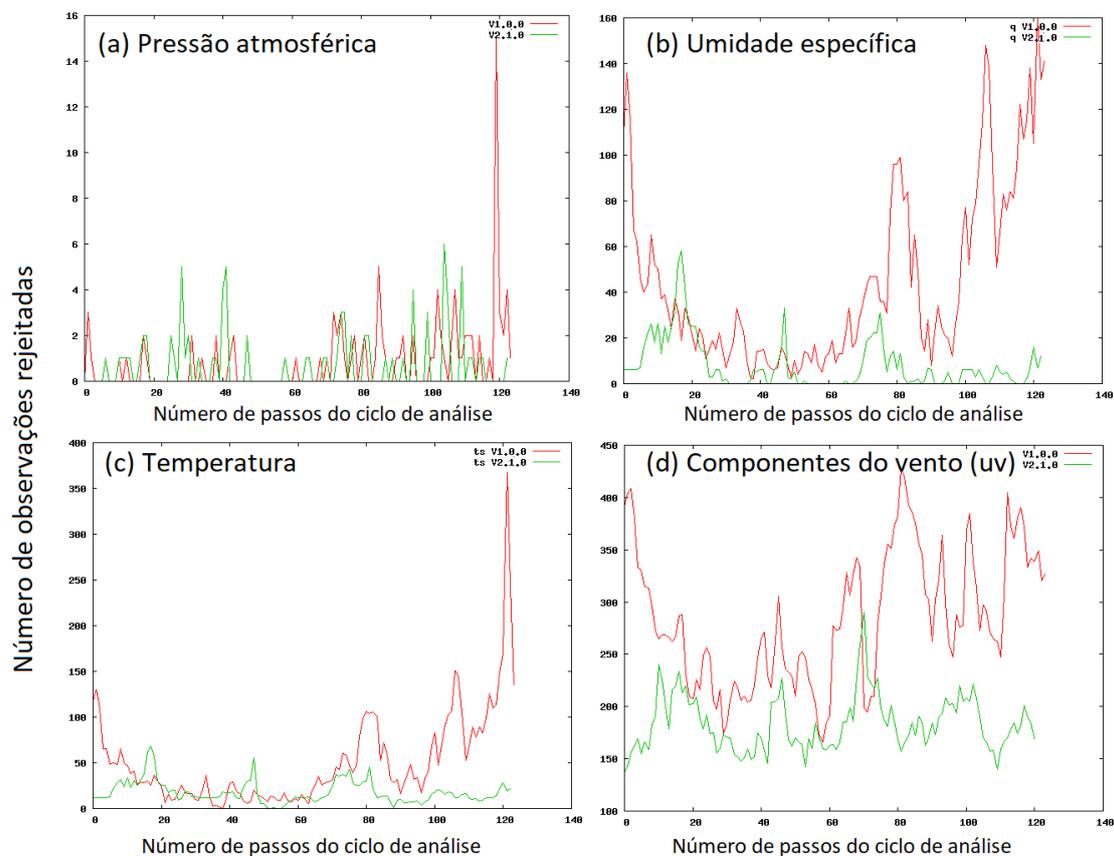


Figura 5.25 - Serie temporal da quantidade de dados SFCSHP rejeitados no GSI para o experimento da versão SMG V1.0.0 (em vermelho) e para o experimento da versão SMG V2.0.0 (em verde).

5.1.5 Dados de perfiladores acústicos de vento (SODAR)

Como as demais fontes além dos dados classificados como estações a superfície (ADPSFC), sensores em aviões (AIRCAR), em boias e navios (SFCSHP) e radiossondas (ADPUPA) são das mais variadas fontes, não são em grande quantidade e nem tem cobertura global, a fim de simplificação no momento, elas são tratadas em conjunto nessa seção. Os dados que compõem essa relação são listados abaixo:

- **PROFLR**: Dados de sensores de medidas de vento à superfície de perfiladores acústicos de vento (SODAR), bem como perfis de vento de boletins reportados por pilotos de aeronaves;
- **RASSDA**: Dados coletados por sensores rádio acústicos - perfil de tem-

peratura virtual (RAAS);

- **VADWND**: Dados de vento VAD (NEXRAD) obtidos por processamento de dados de radar;
- **GPSIPW**: Dados de conteúdo total integrado de vapor d'água na coluna atmosférica obtidos por receptores GNSS em superfície;
- **ASCATW**: Dados de vento a superfície oceânica recuperados de asterômetros em satélites.

5.1.5.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados

Os dados efetivamente colocados no GSI para serem assimilados até o momento são os dados de vento provenientes de perfiladores da rede NOAA (PROFLR), dados recuperados de observações de radar (VADWND) e de boletins reportados por pilotos, bem como os dados de vento sobre a superfície oceânica. A distribuição espacial dos dados de vento dos perfiladores são mostrados na Figura 5.26 e os dados de vento sobre a superfície oceânica são mostrados na Figura 5.27.

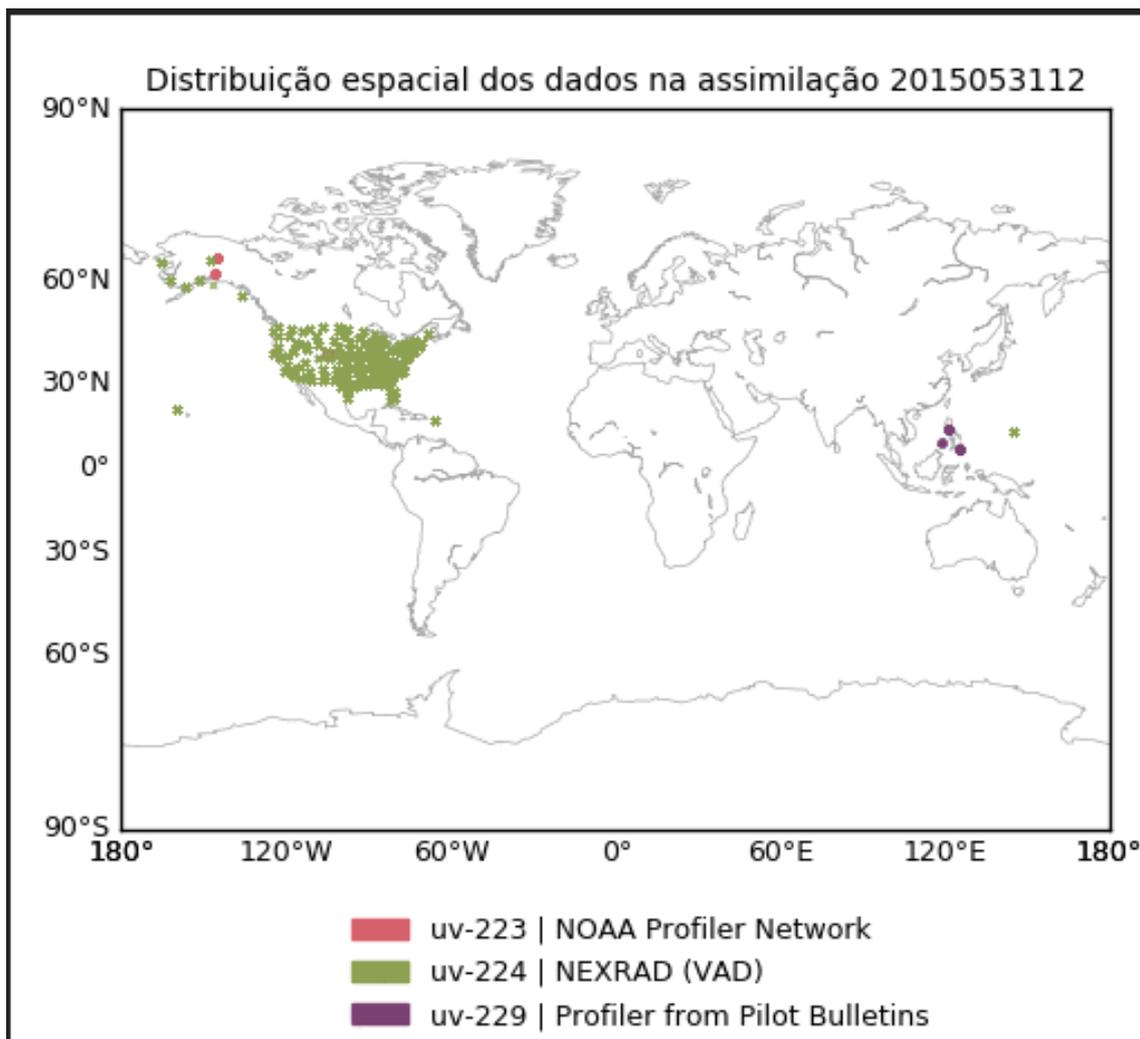


Figura 5.26 - Distribuição espacial dos dados das componentes do vento provenientes de perfiladores da rede NOAA, dados recuperados de observações de radar e de boletins reportados por pilotos.

Observa-se que os dados de vento de radares disponíveis para a assimilação no GSI se concentram sobre os EUA e possui uma boa uniformidade espacial e temporal, com dados disponíveis em todos os horários e durante todos os dias do período avaliado. Os dados da rede de perfiladores da NOAA restringe-se a apenas três pontos sobre o Alasca. Já os dados de perfiladores de vento de boletins reportados por pilotos estão presentes sobre algumas poucas localidades da Indonésia, embora sejam frequentes em todo o período avaliado, os pontos são fixos.

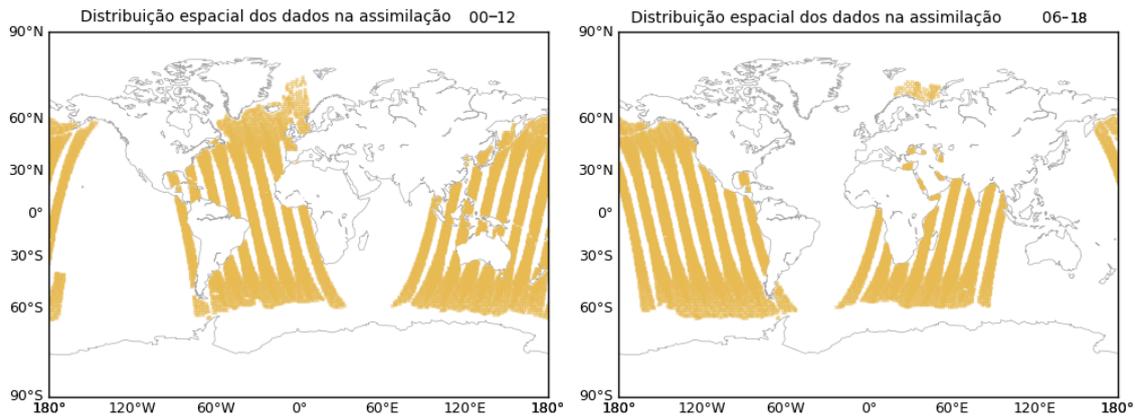


Figura 5.27 - Distribuição espacial dos dados de vento a superfície oceânica obtidos por escaterômetro embarcados em satélites e disponíveis para a assimilação no GSI.

Os dados de vento sobre a superfície oceânica provenientes de escaterômetro estão disponíveis para a assimilados no GSI com boa cobertura espacial sobre os oceanos, e apresenta uma repetição nos horários sinóticos entre as 00 e 12 UTC com cobertura sobre o Atlântico e a parte do pacífico próximo da Austrália, enquanto que nos horários das 06 e 18 UTC a cobertura é no oceano indico e a parcela do Pacífico próximo das Américas. A Figura 5.27 evidencia essa característica da cobertura dos dados de escaterômetro.

Com relação aos dados monitorados no GSI, que no caso da versão em avaliação, são os de IPW dos receptores GNSS, os dados de perfiladores de vento da *Japan Meteorological Agency* (JMA) e os Dados coletados por sensores rádio acústicos - perfil de temperatura virtual (RAAS). As Figuras 5.28 e 5.29 abaixo mostra que no período avaliado na versão V2.1.0 do SMG foram registrados dados de IPW de receptores GNSS e dados de temperatura virtual (RAAS) que se concentram sobre a América do Norte, enquanto que dados de vento dos perfiladores da JMA (figura não mostrada) não foram disponibilizados.

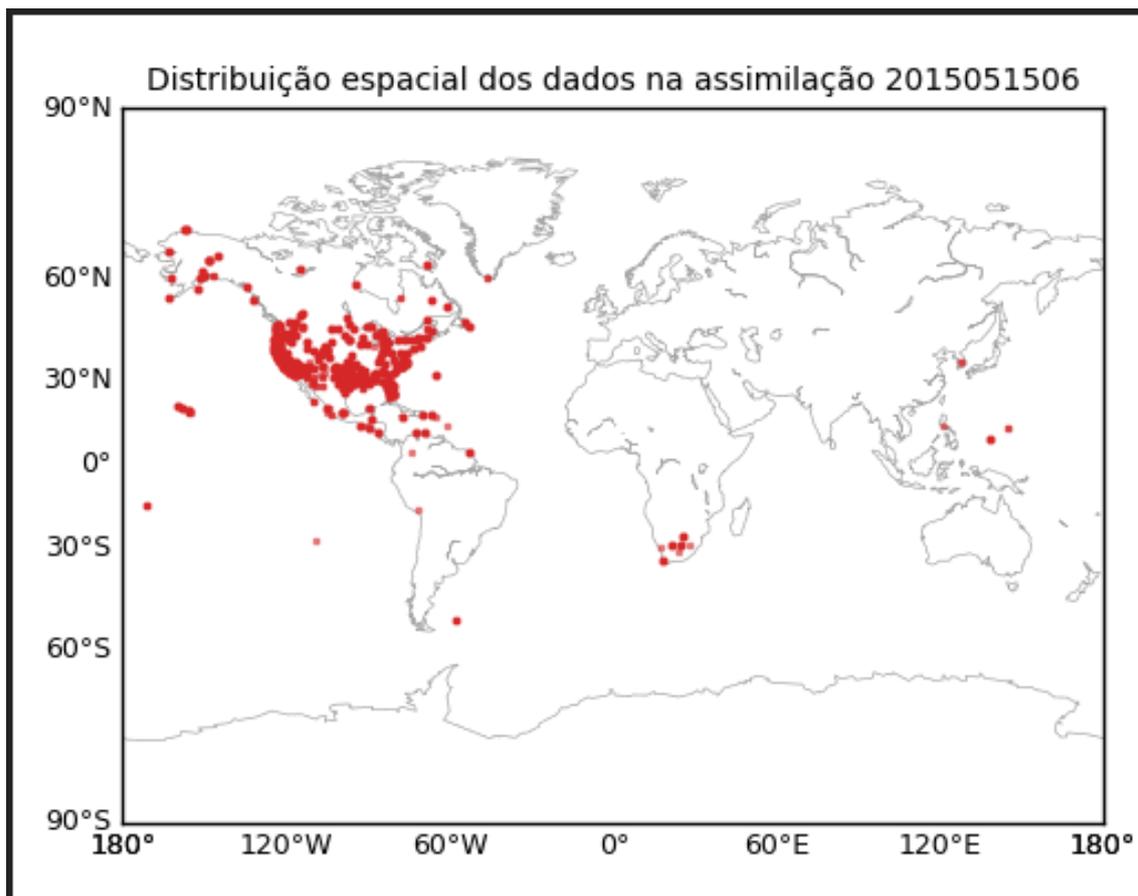


Figura 5.28 - Distribuição espacial dos dados de *Integrated Precipitable Water* (IPW) de receptores GPS disponíveis para a assimilação mas monitorados pelo GSI. Observa-se que há dados disponíveis nesse período que se concentram sobre a América do Norte.

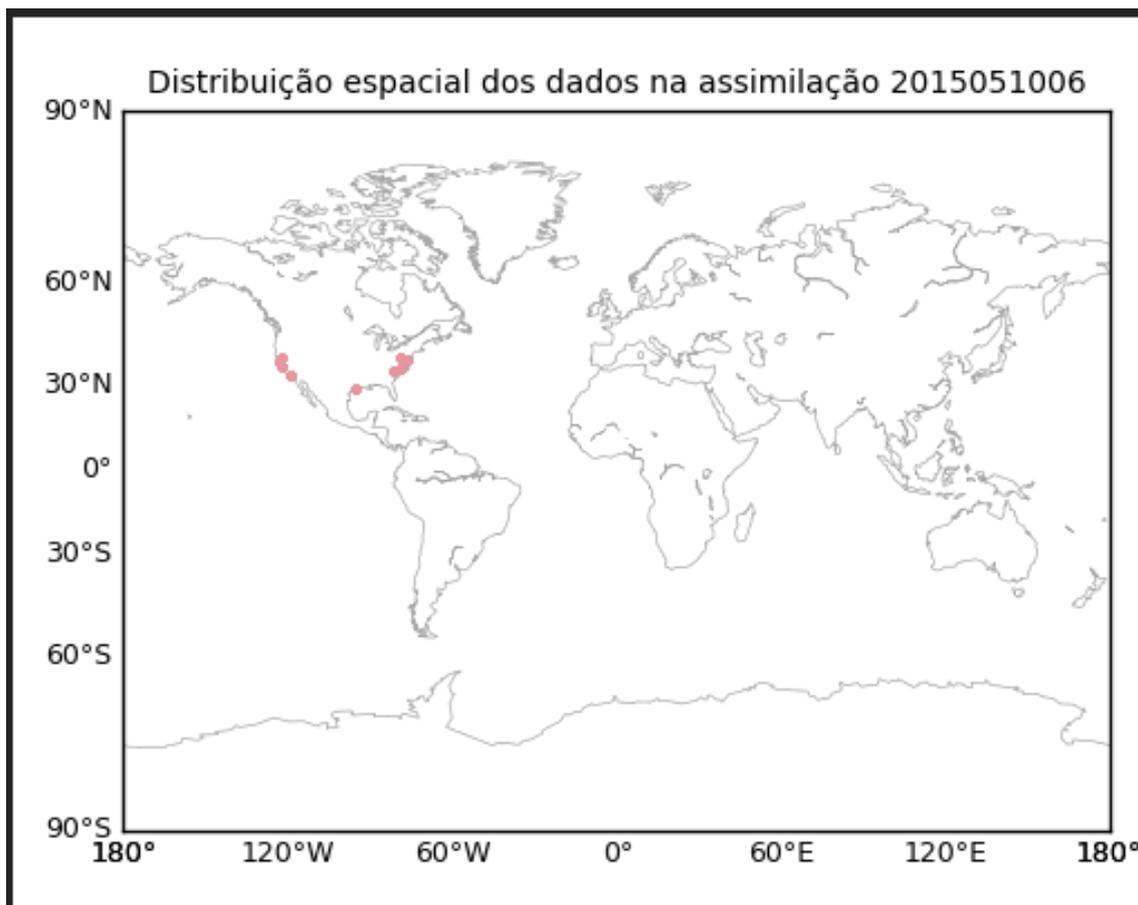


Figura 5.29 - Distribuição espacial dos dados coletados por sensores rádio acústicos - perfil de temperatura virtual (RAAS) disponíveis para a assimilação mas monitorados pelo GSI. Observa-se que os dados disponíveis nesse período que se concentram sobre a América do Norte.

A análise em termos do OmF e OmA desses tipos de dados, bem como a relação dos dados monitorados e os rejeitados será feita em um momento oportuno nos próximos relatórios.

5.2 Inclusão dos Dados de vento estimados a partir de satélites

Esta seção trata do processamento dos dados referentes ao vento em diferentes níveis da troposfera estimado a partir de satélites geostacionários e de órbita polar.

Os dados do tipo SATWND consistem na direção e velocidade do vento obtida por meio do rastreamento do movimento de nuvens observadas por imageadores passivos a bordo de satélites. Em geral esses satélites são de órbita geostacionária, posicionados em torno do Equador ao redor do globo. Essa posição no espaço limita

a estimativa de ventos à latitudes menores que 60. Satélites de órbita polar são utilizados para a estimativa do vento sobre as regiões polares pois a sobreposição de passagens sucessivas permite observar uma mesma área em um intervalo de tempo curto o suficiente (< 1 hora) que permite rastrear o deslocamento das nuvens.

A técnica utilizada para obter essas observações recebe vários nomes, sendo *Atmospheric Motion Vectors* (AMV) e *Cloud Drift Winds* (CDW) os mais comuns. A técnica se baseia em reconhecer padrões de movimento das nuvens utilizando um procedimento objetivo de rastreamento em uma sequência temporal de imagens, obtidas por meio de canais que operem nas bandas do infravermelho janela, vapor d'água e visível de sensores a bordo de satélites.

Diversos centros geram AMVs operacionalmente. Os arquivos PrepBUFR apresentam AMV gerados pelo *National Environmental Satellite, Data, and Information Service* (NESDIS), *Japanese Meteorological Agency* (JMA) e *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). O NESDIS gera essas observações para os satélites do programa *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES). O JMA gera essas observações para os satélites dos programas *Geostationary Meteorological Satellite* (GMS) e seu sucessor *Multi-functional Transport Satellite* (MTSAT). Essas observações - caso as mesmas estejam disponíveis nos arquivos PrepBUFR, podem ser assimiladas, não havendo distinção entre os satélites dos diferentes programas durante o processo assimilação, apenas pequenas modificações nas incertezas que estão associadas com a qualidade da observação.

A Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA-CPTEC/INPE) mantém operacionalmente um conjunto de modelos de estimativa do vento desde o início dos anos 2000. O vento é, atualmente, estimado a partir de três imagens sucessivas dos canais visível, 3.9, 6.2 e 10.8 μm do satélite GOES-16. Nessa nova geração de satélites GOES, a área coberta pelos campos de vento foi ampliada pois uma nova imagem *full disk* é recebida a cada 15 minutos. Com o aumento da resolução temporal (de 30 para 15 minutos) e espacial (de 4 x 4 km para 2 x 2 km) a densidade de AMVs é superior em relação aos campos estimados a partir de imagens do satélite GOES-13.

O vento estimado a partir de satélites pode ser dividido em dois grandes grupos: a) aqueles estimados a partir do movimento horizontal de nuvens em uma sequência de imagens sucessivas; b) aqueles estimados explorando as variações da radiância das superfícies aquáticas devido à sua rugosidade, que varia de acordo com a intensidade do vento.

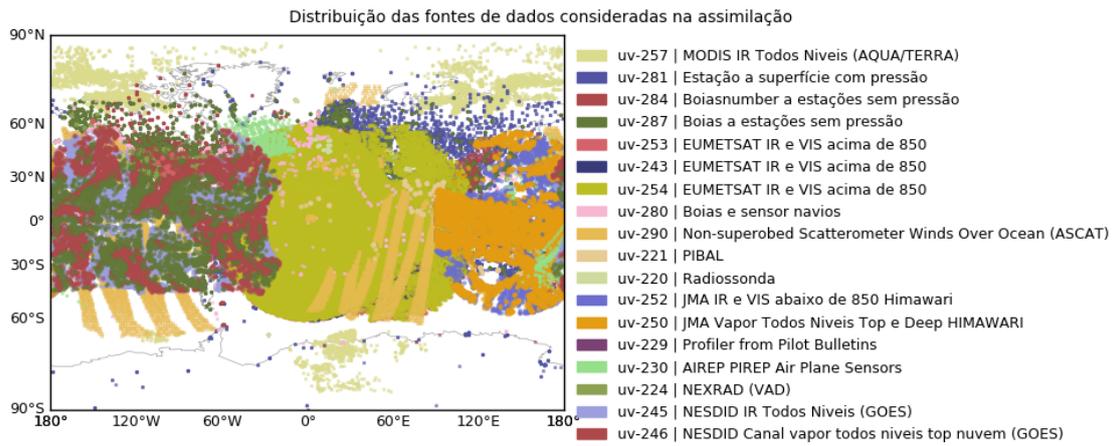


Figura 5.30 - Distribuição espacial de todos os tipos de dados de vento utilizados na assimilação com o GSI, 06:00 UTC.

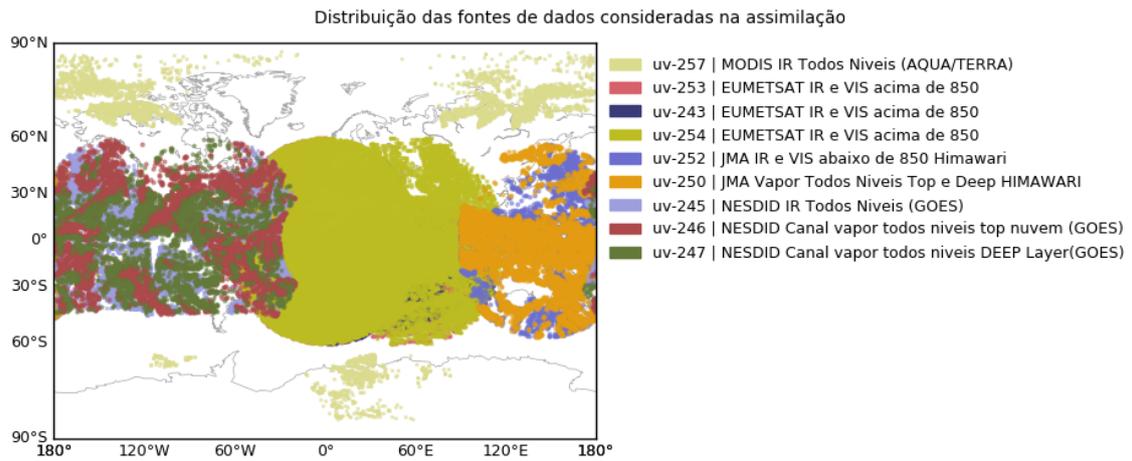


Figura 5.31 - Distribuição espacial típica de todos os tipos de dados referentes a vento estimado a partir do rastreamento de nuvens (AMVs) 06:00 UTC.

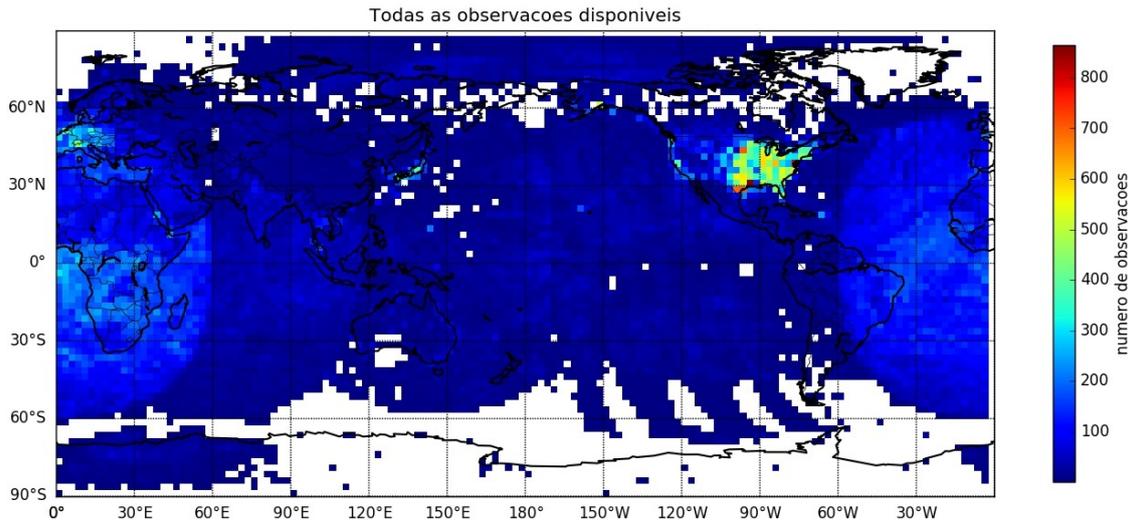


Figura 5.32 - Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus

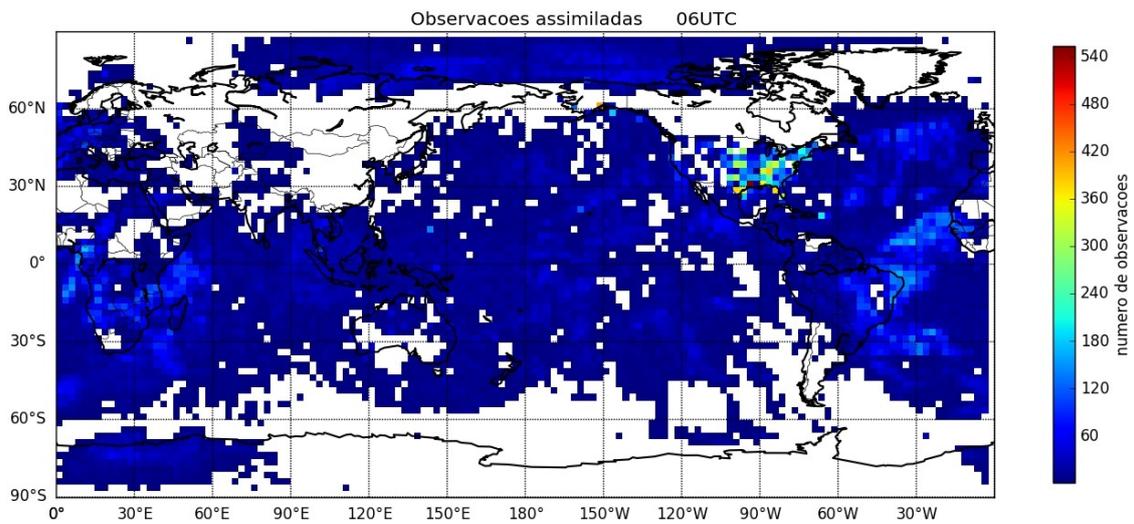


Figura 5.33 - Distribuição espacial de todas as observações de vento assimiladas. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus.

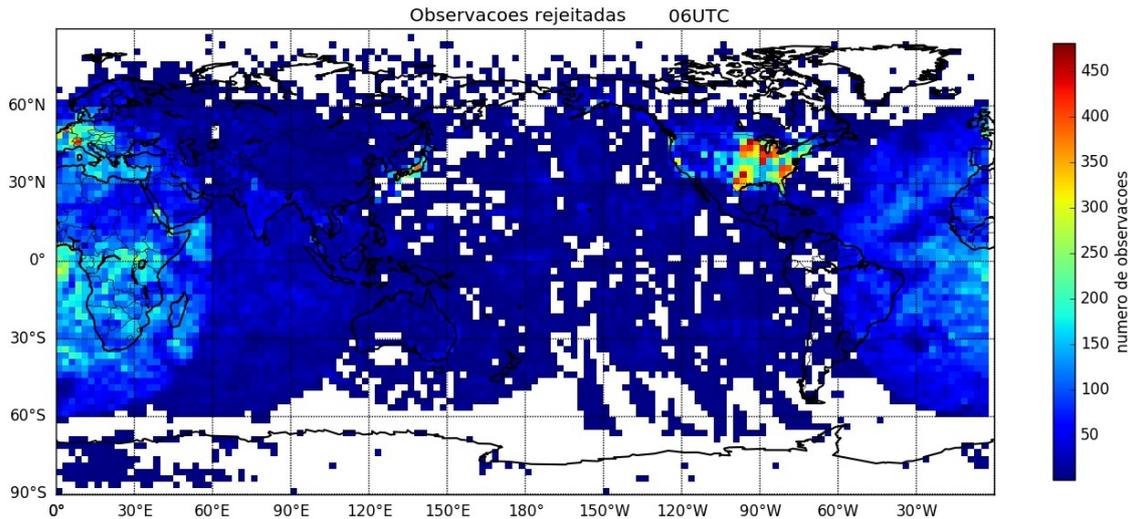


Figura 5.34 - Distribuição espacial de todas as observações de vento rejeitadas. Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus.

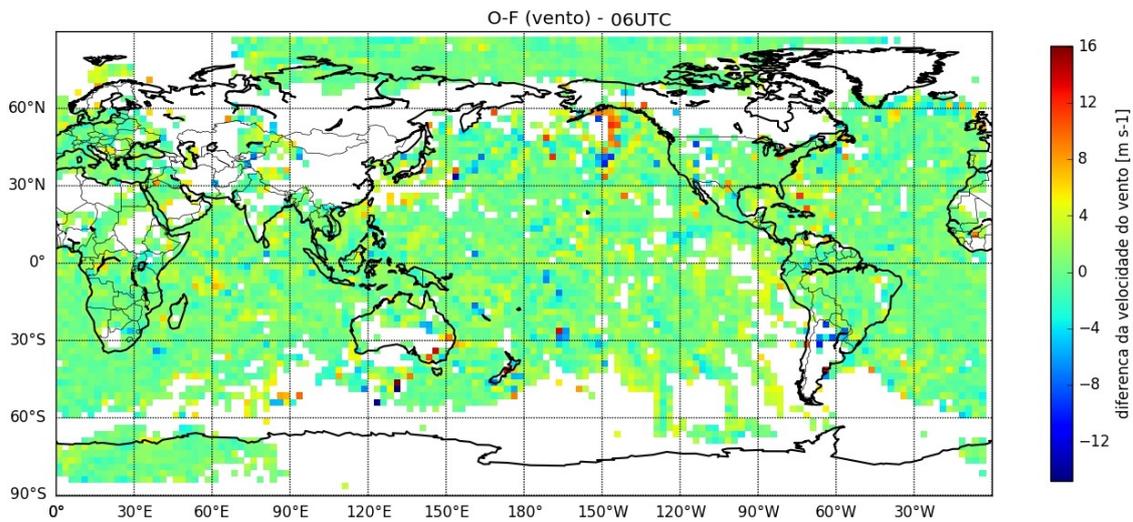


Figura 5.35 - Distribuição espacial da diferença entre a velocidade do vento assimilado e o *background*. Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus.

Foi verificado que o conjunto de dados “satwnd” contém dados de vento obtidos por outros métodos de inferência, como VAD, bóias oceânicas, medidas realizadas a partir de aviões, etc, além do vento obtido a partir do rastreamento de nuvens. A Figura 5.32 mostra a distribuição espacial de todos os tipos de observações disponíveis para o ciclo de assimilação das 06:00 UTC de 01 de maio de 2015. É interessante

classificar os AMVs de acordo com o satélite utilizado para sua estimativa e o centro gerador, como pode ser visto na Figura 5.31.

Nas Figuras 5.32, 5.34 e 5.33 observa-se que os dados de vento estimados sobre as regiões polares são pouco utilizados. Os dados de vento estimados a partir do satélites Meteosat, pelo algoritmo da EUMETSAT, foram os dados do tipo AMV utilizados em maior número. Os máximos de número de observação localizados sobre os EUA se devem aos perfis verticais de vento estimados a partir de radares (VAD).

Nos próximos passos da evolução do SMG, em relação à avaliação dos dados de vento de satélites, pretende-se investigar a contribuição dos dados de vento e o desempenho desse sistema de observação no processo de assimilação. Análises dos parâmetros OmF e OmA serão realizadas visando identificar os motivos da grande rejeição dos dados e identificar deficiências do modelo em representar os fluxos atmosféricos observados pelos satélites.

5.3 Inclusão dos Dados Radio ocultação GNSS

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) é um sistema que integra os principais sistemas de posicionamento por satélite, como o *Global Positioning System* (GPS) americano, o *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) russo, o GALILEO, sistema da União Européia e o Chinês denominado COMPASS. Esses sistemas são compostos por constelações de satélites, dispostos de modo que um receptor obtenha sinais de pelo menos quatro satélites simultaneamente e, através das medidas das distâncias entre o receptor e os quatro satélites, permitem determinar de maneira precisa a posição do mesmo em tempo real. A Rádio Ocultação do sinal GNSS (ROGNSS) está relacionada com dois satélites ocultos pela Terra; no caso, um satélite GNSS que emite o sinal, e um satélite de órbita baixa, denominado *Low Earth Orbits* (LEO), que recebe o sinal através de um receptor a bordo. Essa comunicação sofre os efeitos da troposfera terrestre, afetando a fase e a amplitude dos sinais envolvidos. Nesse caso, a propagação do sinal se dá na forma de uma linha curva, entre o transmissor e o receptor. Isso faz com que os satélites, mesmo não estando visíveis entre eles, consigam enviar e receber sinais. Assim, a ROGNSS se comporta como um experimento óptico no qual a atmosfera atua como uma lente, alterando a velocidade de propagação e a trajetória do sinal que a atravessa. Como essa alteração é função da densidade da atmosfera no ponto de ocultação, ao varrer verticalmente a mesma é possível obter com a ocultação um perfil atmosférico da refratividade do sinal, o qual por sua vez pode ser convertido em perfis de temperatura e umidade (KURSINSKI et al., 1996). Um esquema de perfilamento da atmosfera utilizando a

ROGNSS é mostrado na Figura 5.37 abaixo.

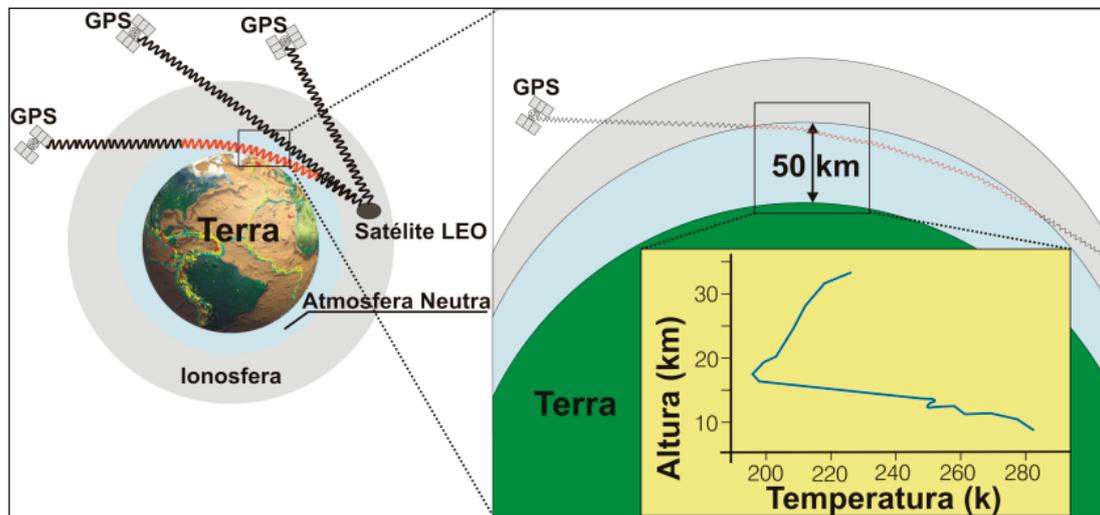


Figura 5.37 - Esquema ilustrativo do comportamento do sinal quando esse atravessa a atmosfera terrestre, no momento em que acontece uma ocultação do sinal GPS emitido pelo satélite do sistema e recebido por um receptor a bordo do satélite LEO (Figura adaptada de Lee et al. (2001)).

No passado houve várias missões com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento da técnica de RO, como as que lançaram o satélite *Global Positioning System/Meteorology* (GPS/MET), o *Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application* (CHAMP), o *Satélite de Aplicaciones Científicas-C* (SAC-C), e o *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE). Atualmente há uma constelação composta de 5 satélites LEO dedicados para a ROGNSS inseridos no projeto *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate* (COSMIC), do consórcio entre Taiwan e os Estados Unidos. O primeiro do programa de satélites Meteorológicos Operacionais (MetOp), do Sistema Polar da EUMETSAT foi o MetOp-A lançado em 2006 e o segundo foi o MetOp-B lançado em 2012. O TerraSAR-X foi lançado em 2007, como resultado de uma cooperação público-privada entre o DLR e a *European Aeronautic Defence and Space Company* (EADS) da Áustria. A iniciativa de assimilar os dados derivados da ROGNSS têm como objetivo principal proporcionar melhorias no desempenho de modelos de PNT, especialmente em regiões polares e oceânicas, bem como em locais com florestas muito densas, como é o caso da floresta amazônica. Por exemplo, a constelação de satélites COSMIC disponibiliza diariamente mais de 1200 perfis na atmosfera neutra.

Os dados de ROGNSS são perfis de observações indiretas da atmosfera, que semelhante aos dados de radiância, carregam informação do comportamento da mesma em diferentes níveis. Os dados podem ser em três níveis de processamento, os quais podem ser listados aqui (do menos para o mais processado) como sendo:

- Observações de fase da onda portadora nas duas frequências do sistema;
- Valores do efeito Doppler dos sinais recebidos no satélite LEO;
- Perfis do ângulo de curvatura em função do parâmetro de impacto;
- Perfis de refratividade em função da altura geométrica;
- Perfis de temperatura e umidade em função da pressão atmosférica.

Os dois primeiros níveis não são factíveis de serem assimilados, dada a complexidade do operador de observações a ser aplicado nesses casos. Com o *Physical-space Statistical Analysis System* (PSAS) o CPTEC avaliou a assimilação de dados de perfis de temperatura e umidade, os quais foram publicados em [Sapucci \(2014\)](#). Atualmente o CPTEC está assimilando dados de refratividade usando o GSI acoplado ao Modelo de Circulação Geral Atmosférico (sistema denominado G3D-Var, de fato, o SMG é uma atualização a este sistema, com diversas novas características e funcionalidades) ([AZEVEDO, 2014](#); [BAÑOS et al., 2016](#)) e alguns testes de impacto usando o *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (LETKF) foram reportados em [Sapucci et al. \(2016c\)](#). Testes iniciais na assimilação de dados do ângulo de curvatura foram realizados no desenvolvimento de uma dissertação de mestrado. Informações sobre esses testes podem ser obtidas em [BaÑos \(2017\)](#). Os arquivos a serem tratados no GSI deverão conter tanto os dados da refratividade em função da altura geométrica como os dados do ângulo de curvatura em função do parâmetro de impacto.

5.3.1 Avaliação da distribuição espacial dos dados

A primeira análise se refere a distribuição espacial dos dados assimilados com cada versão do SMG para se avaliar se os mesmos cobrem todo o globo, qual satélite que contribui mais e quais regiões foram beneficiadas com a maior concentração desses dados. A Figura 5.38 mostra a posição de cada perfil de rádio ocultação com uma indicação de cores que relacionam os satélites que as observaram. Observa-se a distribuição randômica característica dos dados de ROGNSS, onde são amostrados tanto oceanos como continentes. Os gráficos de barra apresentam a contagem total dos dados assimilados de cada satélite na análise correspondente ao dia 10 de maio

de 2015 às 12 UTC. Observa-se que os satélites Metop-A e B contribuem com uma quantidade semelhante, aproximadamente 27.000 a 28.000 observações cada um. Nota-se entretanto, que os satélites COSMIC têm uma contribuição diferente entre eles, sendo que o FM-740 contribui com mais de 30.000 dados de ROGNSS sendo assimilados. Este resultado apresenta-se semelhante nas duas versões do SMG em avaliação.

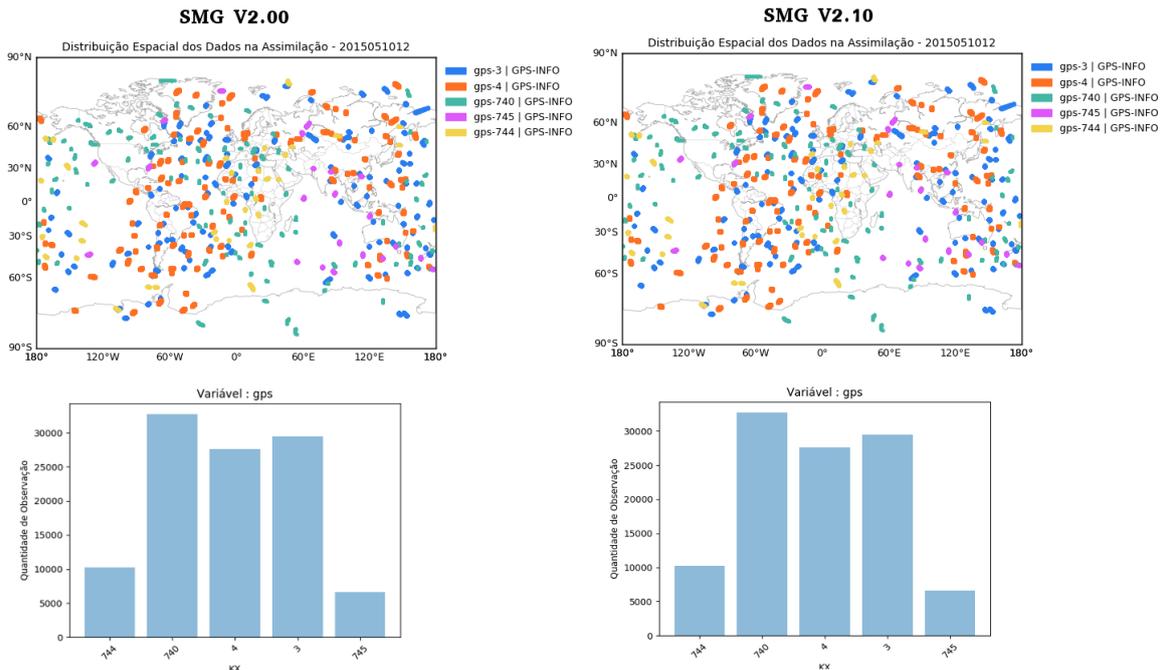


Figura 5.38 - Distribuição espacial dos perfis de ROGNSS assimilados no SMG V2.0.0 para o dia 20150510 às 12 UTC e no SMG V2.1.0 para esse mesmo dia, em função dos satélites utilizados no GSI. A escala de cores nessa figura indicam os satélites assimilados em cada análise. O gráfico de barras no inferior da figura mostra a contagem total de cada satélite.

5.3.2 Avaliação da Análise em termos do OmA e OmF

Para analisar o valor das diferenças de OmA, nas Figuras 5.39 e 5.40 (nos painéis superiores e centrais, respectivamente) se apresenta uma série temporal da média e desvio padrão desses valores com a sua distribuição vertical na atmosfera. Neste caso são apresentados apenas os resultados para os satélites FM-740 da constelação COSMIC, o qual é representativo do comportamento desta estatística nos outros satélites avaliados desta constelação e para o satélite MetOp-A da série de satélites europeus MetOp. Primeiramente nota-se em ambas as figuras, um predomínio de

valores médios negativos de OmA principalmente entre 750 e 925 hPa nos resultados com ambas as versões do SMG. Os valores negativos de OmA indicam que a análise está recebendo maior contribuição do modelo nessa região. Este resultado é devido à capacidade dos dados de ROGNSS de penetrar na atmosfera. O aumento do vapor d'água nas camadas mais perto da superfície afeta estes dados causando o efeito de multi-caminho e super-refração nos sinais GPS. Com isso, muitos dos sinais não conseguem ser recepcionados pelos satélites LEO fazendo com que a quantidade de dados nos níveis mais baixos seja menor. Ainda, os dados que conseguem ser recepcionados nesses níveis, passam por controles de qualidade mais rigorosos onde esses efeitos são considerados. Particularmente, os dados provenientes dos satélites da constelação COSMIC, após os correspondentes controles de qualidade, tem a capacidade de uma parte permanecer útil para serem assimilados pelo sistema. Isso pode ser observado nas camadas mais baixas perto da superfície, onde tem-se dias em que as diferenças adquirem valores positivos entre 0,5 e 1. No caso dos dados provenientes dos satélites MetOp, todos os dados abaixo de 8 km são removidos pelos procedimentos de controle de qualidade. Nas camadas situadas na alta troposfera e baixa estratosfera se observa que as diferenças OmA possuem valores próximos de zero (acima de 300 hPa), sendo mais positivas que negativas, indicando que o modelo e as observações diferem minimamente com maior contribuição das observações. Esse é um resultado característico deste tipo de dados, pois a literatura mostra que é onde os dados tem melhor desempenho. Da mesma forma, se ressalta como o desvio padrão diminui com o aumento da altitude, sendo bem próximo de zero nos níveis entre 50 e 0 hPa. Valores menores de desvio padrão são observados inclusive nos níveis baixos da atmosfera principalmente nos dados provenientes do COSMIC. Nota-se que o resultado apresentado é semelhante entre ambas as versões do SMG. Porém, de forma geral os valores de OmA são levemente menores com o SMG V2.1.0 do que com a versão anterior. Esse resultado reafirma a importância do aumento na resolução assim como as outras melhorias incluídas nesta nova versão.

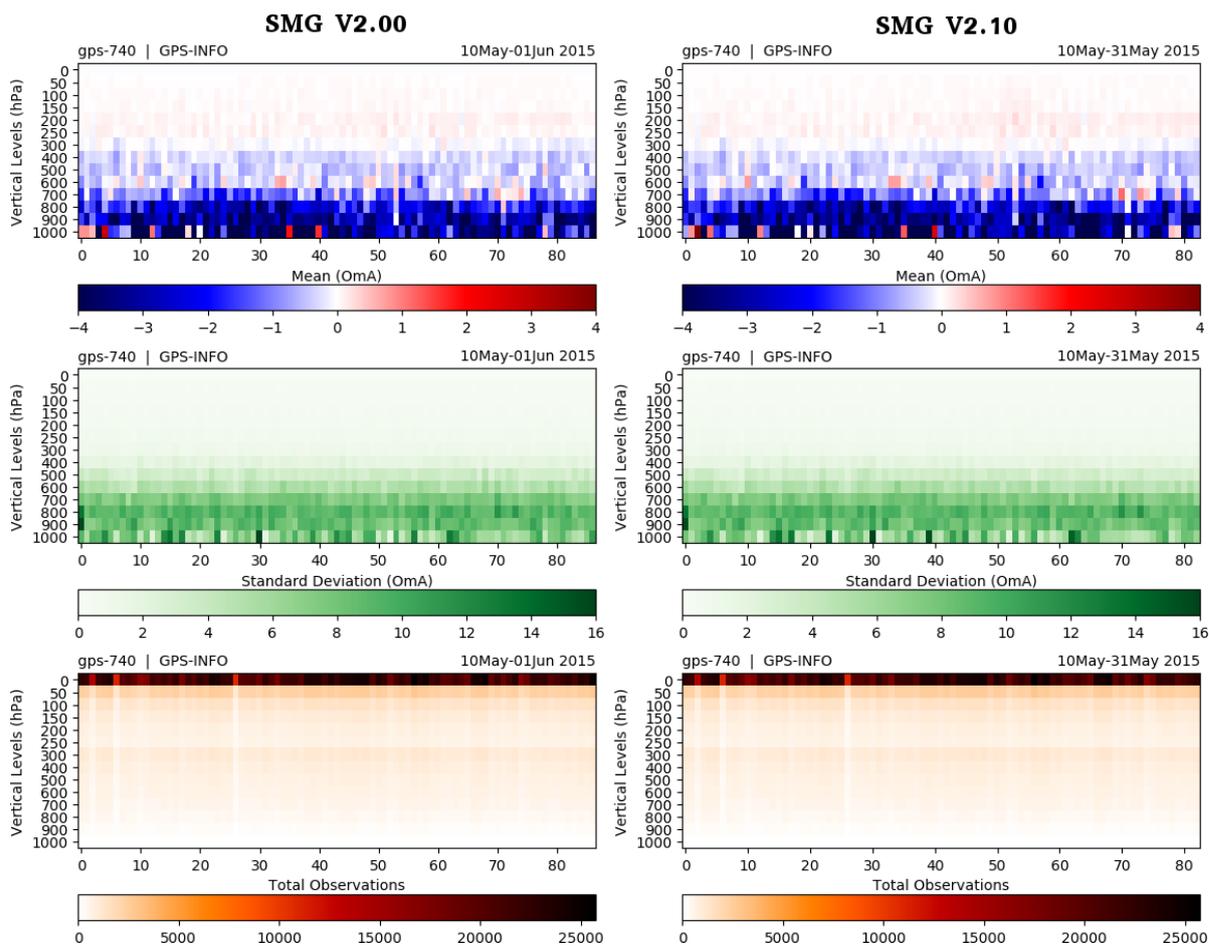


Figura 5.39 - Série temporal e por níveis verticais da atmosfera dos valores de OmA médios e o seu desvio padrão (painéis superiores e centrais, respectivamente) e da quantidade de dados de refratividade assimilados (painéis inferiores) do satélite LEO COSMIC FM (740), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas.

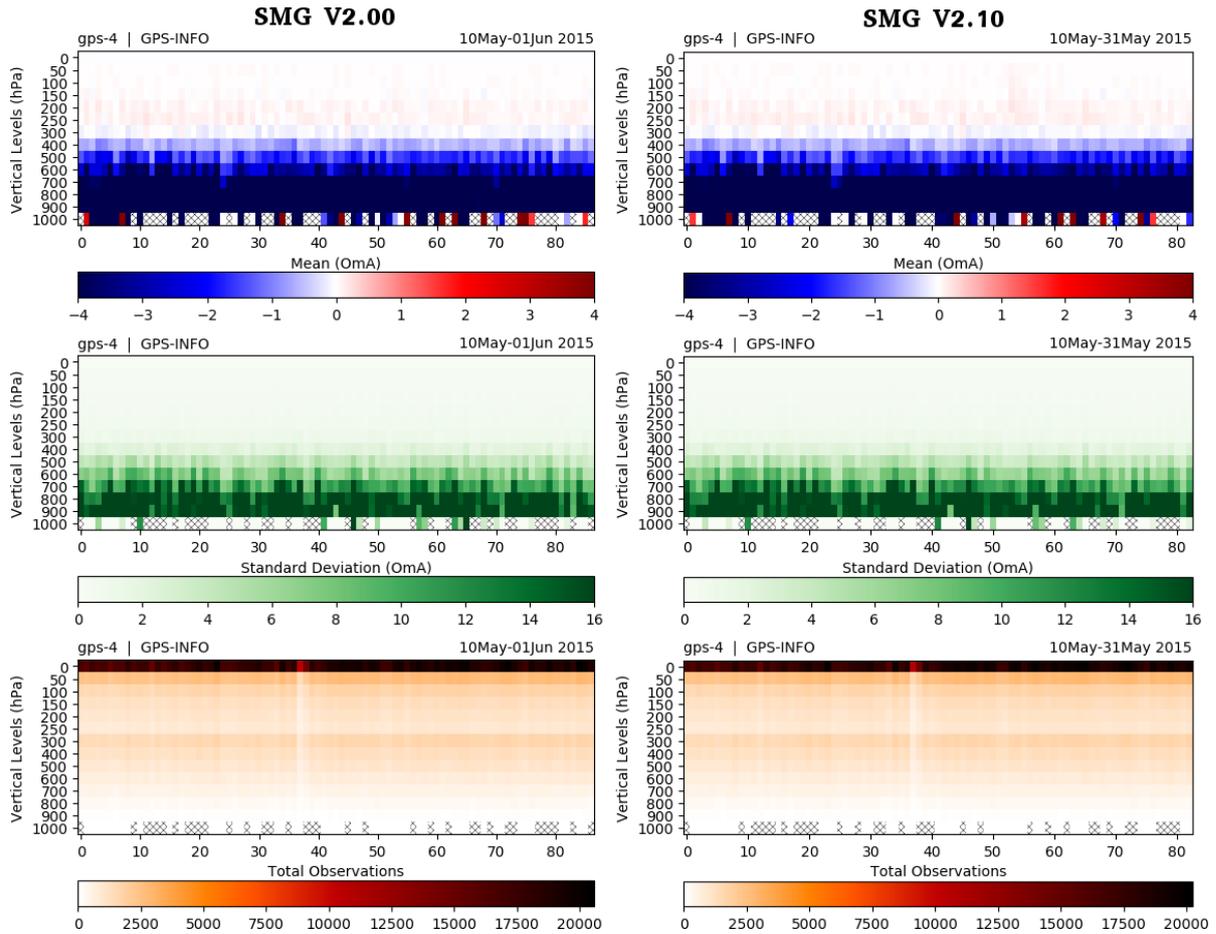


Figura 5.40 - Série temporal e por níveis verticais da atmosfera dos valores de OmA médios e o seu desvio padrão (painéis superiores e centrais, respectivamente) e da quantidade de dados de refratividade assimilados (painéis inferiores) do satélite LEO MetOp-A (4), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas.

O resultado em relação à quantidade de dados de refratividade assimilados ao testar cada versão do SMG é aprestado nos painéis inferiores das Figuras 5.39 e 5.40. Em ambas as figuras, observam-se duas faixas nas que se tem um aumento notável na quantidade de dados assimilados. Primeiramente entre 300 e 400 hPa e logo novamente a partir dos 100 hPa a quantidade de dados assimilados aumenta significativamente, com maior concentração nos níveis mais altos do modelo entre 50 e 10 hPa. Isso corrobora os resultados obtidos em trabalhos anteriores em que se afirma que o maior impacto destes dados é na alta troposfera e baixa troposfera, sobretudo no Hemisfério Sul. Nota-se que embora no SMG V2.0.0 a quantidade de dados assimilados em cada ciclo já é alto, no SMG V2.1.0 essa quantidade é levemente maior na análise avaliada.

Visando apresentar um resumo dos resultados em relação aos valores das diferenças de OmA e OmF de forma conjunta, nas Figuras 5.41 e 5.42 se mostra o resumo das estatísticas (média, desvio padrão e total assimilado) destas diferenças nas análises geradas durante o período entre o 10 de maio de 2015 às 12 UTC até o 31 de maio de 2015 às 18 UTC, em toda a coluna vertical da atmosfera (desde 1000 até 0 hPa). Novamente o resultado é apresentado para os resultados dos satélites LEO COSMIC FM (740) e MetOp-A (4). De forma geral, em relação ao resultado do OmF, observa-se que os valores de OmA e OmF são bem próximos com menores valores apresentados no OmA como esperado após o processo de assimilação. Entre ambas as versões avaliadas do SMG, nota-se uma pequena melhoria na V2.1.0. Em decorrência com o resultado apresentado nas figuras anteriores, os valores das médias de OmA do COSMIC são menores (curva de OmA mais próxima de zero) que os do MetOp-A. Da mesma forma, observam-se maiores valores de desvio padrão nas diferenças dos dados do MetOp-A: valores de OmA entre 5 e -5 para o MetOp-A e entre 2,5 e -2,5 para o COSMIC. Este resultado deve-se, como já foi explicado, à maior rejeição dos dados do MetOp-A na baixa troposfera. Embora isto, nota-se que a quantidade de dados assimilados deste satélite é superior à assimilada do COSMIC e aumenta gradualmente no decorrer do período. A quantidade dos dados assimilados do COSMIC mostra-se mais variável em cada análise.

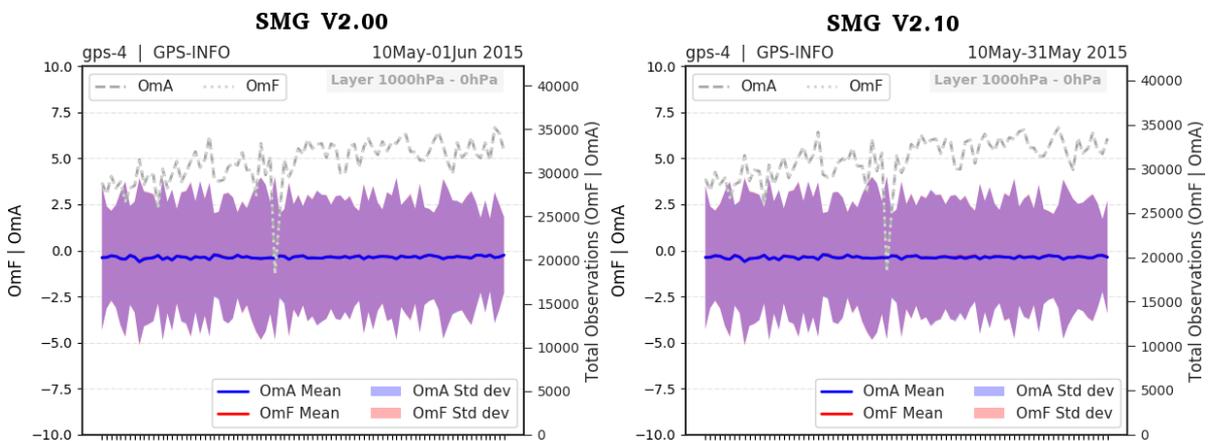


Figura 5.41 - Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 1000 e 0 hPa do satélite LEO MetOp-A (4), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC (painel esquerdo) e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas (painel direito).

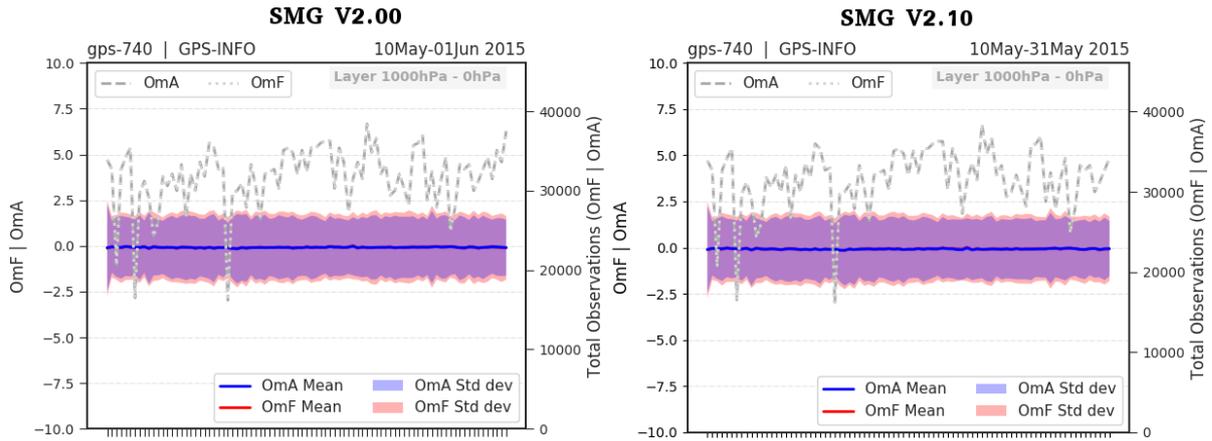


Figura 5.42 - Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 1000 e 0 hPa do satélite LEO COSMIC FM (740), no SMG V2.0.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC (painel esquerdo) e no SMG V2.1.0 para as mesmas datas (painel direito).

Como o desempenho dos dados de ROGNSS é superior nos altos níveis da atmosfera, na Figura 5.43 se apresenta o mesmo resultado que nas figuras anteriores, mas o resumo das estatísticas entre os níveis 300 e 0 hPa, para ambos os satélites COSMIC e MetOp-A, na V2.1.0 do SMG. Ressalta-se a contribuição destes dados nos altos níveis com valores médios de OmA quase zero, bem como de desvio padrão entorno deste valor, deixando evidente a natureza “sem bias” destes dados.

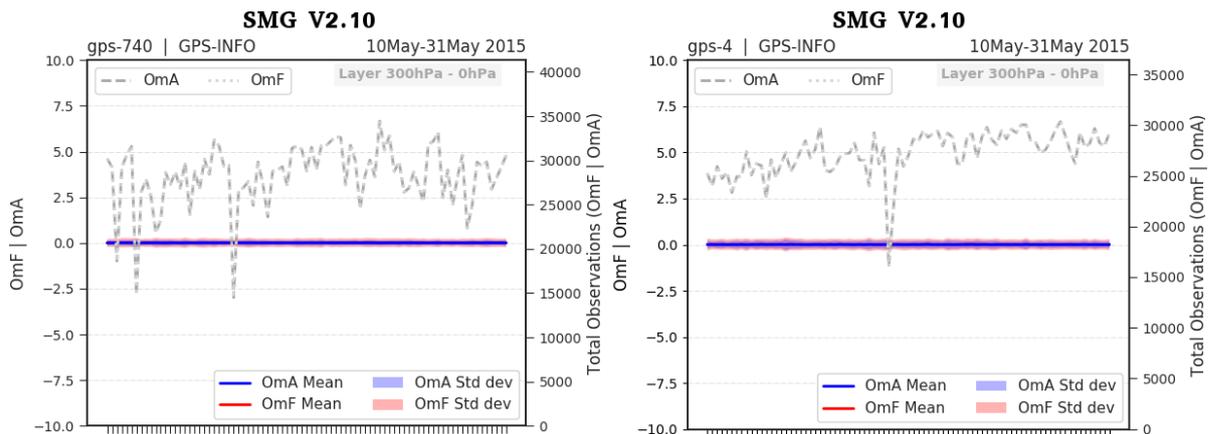


Figura 5.43 - Série temporal dos valores de OmA e OmF médios, o seu desvio padrão e da quantidade de dados de refratividade assimilados nos níveis entre 300 e 0 hPa dos satélites LEO COSMIC FM (740) (painel esquerdo) e MetOp-A (4) (painel direito), no SMG V2.1.0 para o período entre o 20150510 às 12 UTC até 20150531 às 18 UTC.

5.3.3 Avaliação da Análise em termos dos dados rejeitados

Durante o processo de assimilação, além dos dados assimilados, especial interesse tem-se pelos dados rejeitados. De forma geral, os dados podem ser rejeitados em duas etapas principais: inicialmente na checagem de erro grosseiro, o qual está relacionado com as distâncias entre o *background* e as observações, e reflete o peso que será impresso a mesma, e seguidamente a partir da aplicação dos diferentes procedimentos de controle de qualidade (CQ). No caso dos dados de ROGNSS, isto é realizado durante o processo do cálculo da inovação visando o uso efetivo destes durante o processo de minimização. Os CQ são uma componente vital do sistema no qual as observações “ruins” são filtradas. As observações podem incluir grandes erros podendo assim degradar a qualidade da análise e piorar o desempenho da previsão. Cada observação de ROGNSS é tratada independentemente e dentro dos CQ e estrutura dos erros a altura limite é 30 km para os perfis de refratividade, sendo que as observações em alturas acima são rejeitadas pelo sistema. Pelo CQ as observações que ficam fora da grade são removidas, por isso é realizado um processo de remove-las se encontram-se em uma superfície abaixo ou em/acima da camada topo do modelo. Outra condição que é tida em conta para o CQ, é se as observações se encontram em/ou perto de camadas com condições de super-refração, removendo as observações em que essa condição seja comprovada. Por outro lado, os dados abaixo de uma observação que falhou são também removidos. Outros CQ são aplicados de acordo com a recomendação do centro gerador dos dados. Por exemplo, as medições do sensor GRAS dos satélites Metop-A/-B não são assimiladas abaixo de 8 km no Hemisfério Norte e Sul extra-tropicais, porque o processamento de funcionamento ainda é a partir do método de Óptica Geométrica. Desta forma, essa limitante é colocada em um CQ específico para remover as observações desses satélites abaixo dessa altura (como já foi mencionado na Seção anterior). Além disto, diferentes alturas na atmosfera são testadas e é verificado o valor do desvio padrão, estabelecendo-se que observações em que se comprove valores superiores ao previsto sejam rejeitadas. Maiores detalhes dos CQ que são rotineiramente aplicados podem encontrados em Cucurull (2010). Um estudo detalhado do controle de qualidade dos dados de RO está sendo realizado e os resultados serão apresentados nas próximas versões do sistema.

5.4 Inclusão dos Dados de Radiâncias

Os satélites da série NOAA e METOP apresentam a bordo o sistema *Advanced TIROS Operational Vertical Sounder* (ATOVS), o qual é composto por três sondadores

de interesse à assimilação de dados: HIRS, AMSU-A e MHS. Estes sensores medem radiâncias nas regiões espectrais do infravermelho e micro-ondas. De acordo com os relatórios apresentados pelos centros operacionais de modelagem, as radiâncias medidas por esses sensores são os dados de satélite que contribuem significativamente com a qualidade da previsão numérica de tempo. Estes instrumentos estão instalados em diversas plataformas orbitais da série NOAA (NOAA-15, 16, 17, 18 e 19) e MetOP (A e B), aumentando assim a frequência e a disponibilidade espacial dos dados. Adicionalmente, dados de sondadores hiperespectrais representam informações importantes no sistema da assimilação, principalmente de modelos ambientais. As agências espaciais planejam inserir em suas plataformas espaciais sensores hiperespectrais (eg., IRS/MSG, IASI-NG/METOP-SGA, CRIS/JPSS-1 e 2), e o centro precisa ampliar sua capacidade de absorver essas informações e o módulo de radiância deve ser constantemente aperfeiçoado.

Nessa versão do SMG apenas os dados do sensor AMSU-A são considerados a título de avaliação da capacidade do sistema assimilar os dados de radiância. O sensor AMSU-A compõem o sistema ATOVS e contem 15 canais que estão baseados em parâmetros da resposta do vapor de água. Este sensor encontra-se nas unidades dos satélites NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 e METOP-A. Da mesma forma que na avaliação da versão SMG V1.0.0, na presente versão da avaliação diagnóstica do SMG, a análise da assimilação dos dados de radiância vai ser puramente ilustrativa para demonstrar de fato que o sistema tem capacidade de assimilar os dados de radiância e que essa assimilação não gerou erros absurdos. Uma análise mais apurada vai ser realizada e melhor descrita na continuidade do desenvolvimento do SMG, nos próximos relatórios de avaliação diagnóstica do sistema.

Nas Figuras 5.44 e 5.45 é possível observar a distribuição espacial da OmA, com correção de bias, para o canal 1, bem como o número de observações assimiladas por canal, considerando os diferentes satélites em diferentes horários sinóticos.

A distribuição espacial da OmA (Figura 5.44), evidencia marcante diferença na cobertura espacial em diferentes regiões do globo, entre os satélites considerados, além disso, diferenças nos valores de OmA entre os horários sinóticos também são observados, devido principalmente as diferentes regiões de cobertura de cada satélite, para cada horário aqui considerado. No que se refere ao número de observações assimiladas (Figura 5.45), uma das principais características observadas está associada ao menor número de observações assimiladas, considerando os canais de 1 a 5 e os canais 13 e 15. Como pode ser observado nos gráficos dessa figura os dados de radi-

ância do AMSU-A utilizados tiveram uma boa cobertura sobre o globo todo, embora os dados do NOAA-15 são bastante esparsos e os dados do NOAA-18 e NOAA 19 são bastante superpostos dada a suas orbitas semelhantes. Os dados do MetOp-A são mais abrangentes e cobrem regiões não cobertas pelos satélites NOAA-18/19.

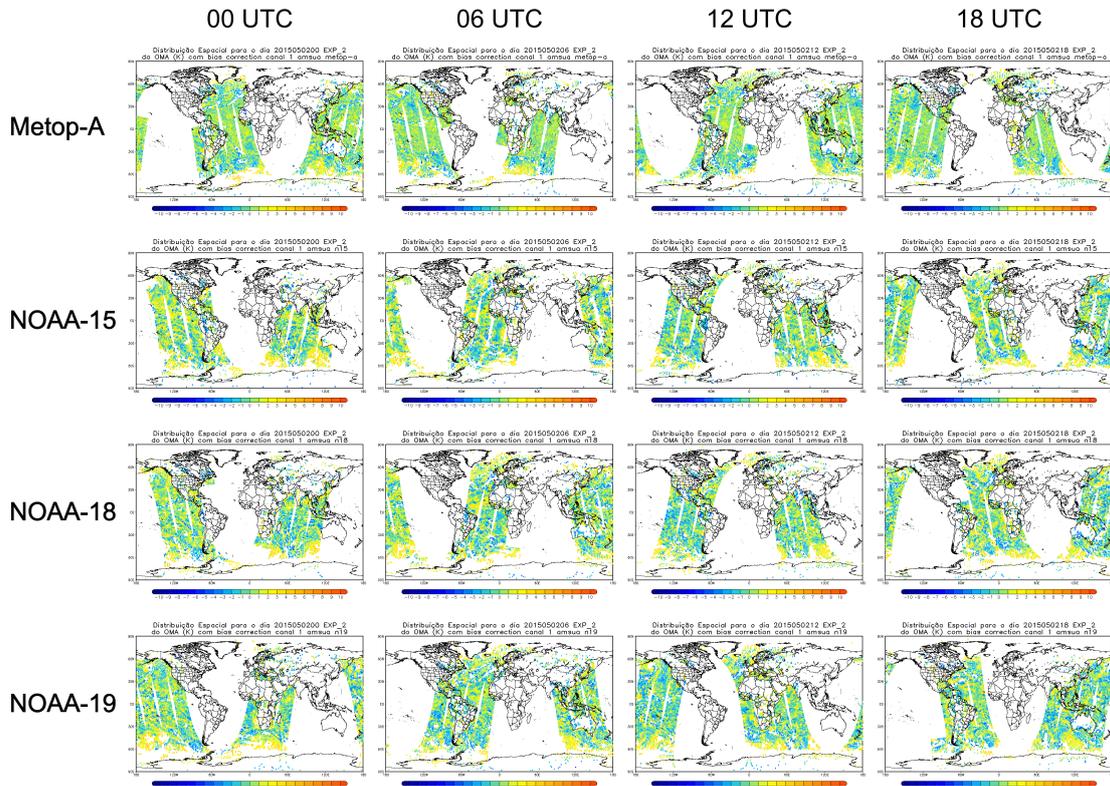


Figura 5.44 - Distribuição espacial de OmA (K) com correção de bias, durante os horários sinóticos. Considerando o canal 1 usando a versão SMG V2.1.0, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.

Para descrever o número de observações assimiladas em cada um dos canais de cada satélite nos diferentes horário sinóticos a Figura 5.45 mostra um gráfico de barras com tais informações para o primeiro dia do período de avaliação. Nessa figura é possível observar que a maior concentração dos dados assimilados estão entre os canais 6 e 12. Falta nessa figura uma relação dos canais com as funções de peso de cada um desses canais com os níveis vertical para apresentar uma localização vertical da contribuição dos dados de radiância na correção do estado no modelo na assimilação. Isso deverá ser feito nos próximos passos do processo de avaliação da radiância. Um outro ponto também é que o número de dados assimilados no primeiro dia não é representativo de todo o período e um gráfico mais sofisticado

com o valor médio e o desvio padrão poderia contribuir para melhor descrever o comportamento dos dados assimilados.

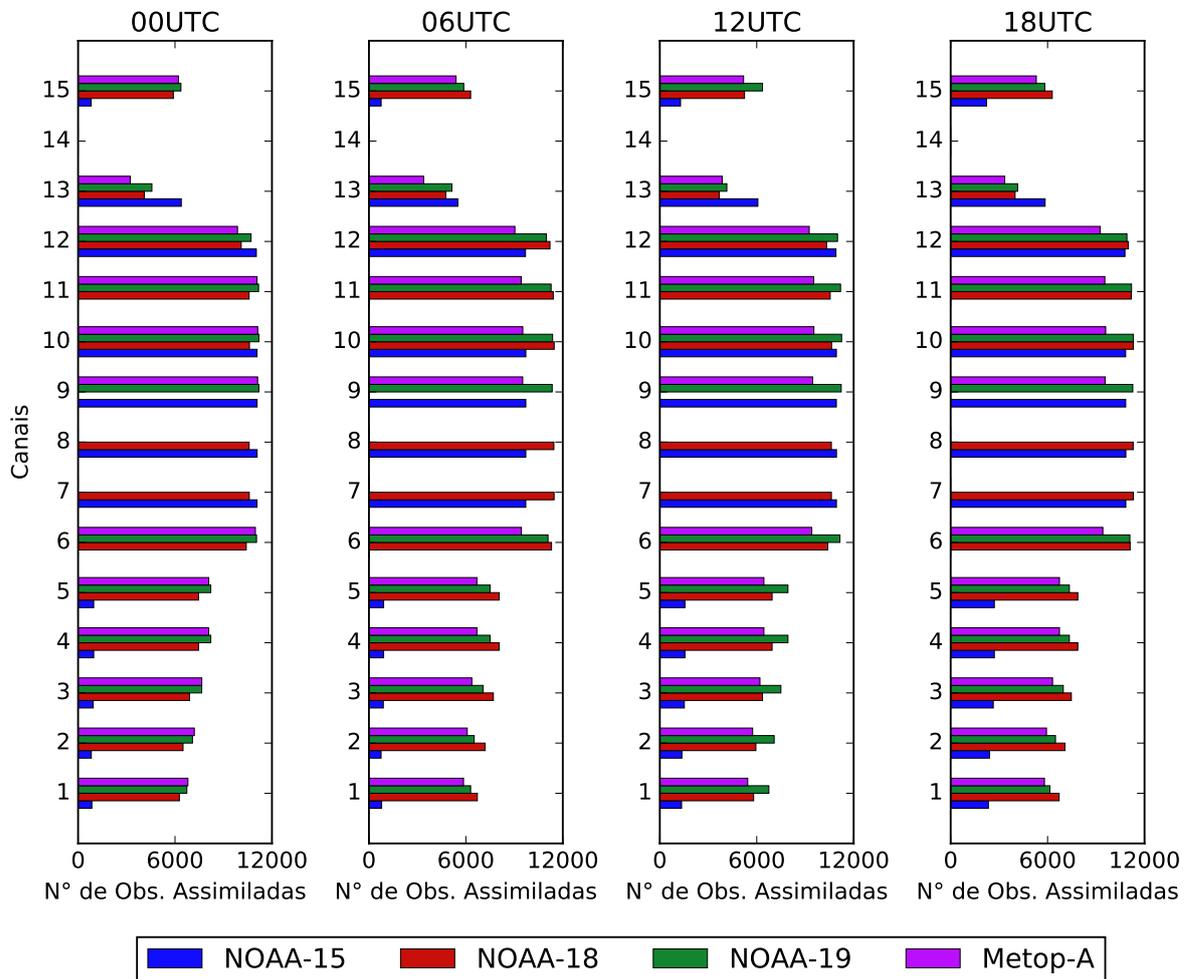


Figura 5.45 - Número de observações assimiladas, por canal da versão SMG V2.1.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.

6 Avaliação da melhoria nas previsões do modelo BAM

Neste capítulo é apresentada uma avaliação diagnóstica das melhorias nas previsões da atual versão do SMG (V2.1.0) com relação à versão anterior (V2.0.0). A avaliação é feita a partir da verificação das estatísticas básicas (i.e., viés, raiz do erro quadrático médio e correlação de anomalia), obtidas com o auxílio do software SCANTEC (SAPUCCI et al., 2011), para diferentes variáveis, sendo estas apresentadas sob a forma de *scores* e gráficos de linha. Outro aspecto verificado está relacionado com a habilidade do modelo BAM na representação da precipitação, a partir das análises do sistema GSI. Esta avaliação é feita para regiões distintas sobre a América do Sul e é apresentada também sob a forma de gráficos de linha e diagrama de Taylor, em que os resultados das versões são ranqueados em relação a outras referências.

6.1 Avaliação do *Skill* das Previsões do SMG

Nesta seção, é fornecida uma visão geral do desempenho das previsões entre 6 e 72 horas do modelo BAM, no prognóstico de diferentes variáveis sobre diferentes regiões. As regiões consideradas são o Hemisfério Norte (HN, definido entre as latitudes de 20° e 80° e longitudes de 0 a 360°), a região Tropical (TR, entre as latitudes de -20° e 20° e as longitudes de 0 a 360°), o Hemisfério Sul (HS, entre as latitudes de -80° e -20° e as longitudes de 0 a 360°) e a região da América do Sul (AS, entre as latitudes $-49,9^\circ$ a $11,38^\circ$ e as longitudes $-82,63^\circ$ a $-35,38^\circ$). As variáveis consideradas, são as seguintes:

- AGPL: Água precipitável integrada na coluna;
- PSNM: Pressão ao nível médio do mar;
- TEMP: Temperatura absoluta nos níveis de 250, 500 e 850 hPa;
- UMES: Umidade específica nos níveis de 500, 850 e 925 hPa;
- UVEL: Componente zonal do vento horizontal nos níveis de 250, 500 e 850 hPa;
- VVEL: Componente meridional do vento horizontal nos níveis de 250, 500 e 850 hPa;
- VTMP: Temperatura virtual nos níveis de 500, 850 e 925 hPa;
- ZGEO: Altura geopotencial nos níveis de 250, 500 e 850 hPa.

Estes resultados foram obtidos por meio da aplicação do SCANTEC, no qual pode-se selecionar a lista de variáveis a serem avaliadas. Para a presente avaliação, foi mantida a lista de variáveis padrão, a partir da qual foram elaborados *scorecards* que mostram um tipo de *score* (Ganho Percentual) calculado a partir das tabelas com o viés, a raiz do erro quadrático médio e da correlação de anomalia. Este *score* é definido da seguinte forma (BAÑOS et al., 2016):

$$\text{GANHO}_{v_t}^{\text{STAT}} = \frac{\text{STAT}_{v_t}^{\text{V2.1.0}} - \text{STAT}_{v_t}^{\text{V2.0.0}}}{\text{RVAL} - \text{STAT}_{v_t}^{\text{V2.0.0}}} \times 100\% \quad (6.1)$$

$$\text{RVAL} = \begin{cases} 0, & \text{se STAT} = \text{VIES, RMSE} \\ 1, & \text{se STAT} = \text{ACOR} \end{cases}$$

Na Equação 6.1 acima, “STAT” representa o tipo de estatística básica utilizada na avaliação (i.e., viés - VIES, raiz do erro quadrático médio - RMSE ou a correlação de anomalia - ACOR). “RVAL” indica o valor da “estatística perfeita”, i.e., quando “STAT = VIES” ou “STAT = RMSE”, “RVAL = 0”; quando “STAT = ACOR”, “RVAL = 1”. O índice v indica uma das variáveis da lista, sendo esta avaliada no tempo de previsão t (com $t = \{6n, \forall n \in [1, 12]\}$).

Com o cálculo do ganho percentual utilizando as estatísticas básicas provenientes do SCANTEC, procurou-se saber, primeiramente, em quais regiões e para quais variáveis o experimento SMG V2.1.0 melhorou em relação ao experimento controle SMG V2.0.0. Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, são mostrados os *scores* calculados a partir das estatísticas de viés, raiz do erro quadrático médio e correlação de anomalia. As figuras estão apresentadas por regiões, de forma a facilitar a inspeção visual e identificar quais variáveis do SMG V2.1.0 obtiveram ganho maior ou menor em relação ao experimento controle. Seguindo a Equação 6.1, o ganho é neutro quando a estatística básica (i.e., o viés, a raiz do erro quadrático médio ou a correlação de anomalia) é igual ou muito próxima (cores mais próximas do branco). O “ganho neutro”, neste caso, indica que não houve melhora da versão V2.1.0 em relação à versão V2.0.0. Utilizando o viés e a raiz do erro quadrático médio para o cálculo do *score*, o ganho é maior quando o erro do SMG V2.1.0 é menor do que o erro do SMG V2.0.0. No caso do *score* calculado com a correlação de anomalia, obtém-se ganhos maiores quando a correlação de anomalia do SMG V2.1.0 é maior do que o do experimento SMG V2.0.0.

A Figura 6.1, apresenta o ganho percentual (%) do viés sobre as quatro regiões consideradas. O termo “ganho” é indicativo de melhora de uma versão sobre a outra. Nesse sentido, sendo o viés um indicador da magnitude do erro aleatório do modelo, quando está orientado positivamente (cores mais próximas do verde escuro), significa que houve a redução do erro aleatório do SMG V2.1.0 com relação ao SMG V2.0.0. Inspeccionando-se as Figuras “a”, “b”, “c” e “d”, percebe-se que, em geral, a melhoria mais consistente ocorreu sobre a região Tropical (Figura 6.1c), onde se verifica maior predominância de redução do viés do SMG V2.1.0 (com relação ao SMG V2.0.0) entre as variáveis consideradas ao longo dos tempos de previsão (eixo x). As variáveis AGPL-925, TEMP-850, UMES-[500;850], UMES-925, VTMP-[850;925], foram aquelas que apresentaram melhora na redução do erro aleatório, considerando ganhos (ou melhora) acima de 50%. Nesta mesma região, observa-se que a variável AGPL-925, apresenta ganhos importantes da versão avaliadas, sendo que sobre o Hemisfério Norte, esta variável apresenta ganhos apenas nas primeiras 6 horas de previsão. Por outro lado, na avaliação da variável TEMP-850, observa-se que sobre as regiões Hemisfério Sul e Tropical, esta apresenta ganhos também importantes, enquanto que sobre o Hemisfério Norte ela é pior nas primeiras 6 horas de previsão. Sobre a América do Sul, a variável TEMP-850 apresentou melhoras mais importantes nas primeiras 24 horas de previsão.

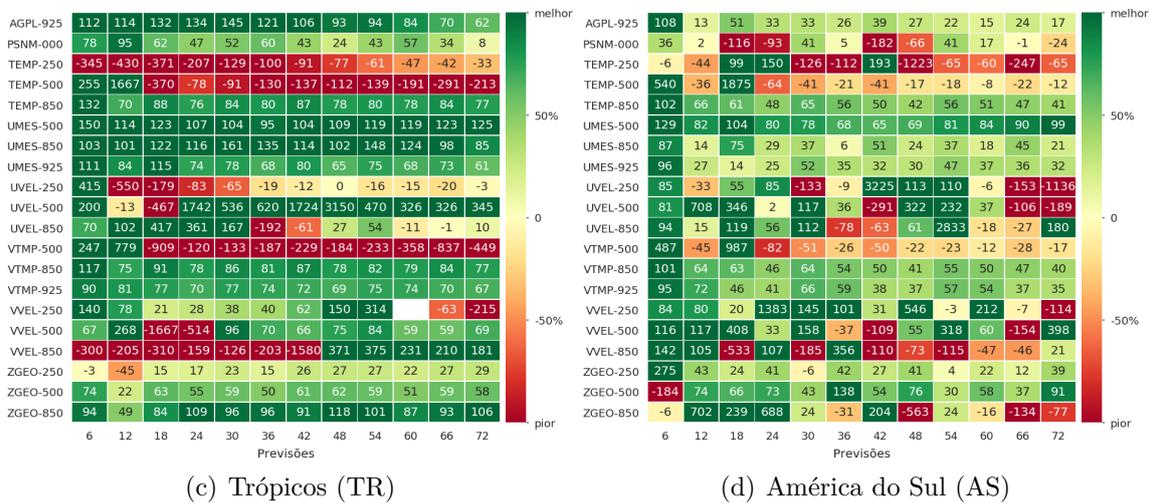
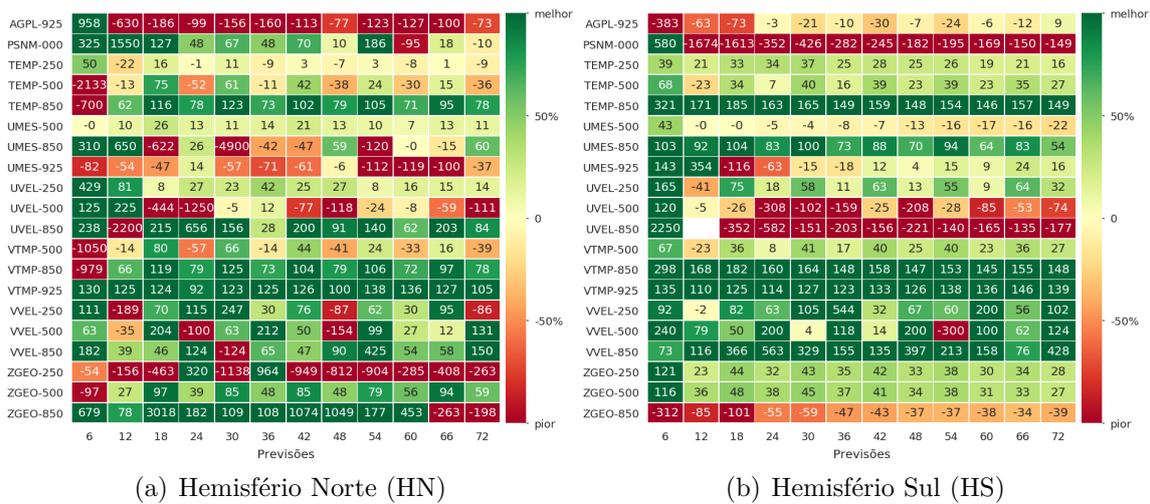
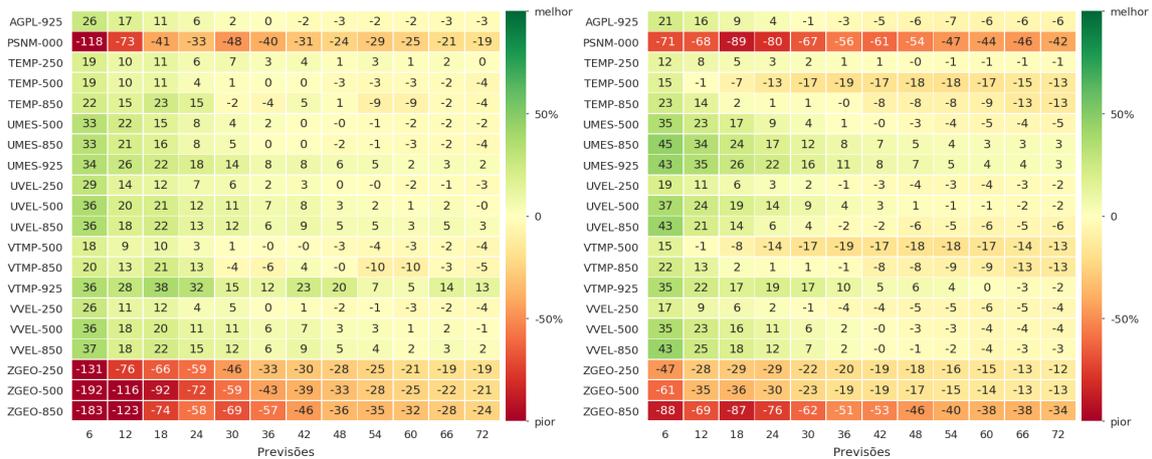


Figura 6.1 - Ganho percentual do VIES em função do tempo de integração do modelo sobre as regiões HN, HS, TR e AS. Os tons de verde, representam melhoria da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.

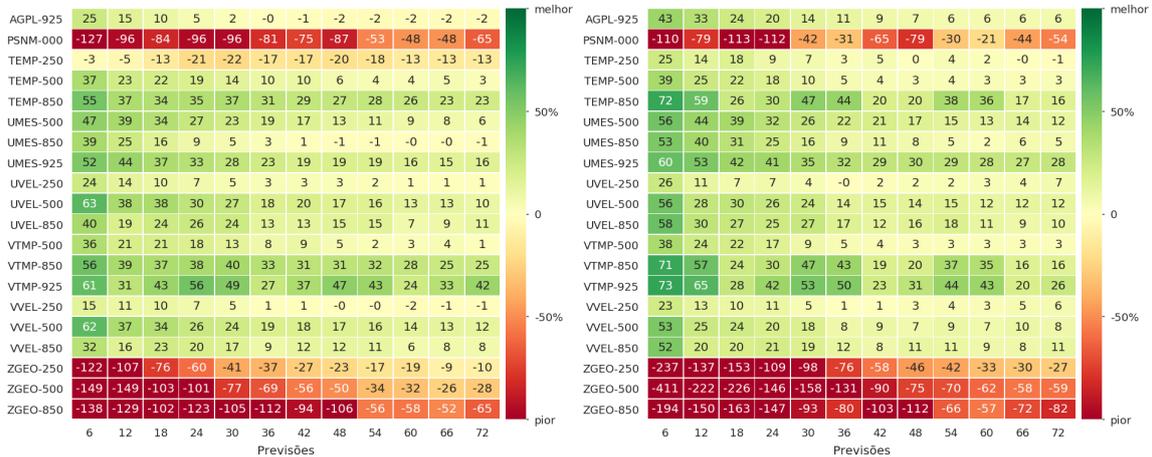
Na Figura 6.2, pode-se verificar o ganho do SMG V2.1.0 com relação ao SMG V2.0.0. Sendo a raiz do erro quadrático médio um indicador do erro sistemático do modelo, valores mais próximos do verde escuro apontam também a redução do erro sistemático do modelo na versão SMG V2.1.0, com relação à versão V2.0.0. Nesse caso, as versões avaliadas não diferem de forma importante (i.e., os ganhos estão frequentemente abaixo de 50%) sobre o Hemisfério Norte. Nesta região, os ganhos maiores ocorreram nas previsões mais próximas da análise (até 24 horas), mas não atingiram o limiar de 50%. Por outro lado, sobre a América do Sul, observa-se maior remoção do erro sistemático (e.g., VVEL-[500,850], UVEL-[500,850], VTMP-[850,925],

UMES-[500,850,925] acima do limiar de 50%) na versão SMG V2.1.0, indicando melhora desta versão devido às diferenças na distribuição dos níveis sigma na vertical (Figura 2.2), o que reflete também na representação das análises do sistema, dada a sua natureza cíclica. De forma geral, observa-se piora da pressão em superfície (PSNM-000) e da altura geopotencial (ZGEO-[250,500,850]) sobre todas as regiões, sendo este um indicativo de que as diferenças entre a distribuição dos níveis sigma entre as versões, não ajudou o modelo BAM na representação destas variáveis.



(a) Hemisfério Norte (HN)

(b) Hemisfério Sul (HS)

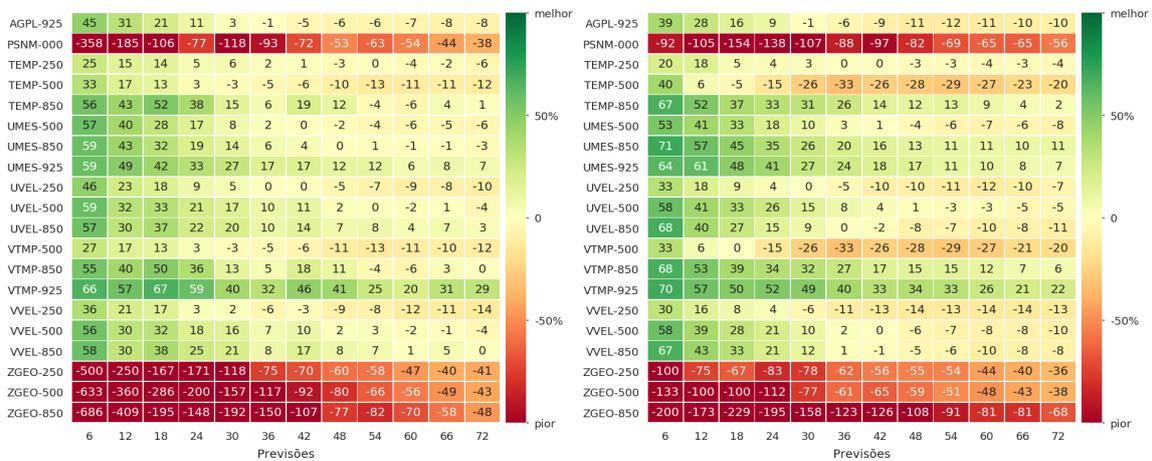


(c) Trópicos (TR)

(d) América do Sul (AS)

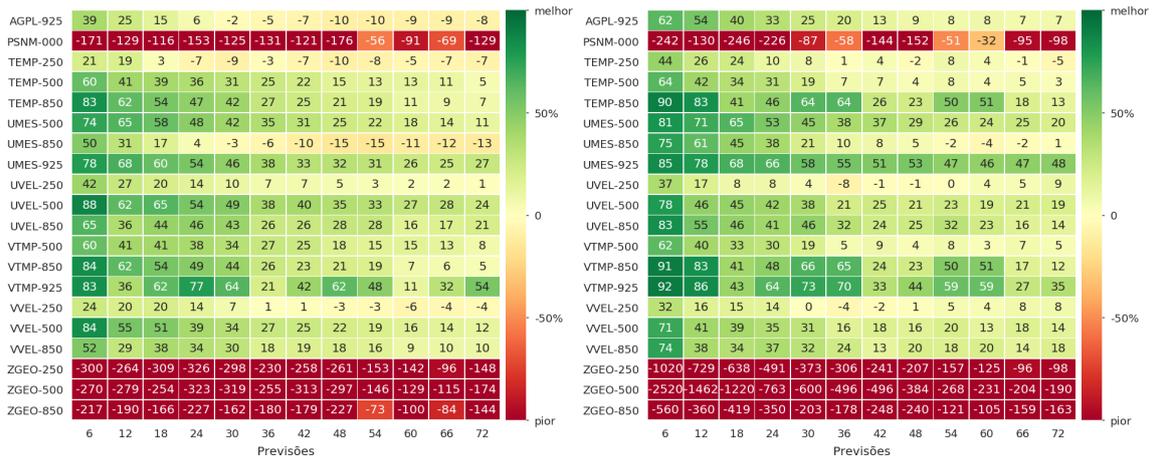
Figura 6.2 - Ganho percentual do RMSE sobre as regiões HN, HS, TR e AS. As cores mais próximas do verde escuro, representam melhora da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.

Os ganhos calculados utilizando a correlação de anomalia, são apresentados na Figura 6.3. A correlação de anomalia, é frequentemente utilizada como uma medida geral da performance dos modelos numéricos, na previsões de sistemas de larga escala. No caso dos experimentos com as versões V2.1.0 e V2.0.0, sobre a América do Sul (Figura 6.3d), observa-se o baixo desempenho da versão V2.1.0 do SMG. Na Figura 6.4, pode-se verificar que o desempenho geral do modelo BAM na previsão da altura geopotencial em 500 hPa (previsões de 24, 48 e 72 horas) é inferior ao da versão V2.0.0, apresentando valores abaixo do limite útil de 0,6 (60% de correlação) em alguns dias do período avaliado, principalmente nas previsões de 48 e 72 horas.



(a) Hemisfério Norte (HN)

(b) Hemisfério Sul (HS)

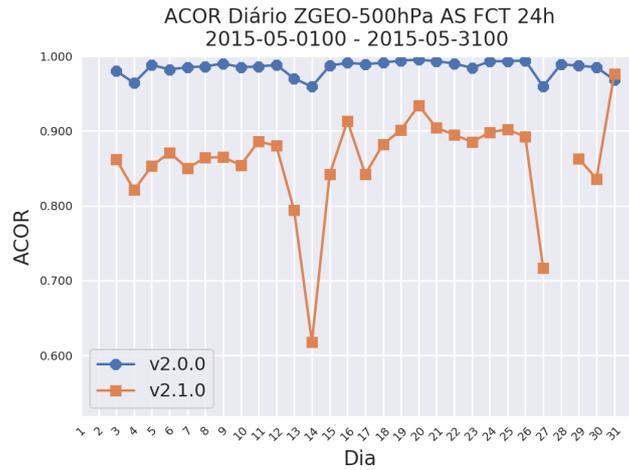


(c) Trópicos (TR)

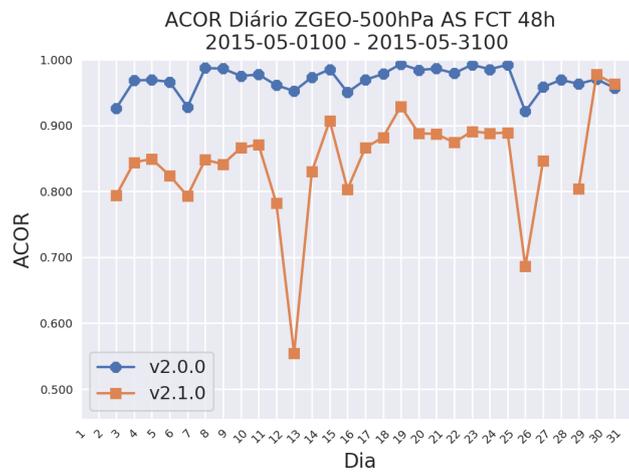
(d) América do Sul (AS)

Figura 6.3 - Ganho percentual do ACOR sobre as regiões HN, HS, TR e AS. As cores mais próximas do verde escuro, representam melhoria da versão V2.1.0 do SMG sobre a versão V2.0.0.

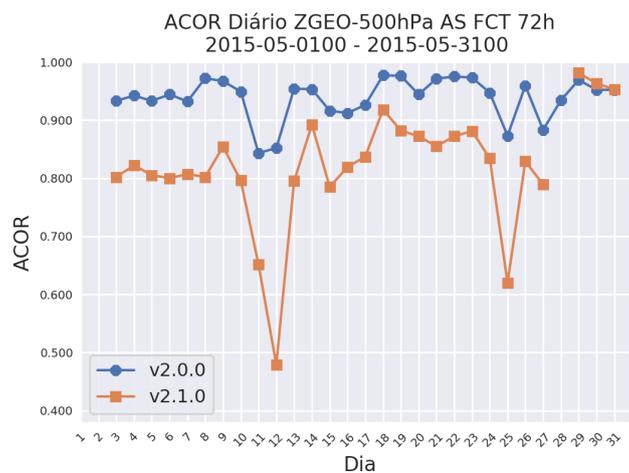
De forma geral, observa-se que, com excessão da altura geopotencial e da pressão em superfície, a versão V2.1.0 do SMG apresentou ganhos mais importantes (acima do limiar de 50%) sobre as regiões avaliadas. No Hemisfério Norte, os ganhos mais importantes ocorrem principalmente nas primeiras 6 horas de previsão; no Hemisfério Sul, o mesmo comportamento é verificado, apesar de haver piora nas previsões do modelo a partir de 24 horas na previsão da temperatura em 500 hPa (o que impacta diretamente o diagnóstico da temperatura virtual no mesmo nível, embora o prognóstico da umidade específica neste nível seja comparável entre as versões); na região Tropical, o *score* destas variáveis melhora (mas não se aproxima de 50% após as 24 horas de previsão); e sobre a América do Sul, verificam-se resultados melhores. Nesta região, as primeiras 6 horas de previsão são melhores do que em qualquer outra região, em que se observa também melhorias importantes no prognóstico da umidade específica em 950 hPa (sendo a versão V2.1.0 nesta região, pelo menos 50% melhor do que a versão V2.0.0 até 48 horas de previsão).



(a) Previsões de 24 horas



(b) Previsões de 48 horas



(c) Previsões de 72 horas

Figura 6.4 - Correlação de Anomalia da Altura Geopotencial em 500 hPa (ZGEO-500) sobre a região AS, no período de 2015050100 a 2015053100, das versões V2.1.0 e V2.0.0 do SMG.

Levando-se em consideração a principal diferença entre os experimentos, que é a distribuição dos níveis sigma na vertical, fica claro que esta diferença se reflete de forma mais importante na pressão em superfície e na representação da altura geopotencial nas previsões do modelo BAM a partir das análises da versão V2.1.0.

Nas seções a seguir, é apresentada a avaliação da precipitação levando-se em consideração dados observados e as previsões do modelo GFS.

6.2 Avaliação do *Skill* das Previsões de Precipitação do SMG

A avaliação do *skill* apresentada nesta seção, visa fornecer uma visão geral sobre o estado da representação dos erros aleatórios (em termos do viés) e do erro sistemático (em termos da raiz do erro quadrático médio), das previsões de precipitação do modelo BAM utilizando as análises do NCEP e do sistema SMG (na versão corrente, V2.1.0). A comparação é também feita com as previsões do modelo GFS.

6.2.1 Diagnóstico Diário Previsões de Precipitação

Na Figura 6.5, são apresentados o viés e a raiz do erro quadrático médio (RMSE, “URMSE” nas figuras), para as previsões de até 72 horas do modelo BAM (inicializado com as análises do NCEP e do SMG) e do modelo GFS. A avaliação é apresentada para as seguintes regiões sobre a América do Sul: “Bacia do Prata”, “Sudeste do Brasil”, “Centro-Oeste do Brasil”, “Nordeste do Brasil” e “região Amazônica”. Estas regiões de avaliação seguem aquelas que foram definidas em [Figuerola et al. \(2016\)](#).

Nesta avaliação, de forma geral, pode-se notar diferentes desempenhos na habilidade da previsão da precipitação que variam de acordo com a região, devido às diferentes características dos regimes de chuva. A América do Sul é uma região do globo com grande variabilidade de precipitação ([CAVALCANTI, 2016](#)). Sobre a região da Bacia do Prata (Figuras 6.5a e 6.5a'), o sistema SMG V2.1.0 (“BAM-DAS” nas figuras), é o modelo que apresenta menores índices de erro aleatório. Isso significa que fontes de incerteza que contribuem para os erros na representação da precipitação, são minimizados quando o modelo é inicializado com a própria análise. Por outro lado, o erro sistemático aqui representado em termos do RMSE sobre a mesma região (Figuras 6.5a e 6.5a'), mostra que o erro da previsão cresce de forma abrupta até 48 horas. Isso significa que o erro do modelo tende a ser maior à medida em que as previsões são mais longas e afastadas da própria análise. Na mesma figura e região, em comparação com o experimento BAM (modelo BAM inicializado com a análise

do NCEP), este experimento mostra-se mais estável e com erro das previsões de 48 e 72 horas comparável com o erro da previsão de 24 horas. Esta discrepância entre os experimentos “BAM-DAS” e “BAM” pode ser um indicativo de que o erro sistemático do modelo pode estar sendo acumulado, pois o experimento “BAM-DAS” é realizado de forma que a previsão de 6 horas do modelo BAM serve como base para a determinação da análise que será utilizada pelo próprio modelo. Se esta previsão possui um erro muito maior do que o da observação, logo ele dominará o processo de assimilação de dados e, conseqüentemente, as observações que deveriam ser utilizadas para corrigir esta previsão, acabam sendo descartadas e o erro do modelo tende a crescer ao longo do tempo.

Na região Sudeste do Brasil (Figuras 6.5*b* e 6.5*b'*), observa-se que os experimentos “BAM-DAS” e “BAM” apresentam desempenhos muito semelhantes. Dadas as características do regime de precipitação sobre esta região, especialmente sobre o mês de Maio (final do Outono e início do Inverno sobre o Hemisfério Sul), é o início do período mais seco do ano sobre a região. Conseqüentemente, o desempenho entre os experimentos é semelhante pois os acumulados de chuva são menores (vide Figura 6.7 da Seção 6.2.2). Na região Centro-Oeste do Brasil (Figuras 6.5*c* e 6.5*c'*), observa-se um padrão bastante diferente dos demais. No diagnóstico do erro aleatório dos experimentos com os modelos (Figura 6.5*c*), o experimento “BAM-DAS” mostrou que, com a assimilação de dados (i.e., utilizando a própria análise), houve a redução do Viés do modelo, sendo que este experimento se aproximou bastante das previsões do GFS na previsão de 72 horas, o que se mostra como um resultado positivo. Em contrapartida, o erro sistemático (Figura 6.5*c'*) do experimento “BAM-DAS” não se mostrou estável tal como o do experimento “BAM”. Isso pode ser um indicativo de que a assimilação de dados tem muito trabalho para ajudar a minimizar parte dos erros sistemáticos do modelo na representação da precipitação.

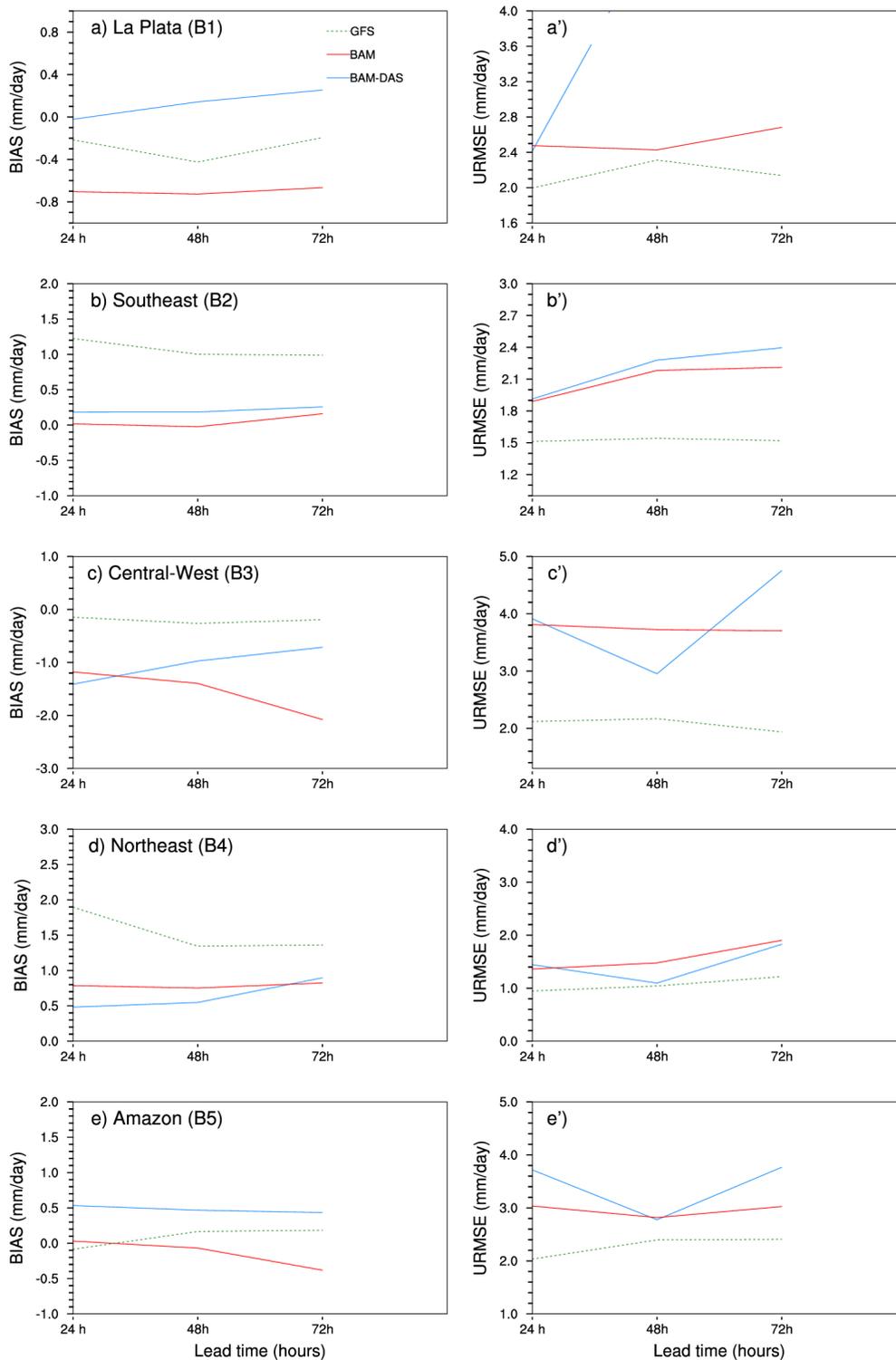


Figura 6.5 - Viés (bias, na figura) e RMSE (UMRSE, na figura), comparando a habilidade de previsão das previsões de até 72 horas de precipitação do modelo BAM, inicializado pelas análises do NCEP (curvas vermelhas) e inicializado pelas análises do sistema de assimilação GSI (curvas azuis) e as previsões do modelo GFS do NCEP (curvas verdes). A avaliação é feita para as regiões da Bacia do Prata (La Plata), Sudeste (Southeast), Centro-Oeste (Central-West), Nordeste (Northeast) e Amazônia (Amazon). O período da avaliação corresponde às simulações durante o mês de Junho de 2015.

Ainda na Figura 6.5, as regiões Nordeste e Amazônica (denotadas pelas figuras de letras “ d ” e “ e ”, e respectivamente “ d' ” e “ e' ”), mostram dois padrões distintos, relacionados com os regimes de chuvas dessas regiões. Sobre a região Nordeste (Figuras 6.5d e 6.5d'), mais seca, mostra que ambos os experimentos desempenharam de forma bastante semelhante. Nesta região, destaca-se que o erro aleatório do experimento “BAM-DAS” foi menor em comparação com o experimento “BAM”, enquanto que o erro sistemático do modelo BAM nestes dois experimentos, foi maior em relação do erro sistemático do modelo GFS. Isso mostra que a assimilação de dados, embora desempenhe um papel importante na minimização das fontes de erro, não é capaz de minimizar por completo os erros sistemáticos associados ao modelo numérico, mesmo em uma região com acumulados de chuva muito baixos. De forma semelhante, pode-se dizer o mesmo sobre o desempenho dos modelos sobre a região Amazônica (Figuras 6.5e e 6.5e'). Sobre esta região observa-se que o modelo BAM nos experimentos com e sem assimilação de dados (“BAM-DAS” e “BAM”, respectivamente), também apresenta dificuldades com relação à manutenção do erro sistemático. Em comparação com o erro sistemático apresentado pelo modelo GFS, o modelo BAM apresenta erros que podem ser de quase 100% do erro do modelo GFS (nas previsões de 24 e 72 horas).

Na Figura 6.6, são apresentados diagramas de Taylor que resumem a avaliação diagnóstica da precipitação dos experimentos que consideram a versão V2.1.0 do SMG. Esta avaliação é complementar àquela apresentada na Figura 6.5 pois, além de mostrar as informações relacionadas com a correlação de anomalia (“*Correlation*” nas figuras), acrescenta também a informação do dado observado do MERGE (ROZANTE et al., 2010), um produto derivado da combinação entre os dados de estação em superfície e dados obtidos a partir do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)). No caso do modelo do sistema SMG V2.1.0, em comparação direta com o mesmo modelo da versão V2.0.0 do SMG, nota-se que sobre a região Amazônica (Figura 6.6a), a versão V2.0.0 apresentou-se *skill* ligeiramente melhor do que a versão V2.1.0, sendo o modelo BAM inicializado com a análise do NCEP o experimento que mais se aproximou da referência (REF), em termos de desvio-padrão normalizado (eixos x e y nos diagramas), e da correlação (arco). O mesmo pode ser expressado para o erro sistemático, representado pelas curvas concêntricas dentro do diagrama polar (indicado por “URMSE” nas figuras). Sobre a região Nordeste (Figura 6.6b), observou-se que o modelo BAM sendo inicializado pela análise do GSI do sistema SMG V2.1.0, foi a versão do modelo que mais se aproximou da referência, embora a magnitude dos erros, em geral, sejam maiores. O modelo BAM da versão V2.0.0 foi o que apresentou maior amplitude de erro e menor correlação para as previsões de 48 e

72 horas (representadas pelos números 2 e 3 no diagrama). Neste caso, o modelo GFS desempenhou de forma semelhante à esta versão do modelo BAM, embora o GFS tenha menor desvio-padrão quando relacionado com o dado observado do MERGE. Nas regiões Centro-Oeste e Sudeste (Figuras 6.6d e 6.6e, respectivamente), os modelos apresentaram *skill* semelhante sobre as regiões, com destaque o SMG V2.1.0 (“BAM-DAS” nas figuras), que apresentou erros maiores para a previsão de 72 horas (número 3 no diagrama). Neste caso, sobre a região Sudeste, as previsões de 24, 48 e 72 horas (números 1, 2 e 3, respectivamente no diagrama) dos experimentos (com excessão do modelo GFS) apresentaram erros bastante semelhantes. Para a região da Bacia do Prata (Figura 6.6e), os experimentos desempenharam de forma semelhante, com excessão das previsões de 48 horas do SMG V2.1.0, que apresentaram maiores erros.

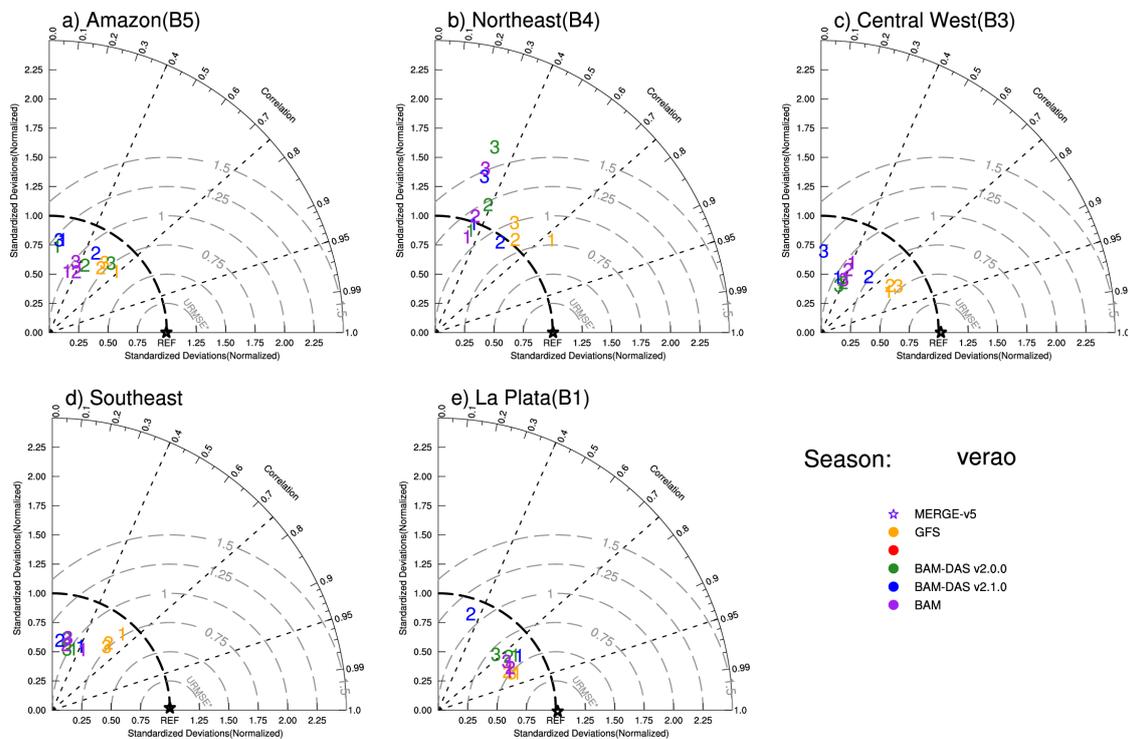


Figura 6.6 - Diagrama de Taylor comparando o *skill* das previsões do modelo BAM inicializado a partir das análises do NCEP (pontos roxos), com as análises do sistema de assimilação GSI (pontos verde e azul, nas versões V2.0.0 e V2.1.0, respectivamente), dados observados de precipitação (referência) do MERGE (estrela) e previsões do modelo GFS (pontos amarelos). Os números “1”, “2” e “3”, nos diagramas, representam o *skill* das previsões de 24, 48 e 72 horas dos experimentos sobre as regiões indicadas.

A partir da avaliação diagnóstica dos experimentos que consideram as versões V2.0.0 e V2.1.0 do SMG, em comparação com as previsões do modelo GFS e com a referência (MERGE), pode-se perceber que o modelo BAM apresenta erros sistemáticos em regiões onde os regimes de chuva ou são muito fracos, ou são muito intensos (e.g., regiões Nordeste e Amazônica, respectivamente). A assimilação de dados, por outro lado, é benéfica por ajudar a minimizar as fontes de erros que interferem na qualidade das previsões do modelo. Apesar disso, a assimilação de dados apenas, não é capaz de resolver estes problemas. Investimentos devem ser feitos no modelo de forma a identificar e corrigir as fontes de erros mais importantes, de forma que o processo de assimilação de dados seja o mais eficiente possível.

6.2.2 Diagnóstico Mensal Previsões de Precipitação

Nesta seção é feita uma avaliação diagnóstica das séries temporais da precipitação dos experimentos com o modelo BAM em comparação com as previsões do modelo GFS e do dado observado do *Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM* (IMERG, [Huffman et al. \(2018\)](#)), sobre as regiões consideradas nesse estudo.

Na Figura 6.7 são apresentadas as séries temporais da precipitação dos experimentos realizados com o modelo BAM nas versões V2.1.0 (apenas) em comparação com as precipitações geradas pelo modelo GFS e os dados observado do IMERG, durante o mês de Maio de 2015 sobre as diversas regiões selecionadas sobre a América do Sul. Na Região da Bacia do Prata (“*La Plata*”, nas Figuras 6.7a e a’), uma região chuvosa, com 24 hora de antecedência, os modelos se apresentaram em fase com os picos representados pela observação do IMERG. A partir de 48 horas de previsão, os modelos começaram a ficar fora de fase (em relação aos picos de precipitação observada) e em 72 horas, produziram os piores resultados. Nas figuras referentes à avaliação da precipitação sobre a região Sudeste (“*Southeast*”, nas Figuras 6.7b e b’), uma região com características mais secas, o modelo BAM (nas versões sem e com assimilação dados - “BAM-DAS”, nas figuras) não acerta o maior pico de precipitação representado pela observação, enquanto que o modelo GFS não acerta o acumulado. Entretanto, sobre esta região, as versões do modelo BAM, acertam nas situações em que a chuva tem menores acumulados.

Ainda na Figura 6.7, a avaliação sobre a região Novo Sudeste (“*Novo Southeast*”, Figuras 6.7b e b’), com 24 horas de antecedência, os modelos produziram a chuva em fase com a precipitação, embora as versões do modelo BAM (com e sem assimilação de dados, na versão V2.1.0 do SMG) subestimaram muito os acumulados observados. Com 48 horas de antecedência, os modelos começaram a sair de fase

com a observação e com 72 horas, o modelo BAM acerta apenas a precipitação de baixo acumulado no final do período. Nesta região, o modelo GFS é o modelo que está mais em fase com a observação. Sobre a região Centro-Oeste (“*Central-West*” nas Figuras 6.7c e c’), em geral os modelos representaram melhor os acumulados de precipitação. Destaca-se que o modelo BAM (sem assimilação de dados, inicializado com as análises do NCEP) capturou de forma satisfatória os picos de precipitação no dia 24 de Maio, com 24 e 48 horas de antecedência, enquanto que o modelo GFS acertou o pico de precipitação que ocorreu no dia 12 de Maio, com 72 horas de antecedência (embora, tenha subestimado os acumulados com 24 e 48 horas). A região Amazônica (“*Amazon*”, Figuras 6.7e e e’), a região mais úmida e de grandes acumulados, com 24 horas de antecedência, as versões do modelo BAM ou subestimaram, ou superestimaram, ou estiveram fora de fase em relação os dados do IMERG. Com 48 horas, no dia 13 de Maio, o experimento com o SMG V2.1.0 (“BAM-DAS”, nas figuras), acertou o acumulado de precipitação, mas também superestimou em outros dias do período considerado.

Na região mais seca da avaliação (durante o período considerado), o Nordeste (“*Northeast*”, Figuras 6.7d e d’), os acumulados em geral são mais baixos, porém observou-se que o modelo GFS superestimou a precipitação ao longo do período, sendo que as versões do modelo BAM, foram um pouco melhores (para 24 horas de previsão). Com 48 horas de antecedência, entre os dias 12 e 20, e depois entre os dias 23 e 26, os modelos superestimaram a precipitação, sendo o GFS o modelo que produziu os maiores acumulados. Sobre a América do Sul (Figuras 6.7f e f’), em geral, os modelos reproduziram melhor os acumulados com 24 e 48 horas do que 72 horas.

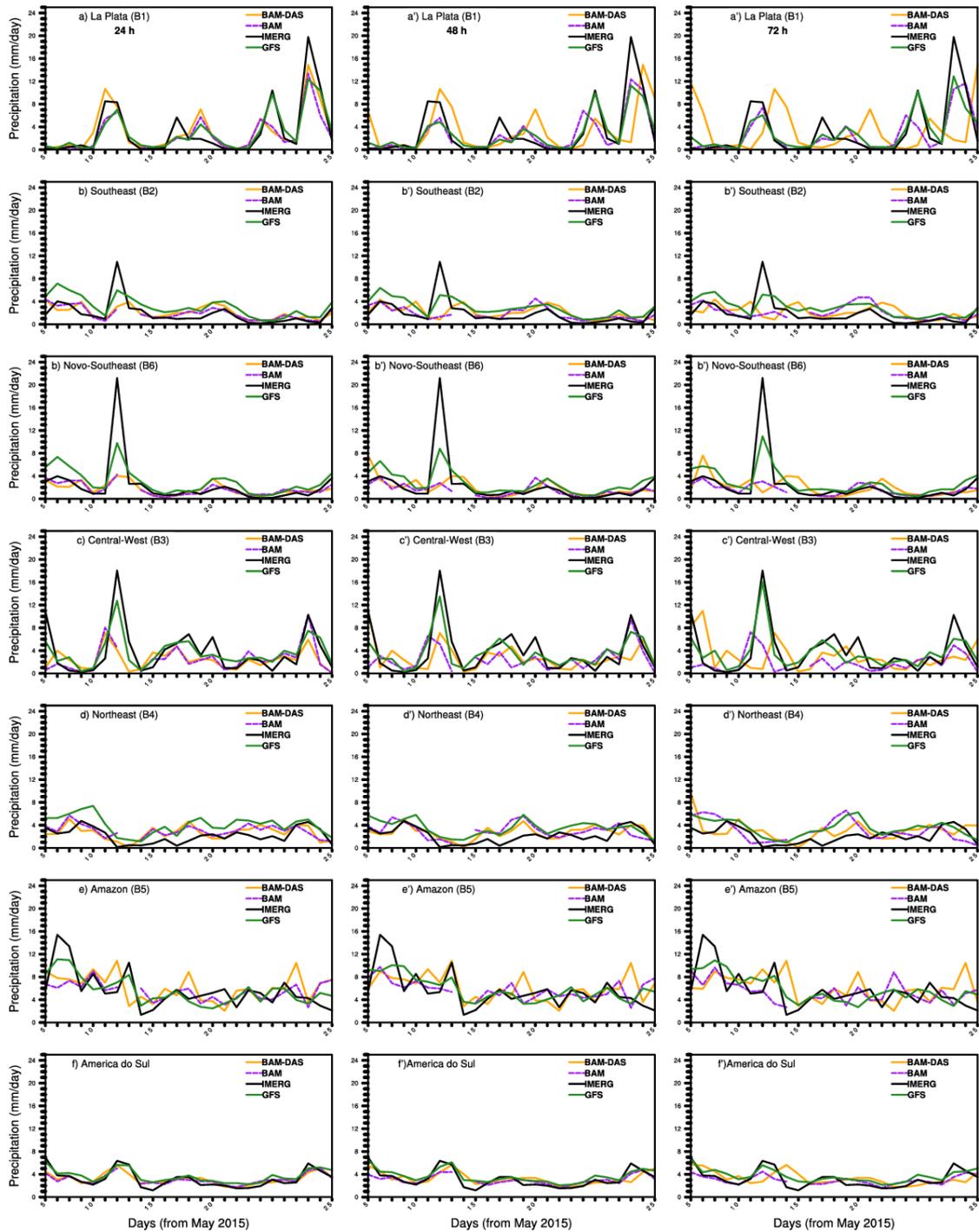


Figura 6.7 - Série temporal da precipitação (24, 48 e 72 horas) durante o mês de Maio de 2015. A comparação é feita para as regiões a Bacia do Prata (La Plata, figura “a”), Sudeste (Southeast, “b”), Sudeste (Novo-Southeast, “c”), Centro-Oeste (Central-West, “c”), Nordeste (Northeast, “d”), Amazônia (Amazon, “e”) e América do Sul (“f”), entre os modelos BAM inicializado com as análises do NCEP (roxo), BAM com as análises do SMG V2.1.0 (amarelo), GFS (verde) e IMERG (referência, curva preta).

A avaliação da precipitação do modelo BAM, em suas diferentes versões, considerando ou não a assimilação de dados da versão V2.1.0 do sistema SMG, mostra que, qualitativamente, o modelo tem muita dificuldade em reproduzir corretamente os acumulados de precipitação observados. Esta característica corrobora o fato de que a assimilação de dados, por outro lado, tem dificuldade em remover parte do erro sistemático do modelo atmosférico, embora seja capaz de ajudar a controlar o erro aleatório do modelo, como pode ser verificado na análise da Figura 6.5.

7 Conclusões, comentários finais e perspectivas futuras

Como o sistema está em fase de aprimoramento, a avaliação diagnóstica dessa versão do sistema é efêmera e outras mais atualizadas deverão ser realizadas de forma contínua. Cabe salientar que diversos pontos dessa avaliação ainda não foram apropriadamente contemplados, os quais serão tratados posteriormente. Nas próximas seções são destacados os resultados mais importantes em cada um dos diferentes aspectos da avaliação diagnóstica dessa versão e um roadmap dos próximos passos do desenvolvimento do SMG.

7.1 Resultados mais relevantes nos diferentes aspectos considerados

De forma geral, essa avaliação permite destacar alguns pontos mais relevantes de cada um dos aspectos abordados, os quais são listados abaixo em forma de tópicos nos quais a mesma sequência de apresentação dos mesmos no documento é mantida aqui para facilitar a comparação posterior com outras publicações futuras.

- **Categoria I: Implementação, aperfeiçoamento e Correções do SMG:**

1. **Implementação no código do SMG e correções de *bugs*:** De forma geral a versão do SMG apresentou resultados bastante satisfatórios no acoplamento do GSI com o modelo, como discutido no relatório de publicação da versão, e com os resultados obtidos aqui na assimilação dos dados. Obviamente que ainda muitos ajustes ainda são necessários mas no aspecto da implementação pode-se dizer que foi uma tarefa cumprida. A assimilação de dados de radiação demonstrou que está adequada, embora uma avaliação mais completa dessa variável ainda precisa ser realizada no futuro próximo;
2. **Otimização do código:** Essa tarefa não foi ainda contemplada nessa versão o que deverá ser feito posteriormente;
3. **Ajustes e configurações na física e dinâmica do BAM:** No geral, a versão V2.1.0 melhora a previsão da umidade, temperatura e ventos, principalmente nas primeiras horas de previsão. Por outro lado, houve piora na previsão da pressão em superfície e na altura geopotencial em 500 hPa. Isso pode ser um reflexo da redistribuição dos níveis sigma. Em relação às previsões de precipitação, o BAM do SMG V2.1.0 erra mais quando os acumulados ou são muito baixos

ou muito elevados. Há problemas também da representação da chuva, estando muitas vezes fora de fase com a observação. Estes itens estão sendo avaliados e nos próximos meses, com o apoio da equipe do modelo BAM da DMD, deverão ser melhorados.

- **Categoria II: Monitoramento e Configuração do Sistema de Assimilação**

1. **Implementação de melhorias na matriz B:** Dados aos bons resultados reportado pela versão SMG V2.1.0, pode-se afirmar que a matriz B utilizada nessa versão está coerente e adequada para os testes iniciais e principalmente para a geração de uma matriz melhor usando as saídas do próprio sistema, o que será feito na continuidade do processo usando um período de 3 meses de previsão. Essa fase é importante e poderá contribuir significativamente com a ampliação da eficiência da versão, uma versão futura específica para isso está sendo feita;
2. **Ajustes na minimização da Função Custo:** Com relação a isso a versão do SMG na resolução em uso se mostrou bons resultados com um padrão bem marcado de diminuição da função custo indicando ser um processo coerente ao que se espera. Isso deverá ser tratado de forma mais aprofundada no desenvolvimento futuro do SMG;
3. **Avaliação da contribuição da Injunção de Umidade:** Os resultados apresentados mostram que os valores de umidade supersaturada é muito mais impactante do que os valores de umidade negativa e precisa ser devidamente tratado. Enquanto que os pontos de umidade negativa é reduzido durante a assimilação em comparação com os campos do first-guess os casos de umidade supersaturada tendem a aumentar durante a evolução do processo. Os casos de umidade negativas estão concentrados na alta Troposfera nos últimos níveis do modelo, com os casos advindos do first-guess sempre elevados. Cabe destacar que é observado uma reduções dos valores de umidade negativa com a assimilação de dados na região dos andes. Nos caos da umidade supersaturada, embora tenha havido uma melhora significativa com relação a versão SMG_V1.0.0, a evolução temporal da área em que o problema ocorre ainda é significativa, a qual observa-se uma ampliação e intensificação durante a evolução do processo cíclico. Esses casos estão associados aos sistemas convectivos e portanto se concentram na

região tropical e na baixa troposfera;

4. **Avaliação da configuração dos parâmetros de Conservação de Massa Seca:** ainda não foi feita nessa nova versão do sistema mas deverá ser tratado posteriormente com uma rodada mais longa do mesmo.

- **Categoria III: Ampliação Gradativa e Controlada da Base de Dados com Avaliação do Impacto de cada Modificação**

1. **Inclusão dos Dados Convencionais:** Na assimilação dos dados convencionais os resultados indicam que em termos gerais a versão SMG V2.1.0 apresenta um padrão de assimilação dos dados semelhante ao observado no ECMWF. Os dados de radiossondas indicam que há uma melhora nos índices estatísticos com relação as versões anteriores com a mesma quantidade de dados utilizados, o que indica um aprimoramento do sistema de assimilação. Os valores do OmA médio são menores e há uma diminuição da dispersão dos resultados em torno dessa média o que é um bom indicativo dessa melhora. Observa-se uma diminuição no número de dados rejeitados com a nova versão do sistema, com exceção da umidade que apresentou um padrão oposto e deverá ser monitorado. Para os dados provenientes de sensores em aviões os resultados indicam que há uma melhora significativa na versão V2.1.0 com relação as anteriores, tanto no viés como na desvio padrão. Para os dados de sensores em navios os resultados indicam que tanto na pressão como nas componentes do vento observa-se uma diminuição no OmA médio embora o valor da desvio padrão não tenha sido modificado.
2. **Inclusão dos Dados de SatWind:** Embora ainda apenas superficial a avaliação do desempenho dessa base de dados no SMG mostra a importância da mesma, pois permite cobrir bem toda o globo e descreve bem os fluxos mais relevantes e indicam os maiores problemas no modelo com a avaliação dos dados rejeitados. Uma avaliação mais apurada é preciso ser apresentada na continuidade dessa atividade;
3. **Inclusão dos Dados de ROGNSS:** Nota-se que os resultados da assimilação de ROGNSS apresentados são semelhante entre ambas as versões do SMG. Porém, de forma geral os valores de OmA são levemente menores com o SMG V2.1.0 do que com a versão anterior.

Esse resultado reafirma a importância do aumento na resolução assim como as outras melhorias incluídas nesta nova versão;

4. **Inclusão dos Dados de Radiância:** Os dados de radiância ainda não foram devidamente avaliados aqui, o que deverá ser feito no futuro próximo.

7.2 Roadmap de curto prazo para o desenvolvimento do SMG

Os próximos passos no desenvolvimento do SMG segue o planejamento submetido a coordenação do CPTEC, o qual está em consonância com o planejamento das atividades em assimilação de dados no quadriênio 2016-2019. A tarefa é dar continuidade a evolução da versão com a melhoria do processo de assimilação de dados e diversas revisões da versão V2. serão internamente publicadas e uma avaliação de cada uma delas será feita da mesma forma e até mais sofisticada do que é apresentado no presente documento em função da evolução da metodologia de avaliação baseada nos protocolos.

Na próxima fase que seria nos próximos meses de 2019, será aprimorada a versão do sistema nessa resolução com a ampliação dos dados recebidos no CPTEC a ser tratado na próxima versão desse documento com a publicação da versão SMG V2.3.0. Essa versão deverá abordar de forma apropriada os seguintes temas:

- **Aprimoramento da Matriz B:** Está em fase avançada de desenvolvimento na divisão um sistema de atualização da matriz de erros do BAM, que a partir de um conjunto de previsões obtém-se uma matriz para o SMG na resolução desejada. A implementação desse sistema é o próximo passo para na evolução do SMG;
- **Aprimoramento da assimilação de radiância:** Sendo esse o maior desafio do CPTEC para o aprimoramento do sistema SMG, pois exigirá da equipe adquirir conhecimento necessário para avançar nessa tarefa. Diversos itens deverão ser abordados tais como utilização e ajustes na correção de viés, adição de outros sensores, em especial os hiper-espectrais;
- **Ajustes na configuração do BAM:** essa tarefa deverá ser apoiada pelo grupo de modelagem da DMD e tem o objetivo de aprimorar o modelo ao ser integrado com as análises gerados pelo SMG. Em cada uma das fases é preciso que esses ajustes devam ser reavaliados e refeitos conduzindo o processo de evolução do SMG de forma mais eficiente;

- **Ajustes nas injunções na minimização da função custo:** O GSI permite penalizar estados que não atendem condições definidas como desejáveis durante o processo de busca do estado que minimiza as incertezas. Esse processo de penalização pode ser controlado através de parâmetros na configuração do GSI. Duas são as injunções disponíveis no GSI que poderão ser exploradas nesse processo: a conservação de de massa seca e a umidade não física.

Essa lista de versões está em consonância com a proposta sobre as atividades de assimilação de dados da Divisão submetida a coordenação/chefia do CPTEC. Novas versões além desses do SMG deverão ser idealizadas no contexto do plano diretor em elaboração para o próximo quadriênio 2020-2023. Cabe lembrar que nessas próximas versões estarão envolvidas a combinação da assimilação híbrida, a previsão por conjunto e assimilação em modelos de superfície e em outras componentes do sistema terrestre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, H. B. d. **Uso da técnica de OSE para avaliar o impacto de observações no sistema de assimilação de dados global variacional tridimensional do CPTEC/INPE**. 142 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014-05-16 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18/2014/05.07.17.54>>. Acesso em: 25 ago. 2017. 82

BAÑOS, I. H. **Assimilação de perfis de rádio ocultação GPS no modelo global de PNT do CPTEC**. 145 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017-02-20 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.03.10.32>>. Acesso em: 25 ago. 2017. 82

BAÑOS, I. H.; SAPUCCI, L. F.; AVANCO, L. A.; DINIZ, F. L. R. Assimilação de dados de rádio ocultação gps do satélite metop-b e seu impacto nas previsões sobre a américa do sul. 2016. 82, 94

CAVALCANTI, I. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de Textos, 2016. ISBN 9788579752346. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6sYjDAAAQBAJ>>. 101

CUCURULL, L. Improvement in the use of an operational constellation of gps radio occultation receivers in weather forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 2, p. 749–767, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2009WAF2222302.1>>. 89

DERBER, J. Gsi overview. In: . Developmental Testbed Center, 2010. Disponível em: <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/presentations/2010_tutorial/L2-0628-GSI_Overview_JohnDerber.ppt>. 40

DERBER, J. C.; WU, W.-S. The use of tovs cloud-cleared radiances in the ncep ssi analysis system. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 8, p. 2287–2299, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2287:TUOTCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2287:TUOTCC>2.0.CO;2)>. 29

DTC. **Gridpoint Statistical Interpolation Advanced User's Guide Version 3.4.0.0**. Developmental Testbed Center, 2015. Disponível em: <<http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/index.php>>. 39

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. The brazilian global atmospheric model (bam): Performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme

and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547–1572, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-16-0062.1>>. 101

HUFFMAN, J. G.; BOLVIN, D. T.; BRAITHWAITE, D.; HSU, K.; JOYCE, R.; XIE, P. **NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG)**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V5.2_0.pdf>. 106

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; BERTIGER, W. I.; LEROY, S. S.; MEEHAN, T. K.; ROMANS, L. J.; SCHOFIELD, J. T.; MCCLEESE, D. J.; MELBOURNE, W. G.; THORNTON, C. L.; YUNCK, T. P.; EYRE, J. R.; NAGATANI, R. N. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the global positioning system. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 271, n. 5252, p. 1107–1110, 1996. ISSN 00368075, 10959203. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2889843>>. 80

LEE, L.; ROCKEN, C.; KURSINSKI, R. **Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Springer Singapore, 2001. ISBN 9789624301359. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PnhLD4pJthoC>>. viii, 81

MATTOS, J. G. Z. D.; SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; KHAMIS, E. G.; KUBOTA, P. Y. **Sistema de Modelagem Global (SMG) (Versão 1.0.0)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. 40

_____. **Sistema de Modelagem Global (SMG) (Versão 2.0.2)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (em preparação), 2018. 4, 12, 13, 15

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONCALVES, L. G. G. de; VILA, D. A. Combining trmm and surface observations of precipitation: Technique and validation over south america. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885–894, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>>. 104

SAPUCCI, L. F. Evaluation of modeling water-vapor-weighted mean tropospheric temperature for gnss-integrated water vapor estimates in brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 3, p. 715–730, 2014. ISSN 1558-8432 and 1558-8424. Acesso em: 25 ago. 2017. 82

SAPUCCI, L. F.; AVANÇO, L. A.; DINIZ, F. L. R.; PAVANI, C. A. B.; SALVADOR, N. M. C.; NEGRI, R. G.; MATTOS, J. G. Z. d. **Sistema de gestão e controle de qualidade de dados (GCQD) para assimilação nos modelos do CPTEC (Versão 1.3.3)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. 153 p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mte-m21b/2016/08.16.18.59>>. Acesso em: 31 ago. 2017. 41, 42, 44

SAPUCCI, L. F.; AVANÇO, L. A.; SALVADOR, N. M. C.; DINIZ, F. L. R.; GALANTE, R.; MATTOS, J. G. Z. d. **Sistema de gestão e controle de qualidade de dados (GCQD) para assimilação nos modelos do CPTEC (Versão 1.0 Básica)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. 88 p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/01.29.19.49>>. Acesso em: 31 ago. 2017. 41, 42

SAPUCCI, L. F.; DINIZ, F. L. R.; BASTARZ, C. F.; AVANÇO, L. A. Inclusion of global navigation satellite system radio occultation data into center for weather forecast and climate studies local ensemble transform kalman filter (letkf) using the radio occultation processing package as an observation operator. **Meteorological Applications**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 23, n. 2, p. 328–338, 2016. ISSN 1469-8080. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/met.1559>>. 82

SAPUCCI, L. F.; MATTOS, J. G. F. d.; SANTOS, A. F. d.; GONÇALVES, L. G. G. d.; BASTARZ, C. F.; SCHUBERT, D. V. Potencialidades do scamtec (sistema de avaliação de modelos numérico de previsão de tempo e clima) na avaliação de previsões de precipitação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA., 2011, Guarapari-SP Rio de Janeiro RJ. **Anais...** [S.l.]: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2011. Setores de Atividade: Pesquisa e desenvolvimento científico. Acesso em: 02 maio 2019. 93

WARNER, T. **Numerical Weather and Climate Prediction**. Cambridge University Press, 2010. ISBN 9781139494311. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6RQ3dnjE8lgC>>. 29

YANG, F. On the negative water vapor in the ncep gfs: Sources and solution. In: . [S.l.]: 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction., 2009. 29