



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

## **AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA DA EVOLUÇÃO DO SMG (VERSÃO 1.0.0)**

Luiz Sapucci  
João de Mattos  
Carlos Bastarz  
Eduardo Khamis  
Eder Vendrasco  
Fabio Diniz  
Ivette Banos  
Renato Galante Negri  
Cristiano Eichholz

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\_V1.0.0

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE  
Cachoeira Paulista  
Agosto de 2017

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: <pubtc@sid.inpe.br>

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

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

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

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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

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



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

## **AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA DA EVOLUÇÃO DO SMG (VERSÃO 1.0.0)**

Luiz Sapucci  
João de Mattos  
Carlos Bastarz  
Eduardo Khamis  
Eder Vendrasco  
Fabio Diniz  
Ivette Banos  
Renato Galante Negri  
Cristiano Eichholz

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\_V1.0.0

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE  
Cachoeira Paulista  
Agosto de 2017



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 *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI). A finalidade desse sistema é produzir as melhores previsões numéricas de tempo utilizando-se 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 recebido no CPTEC, ininterrupto e com a menor latência possível. Nesse processo envolve um trabalho conjunto da assimilação de dados, da modelagem global e dos especialistas em dados convencionais e de satélites, portanto 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, um primeiro de uma série de outros com os mesmos objetivos, visa apresentar uma avaliação diagnóstica do SMG para equalizar através de métricas quantitativas a evolução gradativa do sistema no desenvolvimento de novas versões. A avaliação diagnóstica de forma periódica visa contribuir com o aprimoramento do processo de assimilação de dados e modelagem numérica, o qual envolve correção de erros, ajustes nos parâmetros de minimização no sistema de assimilação, ampliação gradativa e cautelosa de um conjunto de dados de satélites, com testes; diagnósticos de problemas na modelagem, assimilação ou não dos dados; aprimoramento da matriz  $\mathbf{B}$  (matriz de covariâncias dos erros de previsão) entre outras tarefas. Como todos esses trabalhos são altamente correlacionados de forma que a modificação em uma frente impacta diretamente no desempenho da outra, uma metodologia de desenvolvimento em espiral é aplicada 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 V1.0.0, avaliada nesse documento é a primeira versão dessa proposta capaz de assimilar todos os sistemas observacionais disponíveis (convencionais e radiâncias) e, que portanto, faz por merecer esse esforço e justifica o investimento.

**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 ajuste do SMG, o qual relaciona as frentes de trabalho associadas na evolução do sistema. . . . .	7
4.1 Gráficos da função custo média nos horários 00-12 à esquerda e do respectivo desvio padrão à direita. Foram escolhidos 2 <i>outer loops</i> e para cada <i>inner loop</i> correspondente, o limite máximo de 50 e 150 iterações. . . . .	21
4.2 Gráficos da função custo média nos horários 06-18 à esquerda e do respectivo desvio padrão à direita. Foram escolhidos 2 <i>outer loops</i> e para cada <i>inner loop</i> correspondente, o limite máximo de 50 e 150 iterações. . . . .	22
4.3 Valores mínimos da função custo para cada ciclo. As linhas contínuas representam os resultados de controle (experimento EX2ORA) e as linhas tracejadas os resultados com inclusão da radiância na assimilação de dados (experimento EX1ALL, versão SMG_V1.0.0). . . . .	23
4.4 Valores finais máximos de $J_o$ Global dividido pelo número de observações para cada ciclo. As linhas contínuas representam os resultados de controle (experimento EX2ORA) e as linhas tracejadas os resultados com inclusão da radiância na assimilação de dados (experimento EX1ALL, versão SMG_V1.0.0). . . . .	24
4.5 Localização espacial dos valores de umidade negativa 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 avaliado. . . . .	28
4.6 Localização espacial 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 avaliado. . . . .	29
4.7 Serie temporal do somatório dos valores não físicos de umidade gerados nos experimentos EX0CNT (SMG_V0.0.1) e EX1ALL (SMG_V1.0.0) para diferentes faixas de latitude. . . . .	30
4.8 Perfis verticais do número de casos de umidade não física gerados nos experimentos EX0CNT (SMG_V0.0.1) e EX1ALL (SMG_V1.0.0) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado. . . . .	31
4.9 Séries temporais do casos de umidade não física gerados nos experimentos EX0CNT (SMG_V0.0.1) e EX1ALL (SMG_V1.0.0) para diferentes camadas do perfil vertical atmosférico. . . . .	32

4.10	Perfil do número de casos de umidade não física para as análises dos experimentos EXOCNT (convencionais) EX2ORA (conv+Satwind+ROGNSS) e EX1ALL (conv+Satwind+ROGNSS+AMSU-A). . . . .	34
4.11	Sensibilidade da injeção de umidade na conservação da massa seca do sistema GSI, durante Janeiro de 2013. . . . .	37
5.1	Todos os dados convencionais disponíveis para assimilação no dia 01 de Janeiro de 2013, sendo superior esquerdo para 00Z, superior direito para 06Z, inferior esquerdo para 12Z e inferior direito para 18Z. . . . .	42
5.2	Dados de velocidade do vento convencional para o dia 01 de Janeiro de 2013 às 12Z. Dados disponíveis (esquerda) e dados assimilados (direita). . . . .	43
5.3	Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de $uv$ , obtidos por radiossondagem (código 0220), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 0 hPa (topo do modelo), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z. . . . .	44
5.4	Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de $T$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 0 hPa (topo do modelo), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z. . . . .	45
5.5	Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de $q$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 300 hPa, no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z. . . . .	46
5.6	Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de $ps$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z. . . . .	47
5.7	Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis. Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus . . . . .	49
5.8	Distribuição espacial de todas as observações de vento assimiladas. Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus. . . . .	49
5.9	Distribuição espacial de todas as observações de vento rejeitadas. Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus. . . . .	50
5.10	Distribuição espacial da diferença entre a velocidade do vento assimilado e o <i>background</i> . Valores acumulados em caixas de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ graus. . . . .	50
5.11	Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis divididos por tipo. . . . .	51

5.12	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)). . . . .	53
5.13	Distribuição espacial dos perfis de ROGNSS assimilados no SMG para a data 2013010818 no nível de 0hPa no modelo em função dos satélites utilizados no SGI. A escala de cores nessa figura indicam os satélites envolvidos em cada perfil vertical assimilado. . . . .	59
5.14	Série temporal da diferença na quantidade de dados de refratividade assimilados (painel esquerdo) e rejeitados (painel direito) dos diferentes satélites LEO envolvidos na ROGNSS para o mês de Janeiro de 2013. . .	60
5.15	Perfis verticais das diferenças médias de observações de refratividade menos as análises (OmA) em função dos níveis de pressão, para cada experimento e para cada satélites. . . . .	62
5.16	Contribuição das observações de refratividade da ROGNSS em porcentagem (painel esquerdo) e normalizadas pelo número de observações utilizadas (painel direito), na redução da função custo nas análises geradas em cada ciclo de assimilação durante todo o mês de Janeiro de 2013, em cada experimento (CTL, curva roxa e EXP, curva verde). . . . .	63
5.17	Distribuição espacial de OmA (K) com correção de bias, durante os horários sinóticos. Considerando o canal 1 do experimento EX1ALL usando a versão SMG_V1.0.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19. . . . .	65
5.18	Número de observações assimiladas, por canal, do experimento EX1ALL usando a versão SMG_V1.0.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19. . . . .	66
6.1	Plotagens em barras para cada grupo de observação avaliado nos experimentos EX0CNT (azul), EX1ALL (verde) e EX2ORA (vermelho) realizados com o SMG, durante o mês de janeiro de 2013: (a) do impacto fracional das observações nas análises, a unidade é %; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é $10^7$ ; e (d) do impacto por observação, a unidade é adimensional. . . . .	68
6.2	Campos de precipitação total (mm/mês) produzidos pelo modelo BAM, a partir das análises do sistema SMG (figura de cima, à direita) e NCEP (figura de baixo). A comparação é feita com os dados observados dp GPCP (figura de cima, à esquerda). . . . .	71



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Exemplos dos códigos PrepBUFR e descrição das observações convencionais de $u$ , $v$ , $T$ , $q$ , $ps$ e $gps$ . . . . .	41
5.2 Relação dos números, <i>flags</i> de “use/notuse”, tipos e os respectivos satélites usados na assimilação de dados de ROGNSS no GSI. . . . .	56
7.1 Cronograma para o período de curto prazo (Set.2017 a Jan.2018) das atividades associadas as próximas versões de publicação do SMG divididas em duas frentes de trabalho: Avaliação diagnóstica e Desenvolvimento. . . . .	78

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 Introdução . . . . .</b>	<b>2</b>
1.1 Objetivo do documento . . . . .	4
1.2 Conteúdo do Documento . . . . .	5
<b>2 Estratégia de avaliação diagnóstica do SMG . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1 Metodologia empregada . . . . .	6
2.2 Ferramentas empregadas na avaliação . . . . .	10
2.3 Protocolos de avaliação diagnóstica do GSI . . . . .	11
2.4 Experimentos para a avaliação da evolução do sistema de assimilação no SMG . . . . .	12
<b>3 Categoria I: Implementação e aperfeiçoamento contidos na versão SMG em avaliação . . . . .</b>	<b>14</b>
3.1 Características da versão SMG versão 1.0.0 em avaliação . . . . .	14
<b>4 Categoria II-Monitoramento e Configuração do Sistema de Assimilação . . . . .</b>	<b>17</b>
4.1 Implementação de melhorias na Matriz B . . . . .	17
4.2 Minimização e Condicionamento da Função Custo Variacional . . . . .	19
4.3 Avaliação da Injunção de Umidade no controle de valores não físicos . . . . .	24

4.3.1	Eficiência da injeção de umidade na qualidade da análise no ciclo de assimilação . . . . .	25
4.3.2	Evolução dos valores não físicos de umidade no BAM dentro da modelagem cíclica. . . . .	26
4.3.3	Avaliação diagnóstica dos valores não físicos de umidade no SMG_V1.0.0	27
4.4	Avaliação da Conservação de Massa Seca na rodada cíclica do GSI . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Categoria III-ampliação Gradativa da Base de Dados . . . . .</b>	<b>39</b>
5.1	Inclusão dos Dados Convencionais . . . . .	39
5.1.1	Avaliação da Análise em termos do OmF e OmA . . . . .	43
5.2	Avaliação do uso dos dados de vento estimados a partir de satélites . . . . .	47
5.3	Inclusão dos Dados Radio ocultação GNSS . . . . .	52
5.3.1	Assimilação de dados de ROGNSS no GSI . . . . .	54
5.3.2	Avaliação do desempenho dos dados de ROGNSS no SMG_V1.0.0 . . . . .	58
5.4	Inclusão dos Dados de Radiâncias . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Avaliação da versão do ponto de vista do impacto dos dados nas previsões . . . . .</b>	<b>67</b>
6.1	Avaliação do impacto dos dados nas previsões numéricas geradas pelo BAM	67
6.2	Diagnóstico preliminar das previsões de precipitação . . . . .	69
<b>7</b>	<b>Conclusões, comentários finais e perspectivas futuras . . . . .</b>	<b>72</b>
7.1	Diagnóstico da versão SMG_V1.0.0 . . . . .	72
7.2	Lista de melhorias a serem implementadas na avaliação . . . . .	75
7.3	Roadmap de curto prazo para o desenvolvimento do SMG . . . . .	77
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>80</b>

## 1 Introdução

O Sistema de Modelagem Global (SMG) do CPTEC/INPE contempla como modelo de PNT o *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM) e o sistema de assimilação *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, as quais nas versões futuras será realizada em conjunto no SMG por meio da assimilação de dados híbrida utilizando-se a metodologia do *Ensemble Kalman Filter* em conjunto com o método variacional em três dimensões. Em uma versão mais avançada o mesmo tem a pretensão, mesmo que ambiciosa, de ser 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 das melhores PNT em escala global, com ênfase sobre a América do Sul, levando-se em conta todas as particularidades regionais. Entende-se por melhores previsões de tempo aquelas que sejam capazes de capturar o comportamento 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) Assimilação 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 com o Sistema de Modelagem por conjunto; (f) Preparação de uma estrutura de modelagem global como alicerces para outras componentes dos sistema terrestre como superfície continental, oceânicas 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 bastante ajustado para utilizar a análise que foi gerada a partir de suas previsões. Nesse aspecto deverá ser constante a corre-

ção de *bugs*, aprimoramentos dos processos, eficiência computacional, representação espacial e ajustes nas configurações de parâmetros necessários na metodologia envolvida nesse modelo. Com relação a outra componente desse processo, uma avaliação diagnóstica do processo de assimilação de dados deverá ser constantemente tratada, dedicando esforços para a avaliação do fluxo dos dados assimilados, para a qualidade dos mesmos, bem como para a eficiência do sistema de assimilação e do impacto das observações nas previsões. A apresentação dos primeiros resultados dessa avaliação rigorosa e constante é tratada no presente documento, sendo o primeiro de uma série de outros específicos para cada versão TAG publicada do sistema SMG seguindo sua estratégia de desenvolvimento do código.

A avaliação e diagnóstico do sistema SMG é feita em duas frentes de trabalhos: a primeira nos ajustes do modelo específico para ser utilizado com as análises geradas por esse sistema e, a segunda, nos ajustes do processo de assimilação de dados. Nestas duas frentes, destaca-se:

- Ajustes na dinâmica e física do modelo BAM: Realizada pelo grupo de modelagem para melhor aproveitar as correções fornecidas pelas observações na assimilação, os quais devem tratar de melhorias ou correções tanto na dinâmica como nas parametrizações físicas envolvendo também, opções na configuração e melhorias na versão do BAM para a assimilação, incluindo documentação;
- Ajustes no processo de assimilação de dados GSI: Nessa frente de trabalho visa essencialmente aprimorar o processo de assimilação de dados, no qual envolve correções de erros, ajustes nos parâmetros de minimização no sistema de assimilação, ampliação gradativa e cautelosa de um conjunto de dados de satélites, com testes, diagnosticando problemas na modelagem, assimilação ou nos dados, aprimoramento da matriz  $\mathbf{B}$ , entre outras tarefas.

Essa avaliação diagnóstica da evolução do SMG envolve um conjunto de ferramentas de avaliação disponíveis no CPTEC e que embora esteja diretamente ligada à atividades em assimilação de dados, conta com o apoio de colaboradores nas demais divisões do centro. Essa cooperação se efetiva e é crucial dada o expertise necessária para o tratamento adequado de toda a vasta 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 ensemble e da assimilação de outras componentes do sistema terrestre que estão contempladas na proposta do SMG.

Como o GSI é o mesmo sistema em todos os sistemas de modelagem utilizados na DMD, a metodologia utilizada aqui reuni todas as ferramentas de avaliação e diagnóstico da assimilação. Essa metodologia de avaliação tem a prerrogativa de facilitar que todos 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 e que desenvolva e implemente um protocolo de avaliação, que possibilite as conclusões sobre o desempenho da assimilação em cada uma das versões disponíveis. 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 envolvendo esses protocolos utilizados na elaboração desse relatório tem três distintas aplicabilidades, sendo elas:

- **Fase inicial:** ao utiliza-los no diagnóstico de problemas e definição do status na evolução da maturidade dos sistemas de modelagem com assimilação de dados em desenvolvimento.
- **Fase intermediária:** aplica-los na avaliação da qualidade dos resultados obtidos nas versões parciais de entrega do sistema que definirão sua operacionalidade, com os resultados documentados apropriadamente;
- **Fase avançada:** utiliza-los em processos de monitoramento dos sistemas durante o processo em operação, sendo essa avaliação feita constantemente, também em processos operacionais.

## 1.1 Objetivo do documento

O objetivo desse documento é apresentar uma metodologia de avaliação diagnóstica do SMG, através da organização da metodologia e apresentação dos primeiros resultados a serem utilizados como referência para medir a evolução do mesmo com a organização de outros de uma série de relatórios periodicamente produzidos. A ideia é que cada nova versão do sistema SMG possa receber uma avaliação semelhante e permita uma comparação. A versão avaliada nesse documento, objeto desse trabalho é a versão SMG\_V1.0.0. Mas detalhes sobre essa versão podem ser acessados em [Mattos et al. \(2017\)](#).

## 1.2 Conteúdo do Documento

Para atingir esse objetivo o documento apresenta na Seção 2 a metodologia de avaliação aqui empregada no âmbito da qualidade da análise, a qual se divide em três categorias, as mesmas que são abordadas em detalhes nas Seções 3, 4 e 5 desse documento. Na Seção 6 é avaliado o impacto da qualidade da análise na melhoria e eficiência do modelo 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 mais eficiente o processo.

## 2 Estratégia de avaliação diagnóstica do SMG

Essa avaliação diagnóstica visa essencialmente 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 e cautelosa de um conjunto de dados de satélites, com testes; diagnósticos de problemas na modelagem, assimilação ou não dos dados; aprimoramento da matriz  $\mathbf{B}$  entre outras tarefas. Todos esses trabalhos são altamente correlacionados de forma que a modificação em uma frente impacta diretamente no desempenho da outra. Uma metodologia específica para essa avaliação foi implementada, a qual é descrita em detalhes na próxima seção e características da mesma, como protocolos, lista de ferramentas utilizadas e os experimentos realizados para essa avaliação são apresentadas nas seções subsequentes.

### 2.1 Metodologia empregada

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 e aceitos ou absorvidos. Para que esse desenvolvimento tenha êxito é muito importante que se tenha de forma fácil uma metodologia de avaliação para cada um desses aspectos do processo, o que é tratado aqui como protocolos de avaliação. A Figura 2.1 abaixo mostra um esquema ilustrativo da ideia e relaciona as frentes de trabalho com a metodologia de desenvolvimento em espiral.

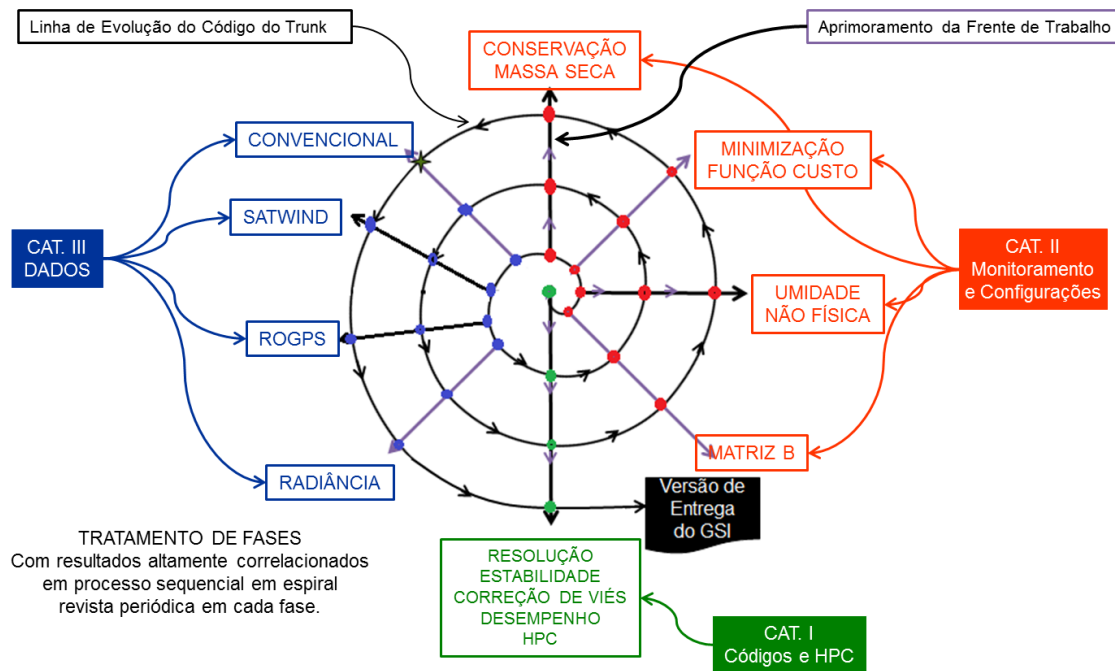


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo da metodologia de desenvolvimento e ajuste do SMG, o qual relaciona as frentes de trabalho associadas na evolução do sistema.

Como mostra a Figura 2.1, o processo envolve 9 frentes de trabalho divididas em 3 categorias. As três categorias são implementação do código (com correções e melhorias computacionais), o monitoramento e configuração do sistema e a última a ampliação da base de dados. Essas categorias são listadas abaixo e melhor detalhadas nas seção subsequentes onde o sistema é avaliado em cada um desses aspectos utilizando protocolos de avaliação, com resultados apresentados e discutidos apropriadamente.

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

1. Implementação, melhorias e otimização do código visando novas funcionalidades e melhor desempenho computacional: Essa frente de trabalho objetiva continuamente tratar da evolução das versões da assimilação acoplada ao BAM com a implementação no código de novas funcionalidades e tratar 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



especial mais adequada ao encontrar meios de aumentar o desempenho computacional do sistema ao identificar gargalos computacionais e trabalhar para minimizá-los. Nessa frente está envolvida a tarefa constante 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 Configuração do Sistema de Assimilação**

1. Implementação de melhorias na matriz  $\mathbf{B}$ , com o uso de um maior período de dados e usando a versão do SMG com assimilação: Tratará de 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. Em um processo iterativo, essa frente de trabalho visa permitir monitorar o impacto correlacionado com as outras melhorias no 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 de dados GSI, a minimização e o condicionamento da função custo variacional é a parte do sistema de assimilação de dados que irá 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 Injunção 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, 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 rodada 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 caso do GSI no 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: Ampliação Gradativa e Controlada da Base de Dados com Avaliação do Impacto de cada Modificação**

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 geoestacionária 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 diagnosticado e monitorado;

4. Inclusão dos Dados 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, exploram as ferramentas disponível no CPTEC e permite a avaliação do SMG de forma robusta. Essas ferramentas são:

**STAT** - pacote de estatística da assimilação de dados no GSI O STAT é uma ferramenta que faz parte dos protocolos, as quais contem 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 *Observation minus Forecast* (OmF) e *Observation minus Analysis* (OmA) de toda a base de dados disponível para assimilação. Essa pacote calcula os seguintes itens:

- Organização dos dados de OmF de toda a base de dados;
- Organização das informações do OmA de todos os dados assimilados;
- Contabilização dos dados assimilados por tipos e subtipos;
- Análises diversas que deverão ser avaliadas e melhor explorada no futuro.

**SCANTEC** - Sistema Comunitário de Avaliação de modelos Numéricos de Tempo E Clima que tem o objetivo principal de explorar as métricas mais robustas para a adequada avaliação dos modelos de PNTC, as quais atendam a todos os quesitos esperados nesta tarefa - tanto pelos desenvolvedores de modelos numéricos de PNTC, 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.

**SAI** - Sistema de Avaliação de Impacto dos dados na previsão numérica de tempo O objetivo é a avaliação do impacto de toda a base de dados na qualidade final

da previsão de tempo gerada operacionalmente no CPTEC, permitindo que seja quantificado os benefícios de cada sistema de observação, bem como diagnosticadas as suas deficiências e possíveis imperfeições quando for o caso.

### 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 é chamado de 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*, rotinas 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. 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 especialista, 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 monitorando através da disponibilidade de um protocolo de avaliação onde um valor tido como de referência deve ser disponibilizado;
- Manter uma metodologia de avaliação mais avançada para uma análise 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 auxiliar-las na solução de problemas relacionadas 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 no que se refere ao aspecto abordado pela equipe para cada uma das versões

do SMG publicada no ramo TAG do SVN.

Esses protocolos têm a prerrogativa de facilitar que todos os diversos aspectos da assimilação sejam tratados simultaneamente na evolução do processo ao fornecer metodologias eficientes que avaliem facilmente todos esses 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 aqui 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 teria três distintas aplicabilidades, 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 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 Experimentos para a avaliação da evolução do sistema de assimilação no SMG

Para avaliar o desempenho do sistema de assimilação da versão SMG\_V1.0.0 nos oito aspectos listados acima foram realizados 3 diferentes experimentos para todo o mês de janeiro de 2013 (2013010100-2013013118), os quais são detalhados nos tópicos abaixo:

- **EX0CNT Experimento com a versão V0.0.1 usando apenas dados convencionais**: Nesse experimento foram utilizadas a versão tag SMG\_V0.0.1 a qual é a versão anterior do sistema publicada com correções de

*bugs* e contemplando apenas a assimilação de dados convencionais. Uma comparação com essa versão permite identificar a evolução da atual versão em comparação com essa como controle.

- **EX1ALL Experimento com a versão V1.0.0 assimilando dados convencionais, SatWind, ROGNSS e radiâncias do AMSU-A:** Nesse experimento foi utilizada a versão tag `SMG_V1.0.0` a qual é a atual versão do sistema em publicação e avaliação nesse documento. Nesse experimento todos os dados de SatWind e ROGNSS foram assimilados. Apenas os dados de radiância do sensor *Advanced Microwave Sounding Unit-A* (AMSU-A) foram assimilados embora a avaliação desses dados não será realizada nessa versão, o que deverá ser feita apropriadamente na próxima versão do sistema. Esse experimento será comparado com o anterior para a avaliação de alguns aspectos abordados nessa análise.
- **EX2ORA Experimento com a versão V1.0.0 assimilando dados convencionais, SatWind, ROGNSS:** É o mesmo experimento anterior sem a assimilação dos dados do AMSU-A. Obviamente para a avaliação do desempenho de dados como SatWind e ROGNSS na estratégia de evolução do SMG, há a necessidade de realizar um terceiro experimento mostrando uma evolução (assimilação de radiância) com ambos assimilando os dados de ROGNSS e SatWind. Para o monitoramento do desempenho da assimilação desses dados no sistema uma comparação entre os experimentos EX1ALL e EX2ORA se mostra apropriada.

### 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, mas associada com a interação do 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, novas parametrizações e componentes do sistema de modelagem;
- Implementação e otimização do código visando melhor desempenho computacional com o refinamento da resolução espacial;
- Ajustes na configuração da dinâmica do modelo BAM realizada pelo grupo de modelagem para melhor aproveitar as correções fornecidas pelas observações na assimilação;
- Ajustes na física do modelo BAM realizada pelo grupo de modelagem, tanto na inclusão de novas parametrizações como na escolha dessas ou mesmo ajustes nos parâmetros usados, isso para melhor aproveitar as correções fornecidas pelas observações na assimilação;
- 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 versão 1.0.0 em avaliação

Aqui é apresentado um resumo sucinto do que foi contemplada na elaboração da versão SMG\_V1.0.0 e mais detalhes podem ser acessados em [Mattos et al. \(2017\)](#) o qual é o relatório de publicação dessa versão. De forma geral, nessa versão diversos *bugs* foram corrigidos e a interface foi avaliada se estava correta e diversos pontos foram sendo tratados com a inclusão dos dados 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 necessitarão de atenção. Com relação aos pontos listados acima, o que pode ser destacado na presente versão é:

**Implementação no código do SMG:** No que compete ao acoplamento do modelo BAM com a assimilação de dados, a principal modificação está relacionada 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, o que foi a maior e mais importante implementação realizada na presente versão. Foi também modificado 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. 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:** A atual versão em avaliação tem a resolução TQ0062L028 a qual é bastante apropriada, pois ajustes grosseiros exigem rodadas longas e nessa resolução o custo não é alto e se consegue avançar em diferentes frentes de teste e validação de forma simultânea. Foi realizada uma avaliação inicial para mudança de resolução espacial de TQ0062L028 para TQ0213L064, o que deverá ser efetivada 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 foi feito, tais como: Modificações na parametrização de arrasto de ondas de gravidade; Atualização nos aerossóis climatológicos; Atualização na escrita de variáveis prognósticas; Inclusão da escrita das classes de solo do modelo SSiB;

**Correções de *bugs*:** Diversos foram os *bugs* encontrados no sistema tanto no GSI, no BAM como no acoplamento do modelo com o GSI, os quais foram corrigidos e reportados adequadamente, tais como: Correção de *bugs* na leitura da tabela “sat-bias\_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; Correções de *bugs* no *restart* relacionadas a convecção.

Essa versão poderá ser pré-operacionalizada na resolução TQ0062L028 (truncamento triangular na onda zonal de número 62 e estrutura vertical de 28 níveis) caso hajam recursos computacionais e fluxo de dados adequado. O presente documento apresenta um diagnóstico dos resultados obtidos que podem orientar se são suficiente para que o processo pré-operacional seja efetivado.

## 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 experimentos EX0CNT (SMG\_V1.0.0.0 com dados convencionais) com os resultados do experimento EX1ALL (SMG\_V1.0.0 com todas as fontes de dados), com o intuito de apenas demonstrar a sensibilidade das modificações na base de dados nos resultados da análise nesses aspectos.

### 4.1 Implementação de melhorias na Matriz $\mathbf{B}$

A matriz de covariâncias dos erros de previsão (matriz  $\mathbf{B}$ ), representa as inter-relações 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 as previsões de 48 e 24 horas, as quais são obtidas a partir de simulações do modelo BAM. Desta forma, à medida em que o modelo atmosférico é desenvolvido, 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.

Dentre as diversas melhorias que podem ser realizadas no contexto da determinação da matriz de covariâncias do SMG, cita-se as seguintes em uma ordem crescente de complexidade e conseqüentemente mais adequada para o SMG:

- Refazer o processo de geração da matriz a partir dos pares de previsões necessários para o cálculo da matriz  $\mathbf{B}$  usando o modelo BAM com as análises geradas pelo SMG\_V1.0.0 em um período curto de três meses. Essa versão é para que os ajustes mais importantes sejam realizados e permita que o sistema possa ser integrado para período mais longos;
- Realização de um experimento de mais longo prazo (e.g., 1 ano) para se obter os pares de previsões necessários para o cálculo da matriz  $\mathbf{B}$ . Este experimento deve ser realizado com os ciclos de assimilação de dados do

SMG, utilizando uma versão prévia da matriz de covariâncias, com o objetivo de se refinar a representação das estruturas da matriz;

- Ajuste fino dos parâmetros principais da aplicação da matriz de covariâncias  $\mathbf{B}$  (e.g., comprimentos de escala, amplitudes, aplicação dos filtros recursivos etc) no sistema de assimilação de dados GSI do SMG;
- Utilização ou a combinação de outras metodologias para a determinação da matriz de covariâncias. Atualmente, o método denominado *Numerical Modeling Center* (NMC) é utilizado para a determinação das covariâncias, por ser um método bem difundido e aplicado globalmente. Porém, outras metodologias podem ser empregadas com o objetivo de se melhorar a determinação e a representação das covariâncias. Por exemplo, redes neurais podem ser utilizadas em um treinamento para se extrair as principais características dos pares de previsões utilizados ou de um conjunto delas;
- A matriz de covariâncias aplicada ao sistema de assimilação 3DVar do GSI, representa as estruturas de covariâncias de forma fixa no tempo. Isso significa que estas estruturas são as mesmas, independente das atualizações do fluxo atmosférico. Como forma de minimizar este impacto, o sistema GSI está habilitado para calcular tendências temporais entre as previsões de curto prazo utilizadas na determinação da análise, com o objetivo de conferir um aspecto anisotrópico às covariâncias. Apesar disso, esta característica não possui dependências físicas, o que torna a aplicação das covariâncias susceptível à erros. Este é um aspecto que pode ser melhorado com o desenvolvimento de uma matriz de covariâncias que possa ser atualizada no tempo, como uma média móvel, em que as covariâncias são atualizadas com base em uma média (temporal) e com base nas previsões de 48 e 24 horas recém calculadas.

Todas essas melhorias na adequação da matriz de covariâncias dos erros de previsão serão acompanhadas e será monitorado o impacto das mesmas nos demais aspectos em que essa avaliação é composta. Informações sobre a matriz  $\mathbf{B}$  contida na versão V1.0.0 em avaliação aqui podem ser acessadas no relatório de lançamento da versão do SMG\_V1.0.0 (MATTOS et al., 2017). Nos próximos estágios de evolução do sistema SMG, uma nova versão da matriz de covariâncias vai ser implementada o que irá requerer um novo ciclo de avaliação diagnóstica devido a alta correlação dessa modificação com os demais aspectos avaliados. O próximo passo da evolução

é a primeira opção da lista acima que é a mais simples e por isso a mais viável para o momento.

Com relação ao protocolo de avaliações diagnósticas da matriz de covariâncias dos erros de previsão, tem-se por objetivo determinar um parâmetro que indique, ou quantifique, o quão adequada é aquela matriz para a versão em avaliação com relação a uma versão anterior a essa melhoria. Esse protocolo ainda está em fase de estudos e implementações. Resultados preliminares deverão ser publicadas nas versões futuras nessa serie de avaliações diagnósticas.

## 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 incerteza 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 de forma sucinta, uma avaliação da versão do SMG\_V1.0.0 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 desse, há pelo menos dois outros métodos alternativos de minimização disponíveis na atual versão do GSI empregado no SMG\_V1.0.0, 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 aumento significativo do número de iterações no processo de minimização. Assim, da versão anterior do SMG para a atual versão V1.0.0 houve uma ampliação significativa no número de iterações de laço externo (*outer loop*) e de laço interno (*inner loop*). Os valores passaram de 1 e 15 na versão SMG\_V0.0.0 para 2 e 50/150 na versão SMG\_V1.0.0, respectivamente. Para efetivar essa configuração, foram definidos no *namelist* os parâmetros “miter=2”, “niter(1)=50” e “niter(2)=150”. Existe um critério de parada caso a convergência tenha sido alcançada. Então, nem sempre a minimização continua até chegar no limite máximo de iterações. Esses valores foram definidos após um estudo do desempenho da versão atual do sistema e como

a resolução não é alta, o número de iterações ainda não é um gargalo. Esses valores deverão ser revistos nas versões futuras com o aumento dos dados observacionais e resolução espacial do modelo. Em resumo, após esse processo de avaliação para a definição dos parâmetros, os seguintes parâmetros resultaram em estabilidade e convergência da função custo:

```
numero de processadores: 72
miter=2, niter(1)=50, niter(2)=150
```

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 das revisões anteriores. Nessa análise as informações de saídas disponibilizadas nos arquivos “fort.220” de cada rodada são filtrados e valores da média e desvio padrão são calculados. Figuras são geradas das médias em diferentes horários: 00-12 e 06-18. Dos arquivos “fort.220” também são extraídos os valores mínimos da função custo em função dos ciclos em forma de tabela. Dos arquivos “stdout” são extraídos os valores finais de  $J_o/nobs$  em função dos ciclos em forma de tabela. O GNUplot gera figuras com esses valores mínimos, os quais são apresentados abaixo.

Essa avaliação foi aplicada nos resultados do experimento EX1ALL (vide Seção 2.4) e os valores da média da função custo e desvio padrão (vide Figuras 4.1 e 4.2) foram gerados a partir do arquivo “fort.220” de cada ciclo de assimilação. O período utilizado foi o mesmo das demais avaliações (Janeiro de 2013), separando-se os horários 00-12 de 06-18 por terem uma grande variação do número de observações disponíveis. Uma comparação com a Versão anterior do sistema não é possível pois o número de iterações e o número de observações é muito diferente, o que os torna incompatíveis para uma comparação. Nas futuras avaliações, as curvas mostradas nas Figuras 4.1 e 4.2) serão utilizadas como a curva de controle onde a análise deverá ser feita. Melhorias na apresentação dos resultados com o desvio padrão e a média no mesmo gráfico serão realizadas nas avaliações futuras.

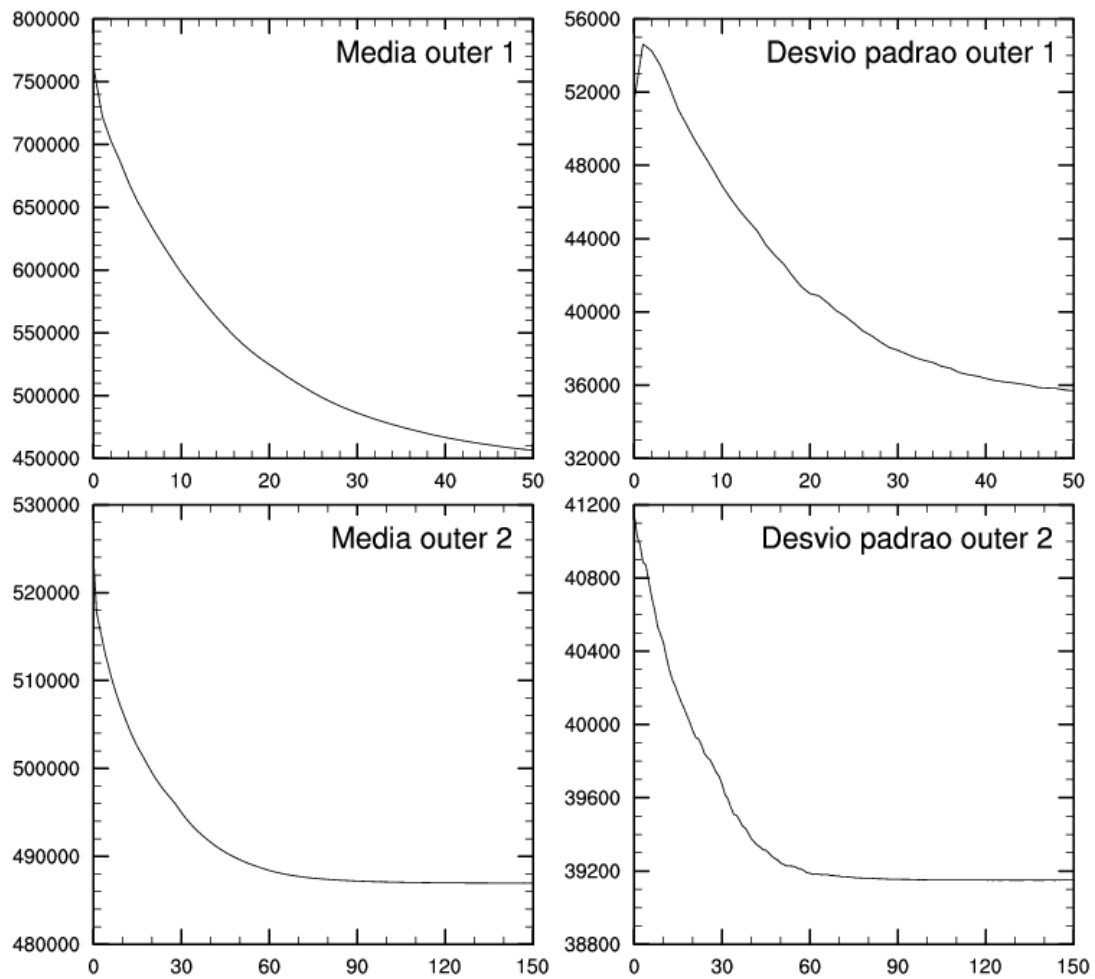


Figura 4.1 - Gráficos da função custo média nos horários 00-12 à esquerda e do respectivo desvio padrão à direita. Foram escolhidos 2 *outer loops* e para cada *inner loop* correspondente, o limite máximo de 50 e 150 iterações.

De forma geral, os resultados mostrados nas Figuras 4.1 e 4.2 indicam que o comportamento é semelhante nos distintos horários (com mais dados em comparação com os horários com menos dados), embora os valores numéricos sejam bastante diferentes. No que se refere ao comportamento das curvas durante a minimização, observa-se que no término do primeiro *outer loop* a curva ainda indica um comportamento de queda, isso mostra que apenas 50 iterações não são suficientes e poderia ser utilizado um valor maior. Por outro lado, o comportamento do segundo *outer loop* indica que a modificação da curva depois das primeiras 90 iterações é muito pequena, isso mostra que 150 iterações foi um número excessivo e um valor menor poderia ser utilizado. Essa análise pode ajudar a melhor definir os parâmetros mais adequados quando esse processo passar a ser um problema computacional

significativo na evolução do sistema.

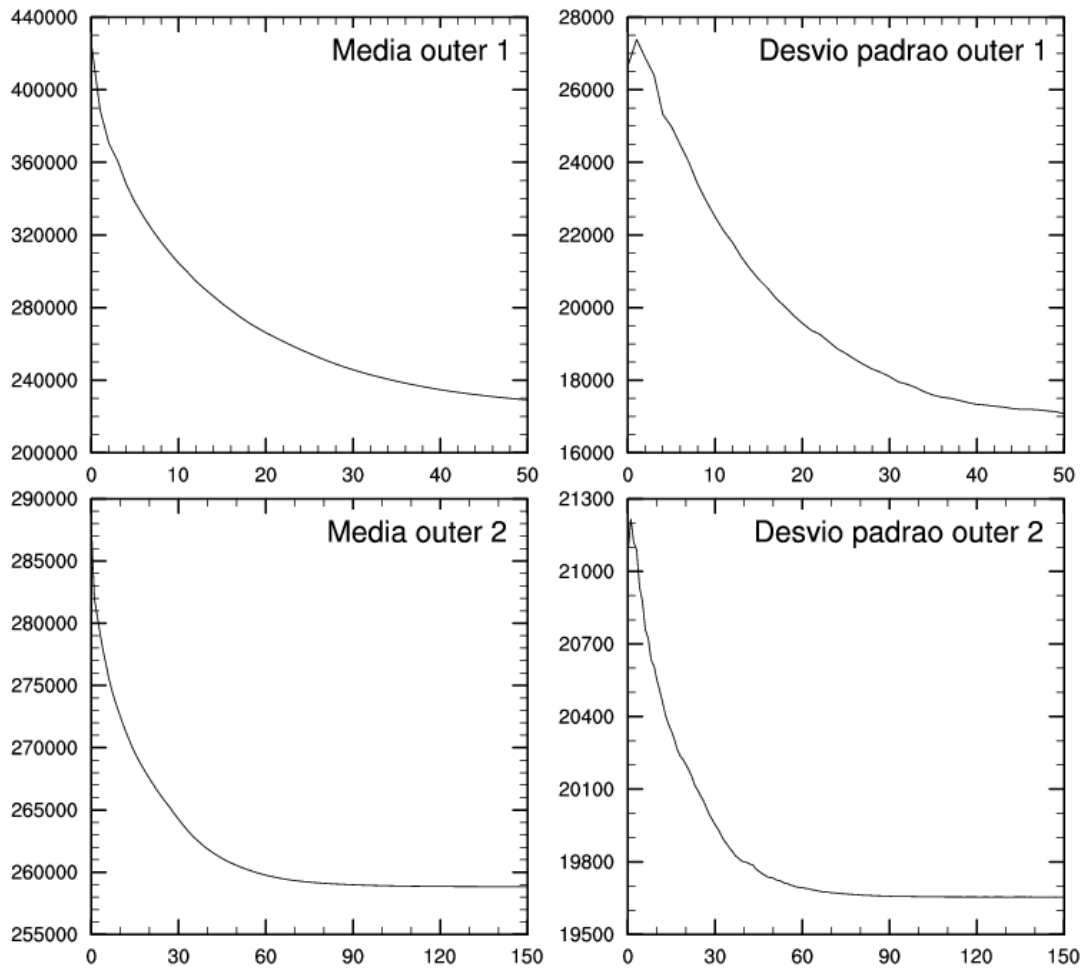


Figura 4.2 - Gráficos da função custo média nos horários 06-18 à esquerda e do respectivo desvio padrão à direita. Foram escolhidos 2 *outer loops* e para cada *inner loop* correspondente, o limite máximo de 50 e 150 iterações.

Avaliando os resultados referentes à função custo, foi feita uma comparação dos resultados entre os experimentos EX1ALL e EX2ORA aqui considerado de controle, uma vez que uma comparação coerente com a versão SMG\_0.0.1 não é possível. Essa comparação pode ser vista nas Figuras 4.3 e 4.4 onde tem-se os perfis dos valores mínimos da função custo para cada ciclo e os valores finais máximos de  $J_o$  Global normalizados pelo número de observações para cada ciclo, respectivamente. Os resultados em ambas as figuras são redundantes, a normalização tem a função de levar em consideração o número de observações assimiladas, embora não tenha

surtido o efeito esperado mantendo os mesmos padrões, com pequenas modificações.

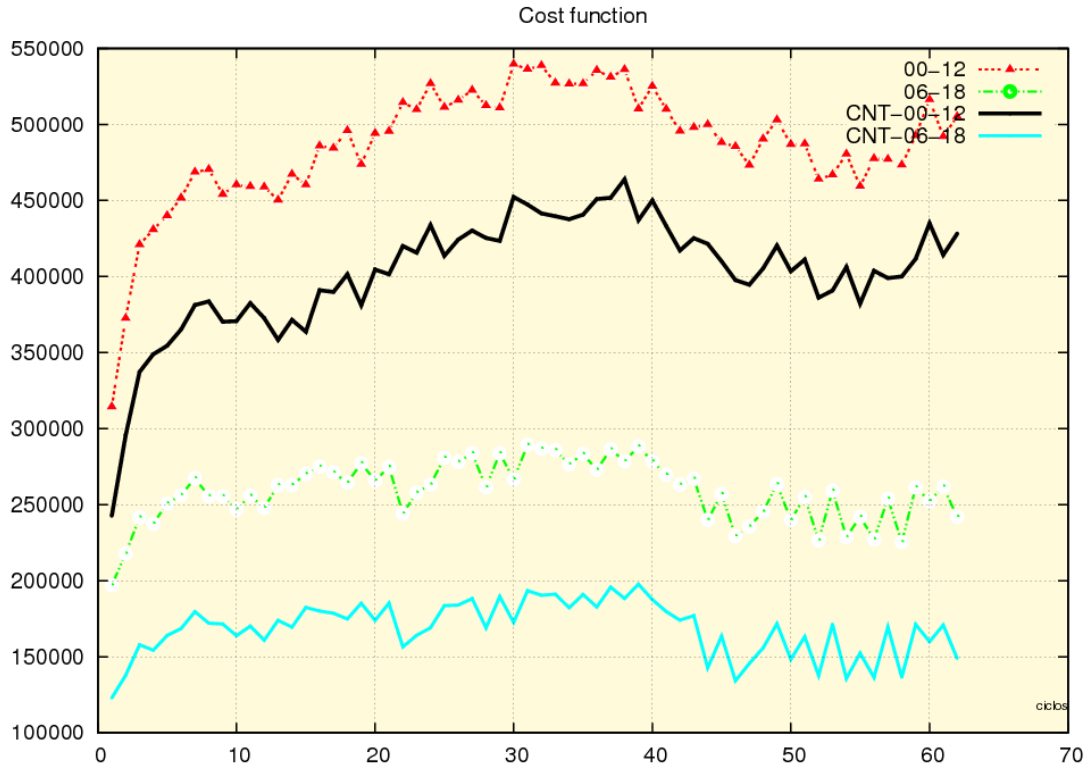


Figura 4.3 - Valores mínimos da função custo para cada ciclo. As linhas contínuas representam os resultados de controle (experimento EX2ORA) e as linhas tracejadas os resultados com inclusão da radiância na assimilação de dados (experimento EX1ALL, versão SMG\_V1.0.0).

Os valores maiores na Figura 4.3 para o experimento SMG\_V1.0.0 estão associados ao maior número de dados observados com a inclusão dos dados do ASMU-A. Os resultados apresentados na Figura 4.4 indicam que o comportamento do final da minimização no período avaliado da versão SMG\_V1.0.0 apresenta uma sutil tendência de aumento e que merece um período de avaliação maior para avaliar o comportamento da curva na integração mais longa. A tendência ideal da curva não é apenas o aumento, mas que esse aumento esteja vinculado com o aumento do número de observações assimiladas.



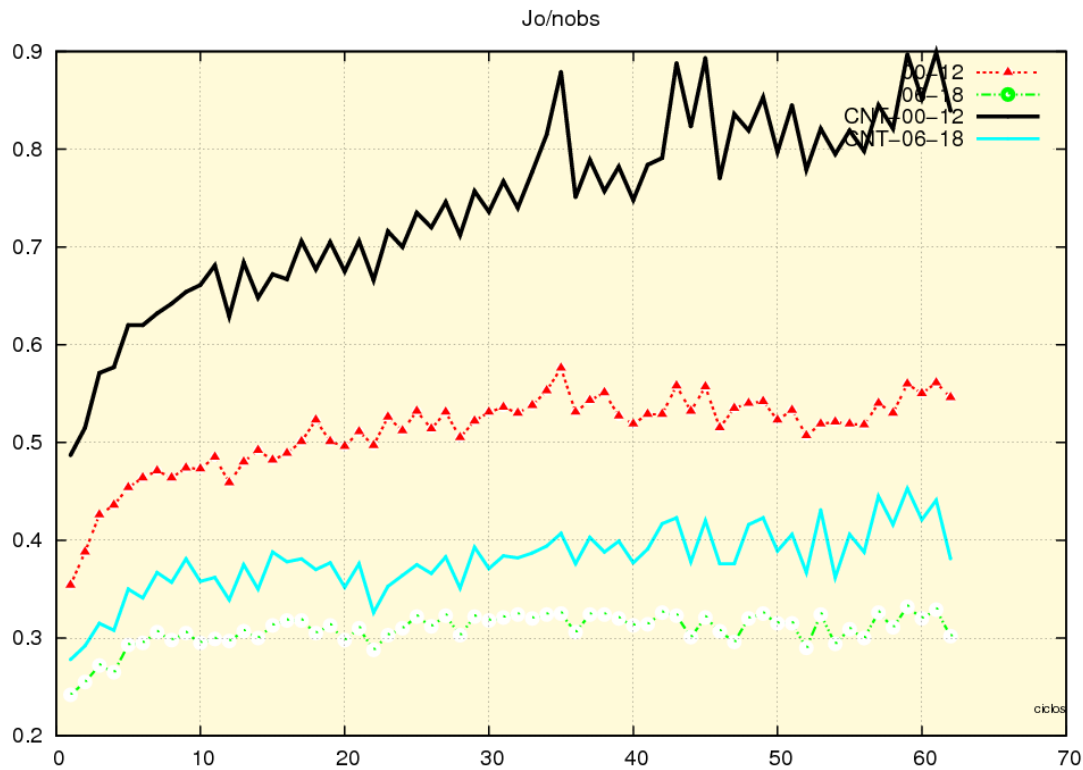


Figura 4.4 - Valores finais máximos de  $J_o$  Global dividido pelo número de observações para cada ciclo. As linhas contínuas representam os resultados de controle (experimento EX2ORA) e as linhas tracejadas os resultados com inclusão da radiação na assimilação de dados (experimento EX1ALL, versão SMG\_V1.0.0).

Como já foi discutido, essa avaliação deverá ser refeita em todos os relatórios de avaliação diagnósticos das versões do SMG, na qual em sua elaboração e publicação, novos estudos para buscar novos parâmetros para a minimização da função custo, bem como selecionar outros métodos de minimização deverão ser realizados periodicamente. Isso é especialmente importante quando mais observações forem incluídas, a resolução espacial for refinada ou se o sistema apresentar instabilidade computacional em rodadas mais longas.

### 4.3 Avaliação da Injeção 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 apresentado 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 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  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  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 injunção no processo de obtenção da análise através da minimização da função custo do GSI. Definir esses parâmetros adequadamente é a principal função dessa atividade. Esses parâmetros são definidos através do *namelist* do GSI, mais especificamente nas variáveis “factqmin” e “factqmax”. Quando nulos, da forma como está inicialmente implementado no SMG\_V1.0.0, os termos de penalidade de umidade não física estão desabilitados.

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 injunção 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.

#### **4.3.2 Evolução dos valores não físicos de umidade no BAM dentro da modelagem cíclica.**

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).

Para tratar da evolução dos valores não físicos na integração do modelo BAM dentro do SMG, diversas atividades deverão ser listadas aqui e trabalhadas oportunamente para a implementação das novas versões do SMG. Uma lista de possíveis atividades que merecem uma avaliação é apresentada como segue:

- Diagnóstico do papel das transformadas do espaço espectral para ponto de grade na interface do SMG na geração de valores não físicos de umidade;
- Diagnóstico da advecção vertical do BAM na geração de valores não físicos de umidade e sua iteração/evolução dos valores gerados no ciclo de assimilação;
- Identificação de outras possíveis fontes geradoras de valores não físicos de umidade da modelagem com o BAM;
- Avaliação de cada uma das parametrizações disponíveis do ponto de vista do impacto/geração de valores não físicos de umidade.

#### **4.3.3 Avaliação diagnóstica dos valores não físicos de umidade no SMG\_V1.0.0**

Como essa avaliação é a primeira em que se avalia o comportamento e a evolução dos valores não físicos de umidade na assimilação de dados do CPTEC, a análise dos resultados aqui apresentados é puramente diagnóstica do status da versão SMG\_V1.0.0. Nessa análise é apresentada de forma comparativa com os resultados obtidos com a versão anterior V0.0.1, para que se possa avaliar o quanto a evolução do sistema impactou na geração desses casos de umidade não física. Nessa mesma linha de trabalho uma avaliação em função da evolução das bases de dados utilizadas se mostra também interessante. A apresentação dos resultados e a análise dos mesmos é puramente descritiva visando caracterizar os casos tanto no tempo como no espaço dentro do intervalo de tempo avaliado nesse trabalho. Essa caracterização será muito útil para monitorar esses casos com a evolução do sistema SMG nas futuras entregas visando a operação. Como não foi modificado os parâmetros das injunções de umidade no processo de minimização no GSI, a comparação entre diferentes experimentos é apenas para entender a complexidade do problema a ser atacado posteriormente.

Para facilitar a avaliação e monitoramento dos casos não físicos de umidade no processo de assimilação, o protocolo de avaliação 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. O protocolo foi utilizado para processar as saídas dos experimentos EX1CNT que utilizou a versão SMG\_V0.0.1 e apenas dados convencionais e o experimento EX1ALL que utilizou a versão SMG\_V1.0.0 e todos os tipos de dados com a radiação apenas do sensor AMSU-A. Além desses o experimento EX2ORA também é usado pois nele não foi assimilado os dados de radiação do AMSU-A. Em uma comparação dos três experimentos permite diagnosticar o efeito da evolução da base de dados na geração de valores de umidade não física no ciclo de assimilação.

A primeira análise aqui apresentada é a localização geográfica e a concentração espacial dos casos não físicos de umidade e avaliar se os mesmos cobrem todo o globo e se é possível identificar um padrão que revele suas principais causas. A Figura 4.5 apresenta os resultados dessa análise para os valores de umidade negativa para a rodada da versão SMG\_V1.0.0 e a Figura 4.6 mostra essa mesma análise para o caso dos valores de umidade supersaturada. Como as figuras evidenciam embora os dois casos ocorram e precisam de ser tratados, o problema dos valores de umidade supersaturada é muito mais impactante do que os valores de umidade negativa.

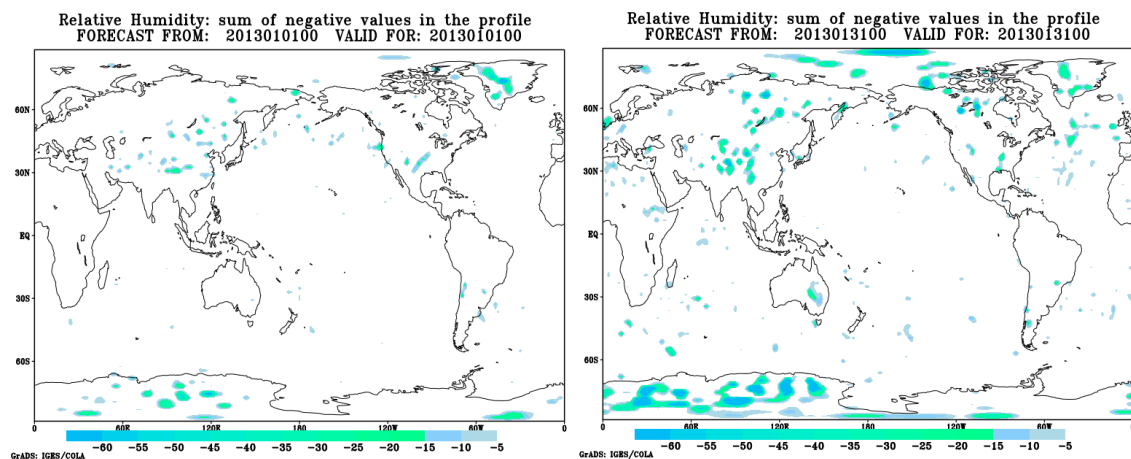


Figura 4.5 - Localização espacial dos valores de umidade negativa na análise gerada pela versão SMG\_V1.0.0. Figura da esquerda é para o primeiro dia do período e a figura da direita é para o último dia avaliado.

A Figura 4.5 mostra que os valores de umidade negativa evoluem com o ciclo de assimilação ampliando a área de ocorrência e a intensidade dos valores, os quais se concentram nas regiões polares com máximas localizadas no continente antártico. No caso da umidade supersaturada mostrada na Figura 4.6, a evolução temporal da área em que o problema ocorre é drástica com uma intensificação muito forte durante o processo cíclico, o que é muito preocupante, pois pode tender a soluções inconsistentes para o modelo ocasionando uma interrupção do processo. Os casos de umidade supersaturada se concentram nas regiões oceânicas de médias latitudes e na região equatorial com máxima concentração sobre a região central do oceano Pacífico. Observa-se claramente que no início do processo essas regiões apresentam valores muito baixo em médias latitude e praticamente nula sobre a região equatorial. Esse problema deverá consumir um bom esforço da equipe para encontrar meios de resolve-lo ou minimizar seus impactos no processo cíclico.

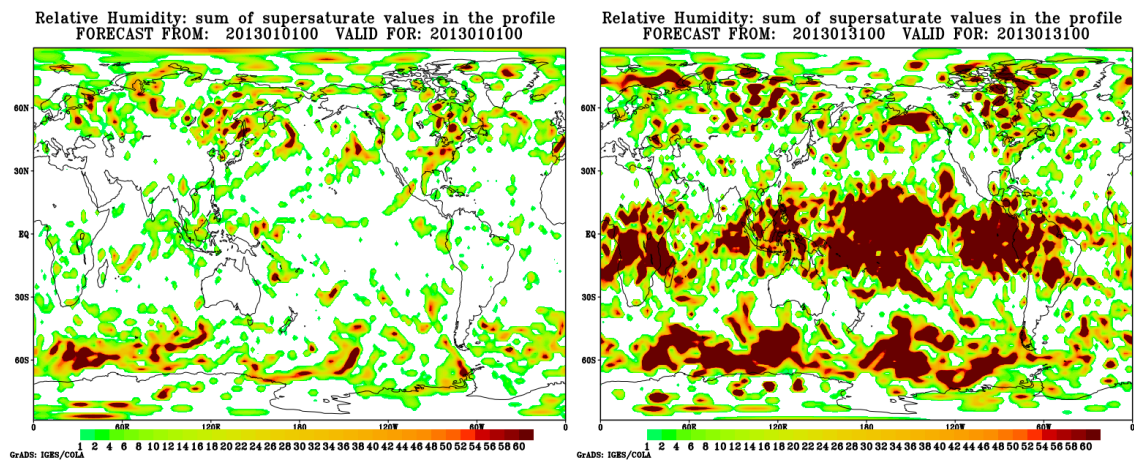


Figura 4.6 - Localização espacial dos valores de umidade supersaturada na análise gerada pela versão SMG\_V1.0.0. Figura da esquerda é para o primeiro dia do período e a figura da direita é para o último dia avaliado.

Para melhor descrever o comportamento dos valores não físicos dentro do período de estudo e a ocorrência em função da latitude a Figura 4.7 mostra a série temporal dos mesmos para os experimento EX0CNT e EX1ALL em diferentes faixas de latitude. Os resultados mostrados nessa figura indicam alguns padrões bem definidos da geração de valores não físicos de umidade durante o processo cíclico de assimilação de dados. Para o caso da umidade negativa observa-se que não há um padrão de crescimento dos valores com o decorrer do processo cíclico, tendo apenas alguns picos por volta do dia 12 mas que diminuiu e se manteve baixo até o final do período. A região

do hemisfério norte e ártico apresentaram os valores maiores no final do período. Na distribuição do globo os casos de umidade negativa se concentram nas regiões polares sendo muito maior do que no equador. Com relação aos valores de umidade supersaturado, o comportamento é inverso com o maior número de casos na região tropical e diminuindo em direção aos polos, sendo menor em direção ao polo sul. Esses resultados reforçam o comportamento apresentado pelas figuras anteriores e indicam um forte padrão de crescimento dos valores com o decorrer do processo cíclico. Algo que chama a atenção é um salto observado no início do dia 9, em especial no hemisfério Norte. Observa-se que em comparação com a versão anterior a versão V1.0.0 apresenta um aumento significativo de umidade supersaturada, com exceção na região antártica que apresentou valores até menores do que o experimento controle e sem os saltos observados na versão V0.0.1. Esse aumento deve estar associado com o aumento no numero de dados observados e o uso de mais dados de radiância e *bending angle* de radio ocultação deverão impactar ainda mais esses resultados negativos no futuro, o que deverá ser tratado apropriadamente.

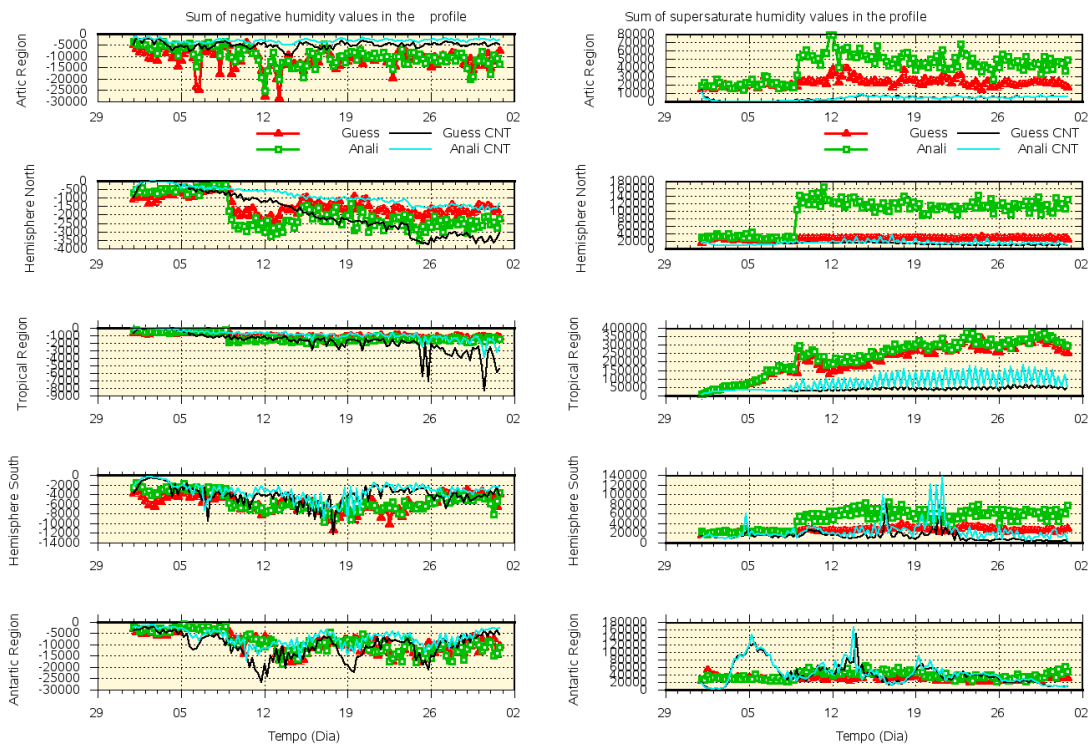


Figura 4.7 - Serie temporal do somatório dos valores não físicos de umidade gerados nos experimentos EX0CNT (SMG\_V0.0.1) e EX1ALL (SMG\_V1.0.0) para diferentes faixas de latitude.

A concentração dos valores não físicos de umidade com relação ao perfil vertical do modelo a figura 4.8 mostra o perfil para três instantes no período avaliado. O Dia 01 às 00:00 dia 15 às 12:00 e 31 às 18:00 para a umidade negativa (três *plots* da esquerda) e para a umidade supersaturada (três *plots* da direita). Os resultados na umidade negativa indicam que há uma forte redução desse problema na versão V1.0.0 em especial nos níveis de 18 a 25 no final do período, embora um aumento é observado nos níveis 15 e 16. Com relação a umidade supersaturada observa-se que o aumento nesses casos com a integração do modelo se concentra na baixa troposfera nos primeiros 15 níveis do modelo, onde esse aumento é muito significativo, sendo 3 vezes maior que o experimento da versão V0.0.1. Há também um aumento nos níveis 21 e 22 onde a versão V1.0.0 apresenta picos, onde a versão V0.0.1 apresentou sutis valores de umidade supersaturada. Por outro lado, nos últimos níveis do perfil a versão V1.0.0 corrigiu problemas observados na versão anterior.

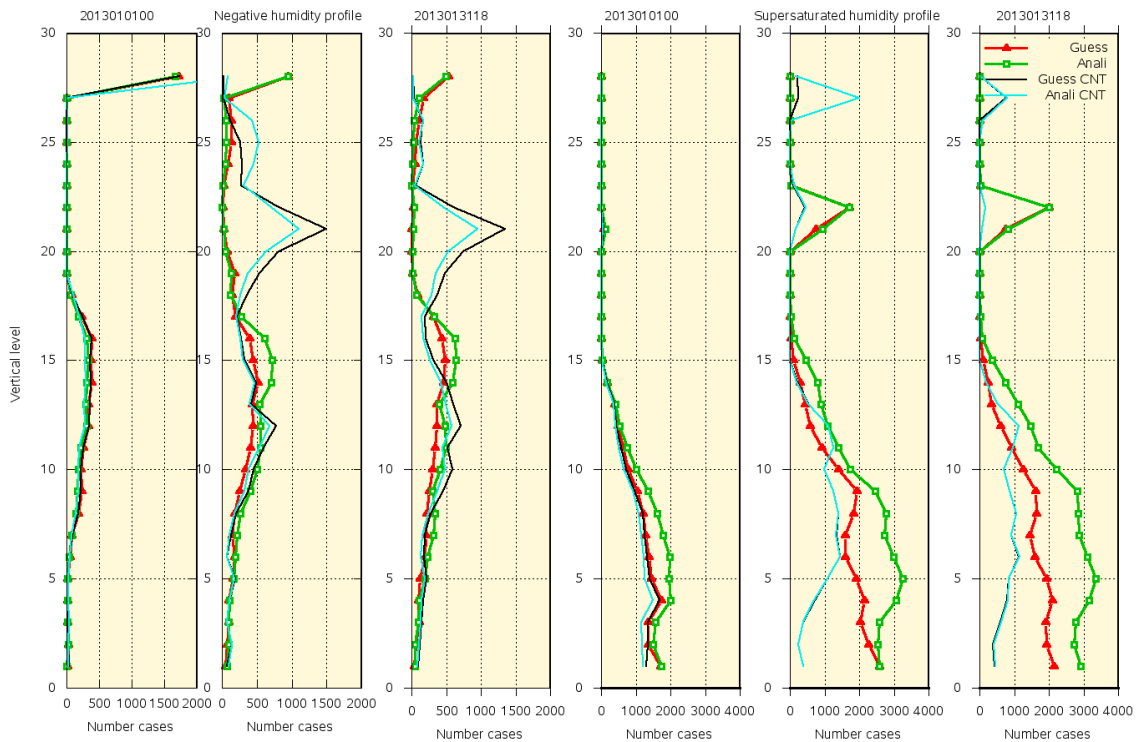


Figura 4.8 - Perfis verticais do número de casos de umidade não física gerados nos experimentos EX0CNT (SMG\_V0.0.1) e EX1ALL (SMG\_V1.0.0) em diferentes estágios (início/meio/término) do período avaliado.

Para melhor analisar o comportamento vertical dos valores não físicos de umidade a Figura 4.9 apresenta a serie temporal do número total de casos em três diferentes



camadas do perfil vertical: *lower* (9 primeiros níveis), *middle* (do nível 10 ao 18) e *upper* (últimos 9 níveis). No *plot* inferior é mostrado o numero total de casos para todos os 28 níveis do modelo. Observa-se que os valores nessa figura se refere ao numero de casos e não na somatória dos valores não físicos, como apresentado nas figuras anteriores. Nos *plots* da esquerda é apresentado os valores da umidade negativa, nos quais é possível observar que além dos padrões já destacados nas figuras anteriores é possível observar que a diminuição dos casos de umidade negativa com a assimilação de dados é mais significativa na camada superior da atmosfera onde o numero de casos era de 4000 pontos é reduzido um numero de casos menor do que 1000. Para as demais camadas o numero de casos é semelhante. Para a umidade supersaturada o que foi observado no perfil é confirmado nessa análise, pois a versão V1.0.0 apresenta uma aumento expressivo em toda as camadas, mas sendo nas inferiores onde esse aumento é muito expressivo. Passando de 15000 para 35000 casos.

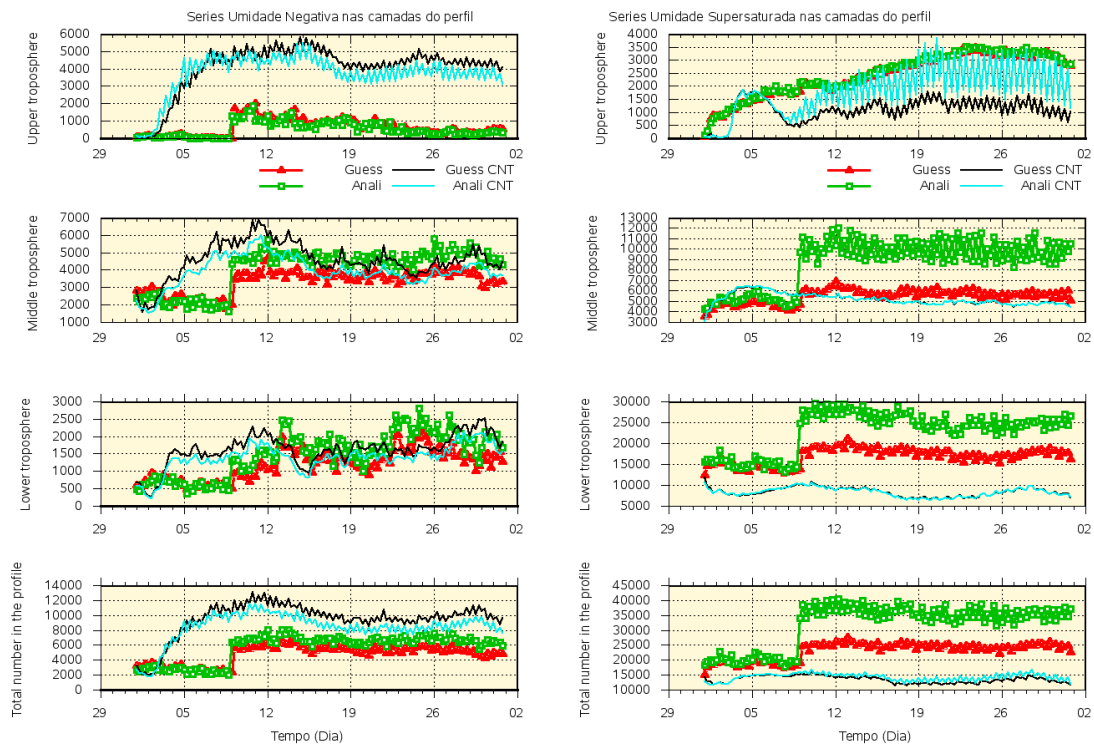


Figura 4.9 - Séries temporais do casos de umidade não física gerados nos experimentos EX0CNT (SMG\_V0.0.1) e EX1ALL (SMG\_V1.0.0) para diferentes camadas do perfil vertical atmosférico.

Nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 também são apresentados ambos os valores para os cam-

pos de *background* do modelo como os valores das análises geradas nos experimentos. Uma comparação entre essas duas curvas em um mesmo experimento permite avaliar a contribuição isolada do passo de integração do modelo e do processo de assimilação. Essa análise é apenas visual, mas deverá ser melhor explorada nas versões futuras separando apropriadamente a contribuição de cada uma das componentes do processo. Os resultados mostram que, de forma geral, o passo de integração do modelo tende a gerar valores de umidade negativa e no passo da análise tende a diminuir a ocorrência dos mesmos. Com o aumento da base de dados esse padrão não é observado embora a diferença seja pequena, sendo maior na média troposfera (ver Figura 4.9) sobre o Hemisfério Norte (ver Figura 4.7). Para os valores de umidade supersaturada o padrão observado é o oposto onde o *background* tende a apresentar menores valores do que o passo da análise gera, em especial na baixa e média troposfera (ver Figura 4.9) no hemisfério Norte e região do Ártico (ver Figura 4.7).

Nessa avaliação é 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 é bem marcado mesmo no experimento controle EX0CNT, onde dados observa-se um padrão de *zig-zag* entre os passos de análise apenas para os dados convencionais, sendo os pontos de maiores ocorrência dos valores não físicos nos horários de 00 e 12. Com o aumento de dados observados como o experimento da versão V1.0.0 com a adição dos demais sistemas de observação o número dos casos aumentam. A Figura 4.10 mostra uma comparação dos experimentos EX0CNT (CONV) EX2ORA (CONV+SATWIND+ROGNSS) EX2ORA (CONV+SATWIND+ROGNSS+AMSU-A), cuja sequência representa uma evolução da base de dados. Os resultados mostrados nessa figura indicam que claramente que a intensificação dos valores de umidade supersaturada na baixa atmosfera tem uma relação direta com o aumento do número de dados assimilados. Nessa figura indica também que a diminuição dos casos de umidade negativa na alta atmosfera não está associado com os valores de radiância, uma vez que no experimentos EX2ORA, esse resultados já foi obtido.

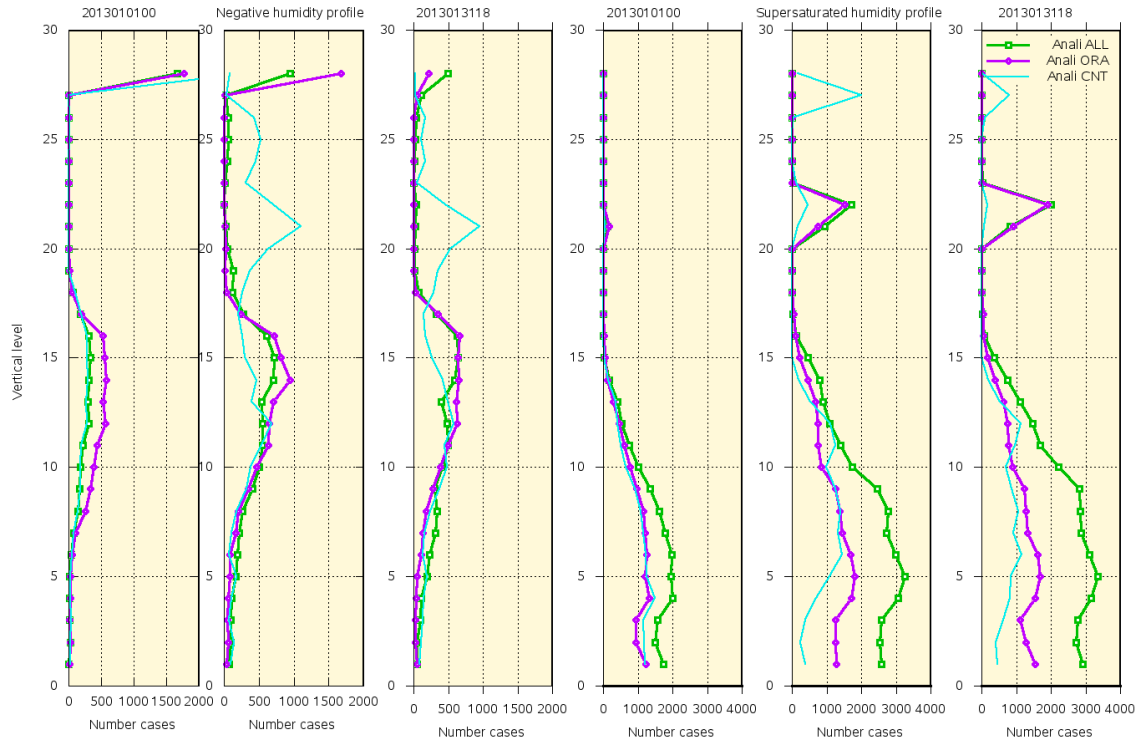


Figura 4.10 - Perfil do número de casos de umidade não física para as análises dos experimentos EX0CNT (convencionais) EX2ORA (conv+Satwind+ROGNSS) e EX1ALL (conv+Satwind+ROGNSS+AMSU-A).

#### 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: “intjcmmod.f90” e “stpjcmmod.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 “intjcmof90”, 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 “stpjcmof90”, a subrotina “stpjcpdry” 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 injeção, 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 \(2010\)](#).

Para se acessar a sensibilidade do termo de injeção referente à conservação de massa seca no GSI, foram realizados 7 experimentos (considerando a assimilação dos dados convencionais e das radiâncias do AMSU-A), com as seguintes configurações:

- Teste1: ljcpcdry=.false.,bamp\_jcpcdry= $2,5 \times 10^7$  (referência - REF)
- Teste2: ljcpcdry=.true.,bamp\_jcpcdry= $2,5 \times 10^7$
- Teste3: ljcpcdry=.true.,bamp\_jcpcdry= $2,5 \times 10^{-7}$

- Teste4:  $\text{ljcpdry}=.true.,\text{bamp\_jcpdry}=2,5 \times 10^{14}$
- Teste5:  $\text{ljcpdry}=.true.,\text{bamp\_jcpdry}=2,5 \times 10^{-14}$
- Teste6:  $\text{ljcpdry}=.true.,\text{bamp\_jcpdry}=2,5 \times 10^3$
- Teste7:  $\text{ljcpdry}=.true.,\text{bamp\_jcpdry}=2,5 \times 10^{-3}$

A partir destes experimentos, foi gerada a Figura 4.11, em que são apresentados três painéis com os resultados obtidos em termos de três parâmetros:

- “mean\_ps”: é a média da pressão no globo (não está descrito na rotina);
- “mean\_pw”: é a média da pressão no globo dividido pela aceleração da gravidade (não está descrito na rotina);
- “pdryini”: é a média global da massa seca da atmosfera em kPa ( $\text{pdryini} = \text{globps} - \text{globpw}$ )

Estas três quantidades estão representadas nos painéis, de cima para baixo respectivamente, na Figura 4.11, a seguir:

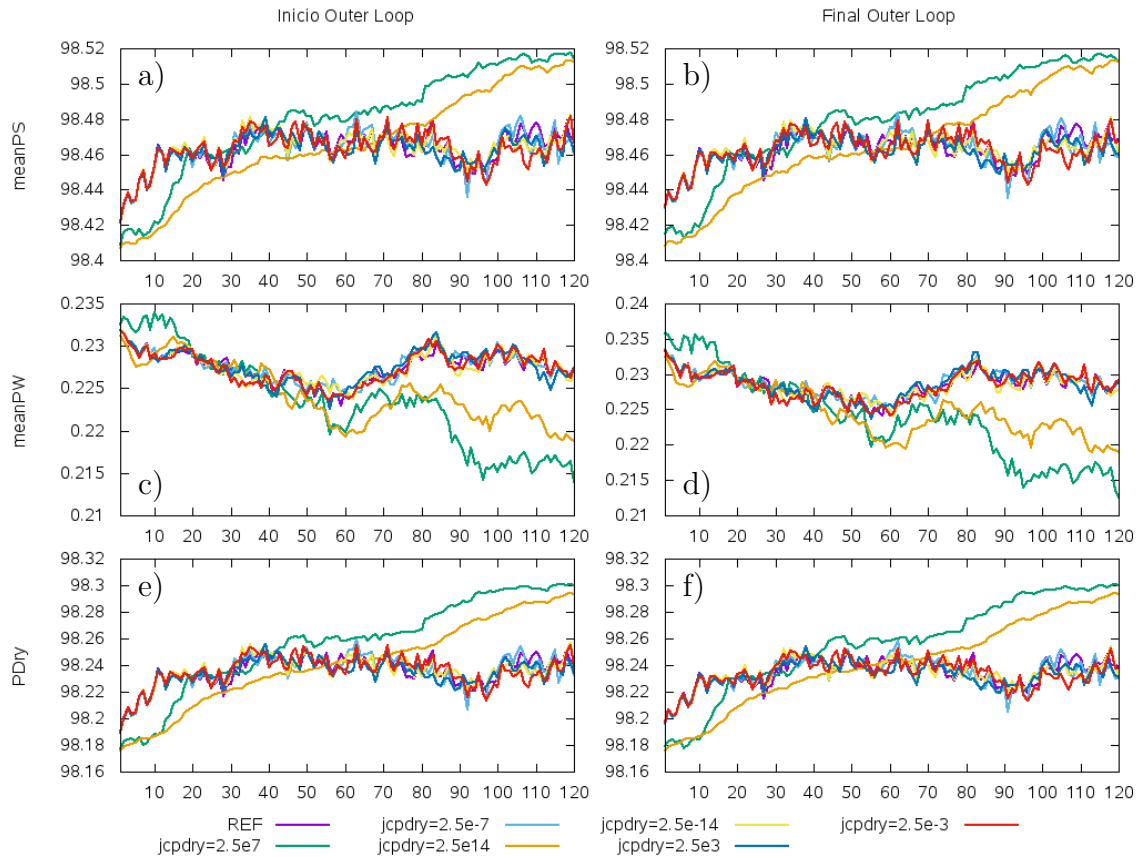


Figura 4.11 - Sensibilidade da injeção de umidade na conservação da massa seca do sistema GSI, durante Janeiro de 2013.

Na Figura 4.11, estão indicadas duas colunas referentes ao número de *outer loops* realizado pelo sistema de assimilação. Na coluna da esquerda, estão mostrados os resultados dos experimentos referentes ao início do *outer loop* e na coluna da direita, ao final do *outer loop*. A configuração para o GSI ser realizado ciclicamente para o mês de Janeiro de 2013, foi a seguinte: “ $\text{miter}=1, \text{niter}(1)=10, \text{niter}(2)=10$ ”, o que indica que o sistema foi realizado com 1 *outer loop* e 10 iterações internas. Apesar disso, com “ $\text{miter}=1$ ”, tem-se um segundo *outer loop* em que são fornecidas as informações das inovações (i.e.,  $y-H(x)$ ) em relação à análise. A coluna indicando “final do *outer loop*” faz, portanto, referência à análise, enquanto que a coluna “início *outer loop*” faz referência ao *first guess*.

A configuração de referência utilizada (“ $\text{jcpdry}=.false., \text{bamp\_jcpdry}=2,5 \times 10^7$ ”), está mostrada na curva roxa (indicada por REF) na figura, e ela representa a configuração padrão do sistema quando este é instalado. Esta configuração tem sido utilizada nos testes iniciais do sistema SMG e não representa necessariamente a

configuração mais adequada para o presente sistema. Por isso, um teste de sensibilidade foi realizado como primeiro passo para a determinação de um protocolo para a avaliação da injeção da massa seca do sistema. Com esta configuração, mostra-se que para os 120 ciclos de análises realizados durante os 31 dias de Janeiro de 2013, o sistema foi realizado sem a injeção de massa seca, ou seja, com “`ljcpdry=.false.`”, a análise não é penalizada quando a média global de massa seca não for nula. O padrão médio está mostrado na figura, onde pode-se observar uma oscilação da média da pressão tanto no início (Figura 4.11(a)) quanto no final do outer loop (Figura 4.11(b)). Esta oscilação é compatível com àquela referenciada no Slide 11 de Derber (2010), porém não se pode afirmar se esta é uma oscilação característica a ser observada em mais longo prazo. Para isto, é importante que seja feita uma simulação mais longa (e.g., 1 ano) para que esta característica possa ser verificada. Os demais experimentos, utilizam o parâmetro “`ljcpdry=.true.`”, indicando que a injeção de massa seca é aplicada na penalização da análise quando a média da massa seca não for nula. Para se verificar a sensibilidade do parâmetro a ser aplicado, em cada um dos demais experimentos foi aplicado o mesmo valor, mas em diferentes ordens de grandeza. Em resumo, utilizando-se valores entre  $2,5 \times 10^{-14}$  e  $2,5 \times 10^3$ , não houve diferenças significativas, sendo equivalente a realizar o ciclo de análises sem o termo de injeção de massa seca.

Entretanto, utilizando-se valores com ordem de grandeza maiores ou iguais a  $2,5 \times 10^7$ , foi possível obter-se diferenças notáveis, embora não se possa afirmar se melhores ou piores. Com o termo “`jcpdry= $2,5 \times 10^7$` ”, observa-se que a média global da massa seca (Figuras 4.11(e,f)) aumenta, indicando que a cada ciclo de análise o termo “`globpw`” diminui em consequência da diminuição da massa úmida da pressão. O mesmo comportamento foi obtido com o termo “`jcpdry= $2,5 \times 10^{14}$` ”, porém em menor intensidade. As Figuras 4.11(c,d) ajudam a mostrar a diminuição da massa úmida da pressão, principalmente para os valores dentro do intervalo  $10^7 \leq jcpdry \leq 10^{14}$ . Apesar disso, ainda não se pode afirmar sobre os efeitos da utilização dos parâmetros indicados na qualidade das análises e previsões, o que deve ser feito em um estudo à parte.

## 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 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 ao 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, este fato pode ser claramente constatado na figura 5.1. 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\_V1.0.0 é obtido a partir dos arquivos PrepBUFR provenientes do NCEP através da internet, já com as *flags* de controle de qualidade preparadas. Em um futuro próximo, estes arquivos deverão ser produzidos pelo CPTEC, empregando o processo de controle de qualidade baseado no modelo utilizado pelo SMG. 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 Tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1 - Exemplos dos códigos PrepBUFR e descrição das observações convencionais de  $u$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $q$ ,  $ps$  e  $gps$ .

Observação	Mnemônico	Código	Descrição
<b>Vento</b>	$u, v$	0220	RAWINSONDE - $u, v$ (all levels), $z$ (winds-by-height levels)
		0221	PIBAL - $u, v, z$
		0223	NOAA PROFILER NETWORK (NPN) WIND PROFILER - $u, v, z$
		0224	NEXRAD VERTICAL AZIMUTH DISPLAY (VAD) - $u, v, z$
<b>Temperatura</b>	$T$	0120	RAWINSONDE
		0130	AIREP AND PIREP AIRCRAFT
		0132	FLIGHT-LEVEL RECONNAISSANCE AND PROFILE DROPSONDE
		0180	SURFACE MARINE WITH REPORTED STATION PRESSURE (SHIP, BUOY, C-MAN, TIDE GAUGE)
<b>Umidade</b>	$q$	0120	RAWINSONDE
		0132	FLIGHT-LEVEL RECONNAISSANCE AND PROFILE DROPSONDE
		0180	SURFACE MARINE WITH REPORTED STATION PRESSURE (SHIP, BUOY, C-MAN, TIDE GAUGE)
		0182	SPLASH-LEVEL DROPSONDE OVER OCEAN
<b>Pressão</b>	$ps$	0120	RAWINSONDE
		0180	SURFACE MARINE WITH REPORTED STATION PRESSURE (SHIP, BUOY, C-MAN, TIDE GAUGE)
		0181	SURFACE LAND (SYNOPTIC, METAR) WITH REPORTED STATION PRESSURE
		0182	SPLASH-LEVEL DROPSONDE OVER OCEAN
<b>Vapor D'água integrado</b>	$ipw$	0153	GPS-INTEGRATED PRECIPITABLE WATER (GPS-IPW)

A figura 5.1 mostra a distribuição espacial dos dados assimilados no dia primeiro de janeiro de 2013, e tem apenas a função de espacializar a quantidade de dados convencionais utilizados em uma rodada típica da assimilação usando o SMG\_V1.0.0. Os diferentes *plots* da figuras são para os horários sinóticos desse dia, os quais mostram claramente uma maior concentração dos dados nos horários de 00 e 12 horas, bem como nas regiões continentais do hemisfério norte. Nota-se também que a América do Sul é uma das regiões mais afetadas pela falta de uniformidade da disponibilidade de dados temporalmente.

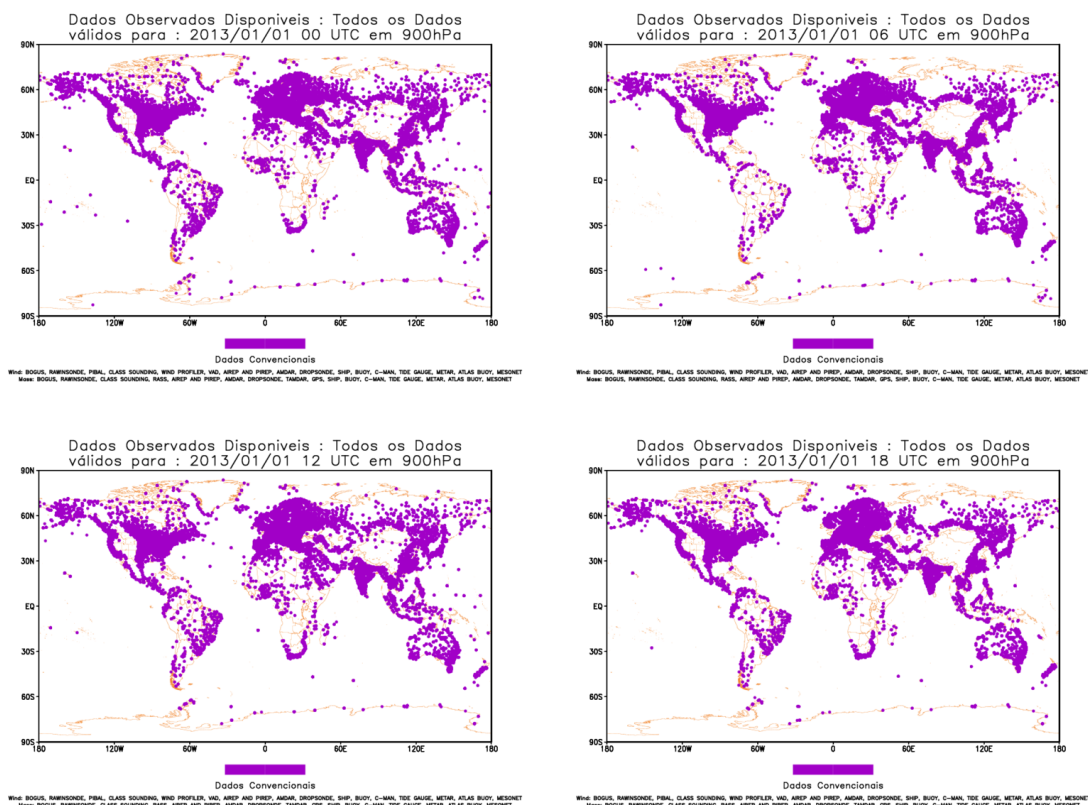


Figura 5.1 - Todos os dados convencionais disponíveis para assimilação no dia 01 de Janeiro de 2013, sendo superior esquerdo para 00Z, superior direito para 06Z, inferior esquerdo para 12Z e inferior direito para 18Z.

Apesar da figura 5.1 mostrar boa cobertura em algumas regiões continentais, principalmente no hemisfério Norte, vale ressaltar que não são todos os dados disponíveis que são assimilados, isso porque existe um controle na qualidade do dado que é assimilado, limitando a quantidade de dados assimilados a uma parte do total disponível. Um exemplo é mostrado na figura 5.2 para a variável velocidade do vento, onde observa-se o total de dados disponíveis e o total de dados assimilados, sendo este total bem inferior ao total disponível.

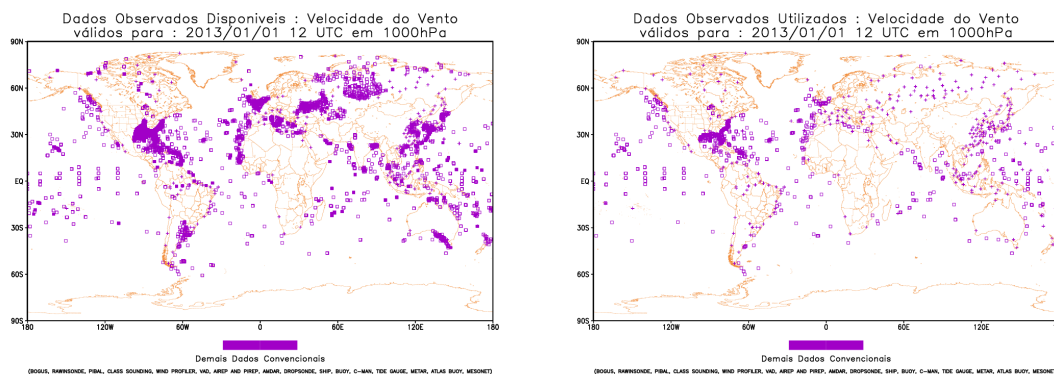


Figura 5.2 - Dados de velocidade do vento convencional para o dia 01 de Janeiro de 2013 às 12Z. Dados disponíveis (esquerda) e dados assimilados (direita).

### 5.1.1 Avaliação da Análise em termos do OmF e OmA

Estes dados são coletados de forma rotineira em todo o globo de 2 a 4 vezes por dia, nos horários sinóticos padrão, (00, 06, 12 e 18Z), a partir dos quais são processados e transmitidos pela plataforma GTS para os centros operacionais. A eficácia do sistema de assimilação de dados pode ser verificada a partir da avaliação das curvas de OmF e OmA, que são bons indicadores da redução do erro da previsão devido à contribuição das observações na correção da trajetória do modelo. A Figura 5.3 apresenta os valores do OmF e OmA de  $uv$  das radiossondas nos diferentes níveis do perfil atmosférico. Os resultados mostram de forma geral que os valores do OmA são menores do que os valores do OmF, o que é um resultado desejável embora isso isoladamente, não é garantia de melhores previsões de tempo. Esse padrão não é observado nos níveis entre 700 e 400 e merecem ser investigados. Uma avaliação da interação com os dados de vento por satélites e outras fontes deverá ser investigado nos próximos passos da evolução do SMG.

OMA e OMF para uv (0220) as 12Z

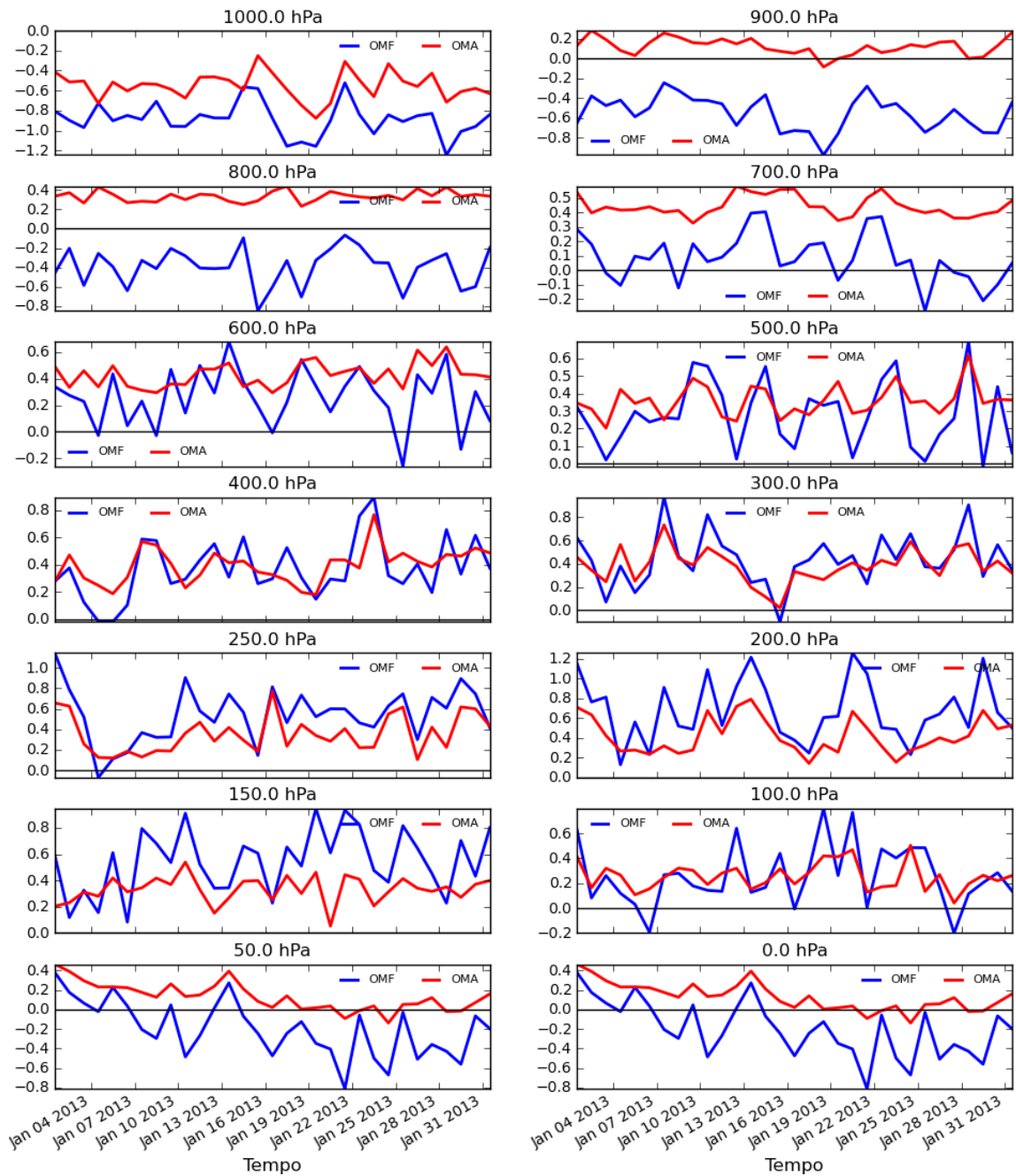


Figura 5.3 - Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de  $uv$ , obtidos por radiossondagem (código 0220), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 0 hPa (topo do modelo), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z.

Na Figura 5.4 é mostrado os valores médios do OmF e OmA para a temperatura medidas pelas radiossondas assimiladas durante todo o período avaliado nesse relatório. OS resultados mostram que para a temperatura em todos os níveis do modelo

os valores do OmA foram menores do que OmF, indicando um processo de correção eficiente para essa variável atmosférica.

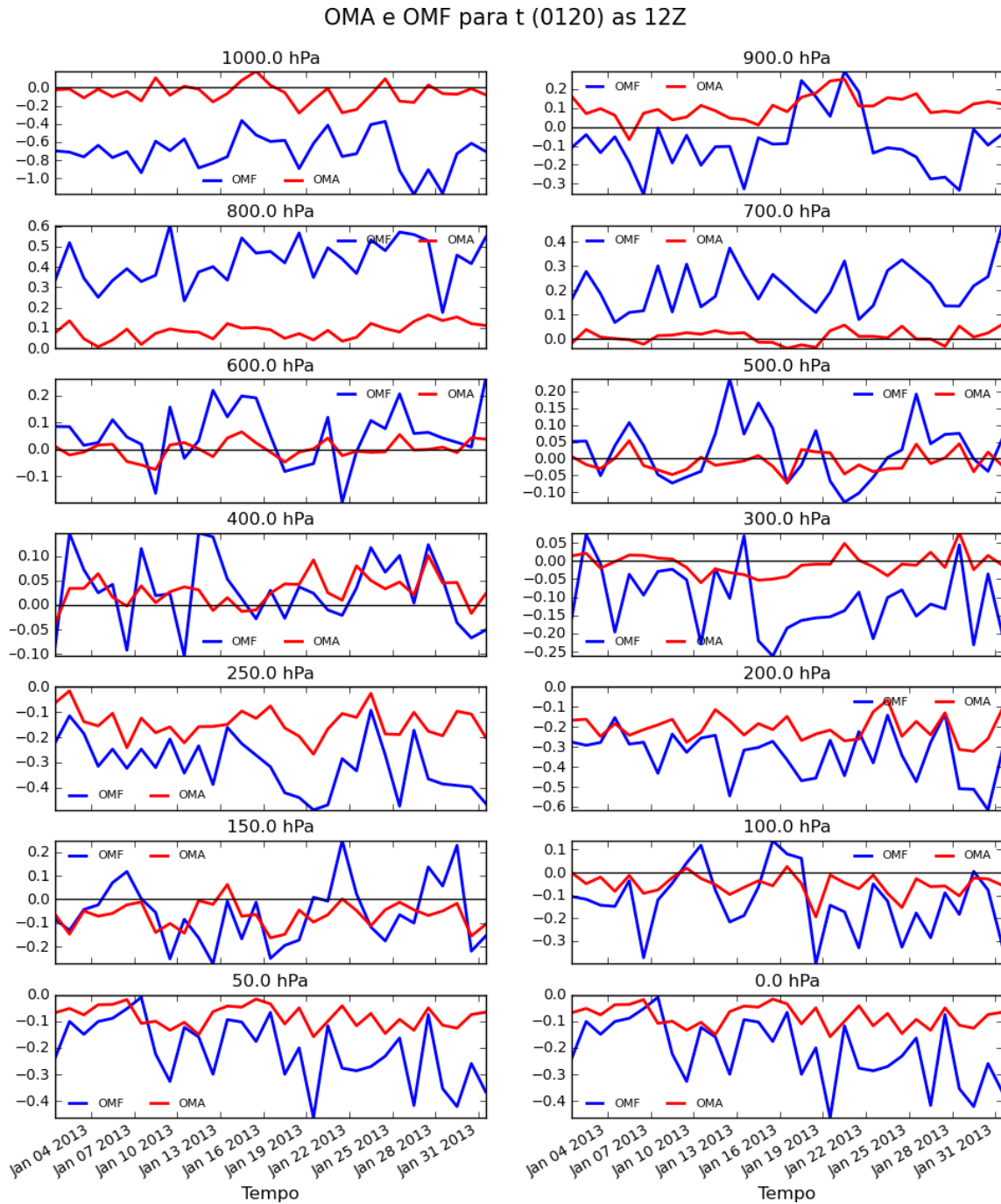


Figura 5.4 - Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de  $T$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 0 hPa (topo do modelo), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z.

Na Figura 5.5 é mostrado os valores médios do OmF e OmA para a as observações de umidade obtidas pelas radiossondas assimiladas durante todo o período avaliado nesse relatório. Os resultados mostram que assim como a temperatura umidade em todos os níveis avaliado aqui os valores do OmA foram menores do que OmF, indicando um processo de correção eficiente também para essa variável atmosférica, obviamente nos pontos das radiossondas. O mesmo é observado para os dados de pressão a superfície apresentados na Figura 5.6. Essa avaliação não é de toda correta pois avaliar o comportamento da assimilação comparando com valores que entraram no processo e esses, no caso das radiossondas, com pesos relativamente altos não é uma análise adequada e superestimam a eficiência do processo de assimilação.

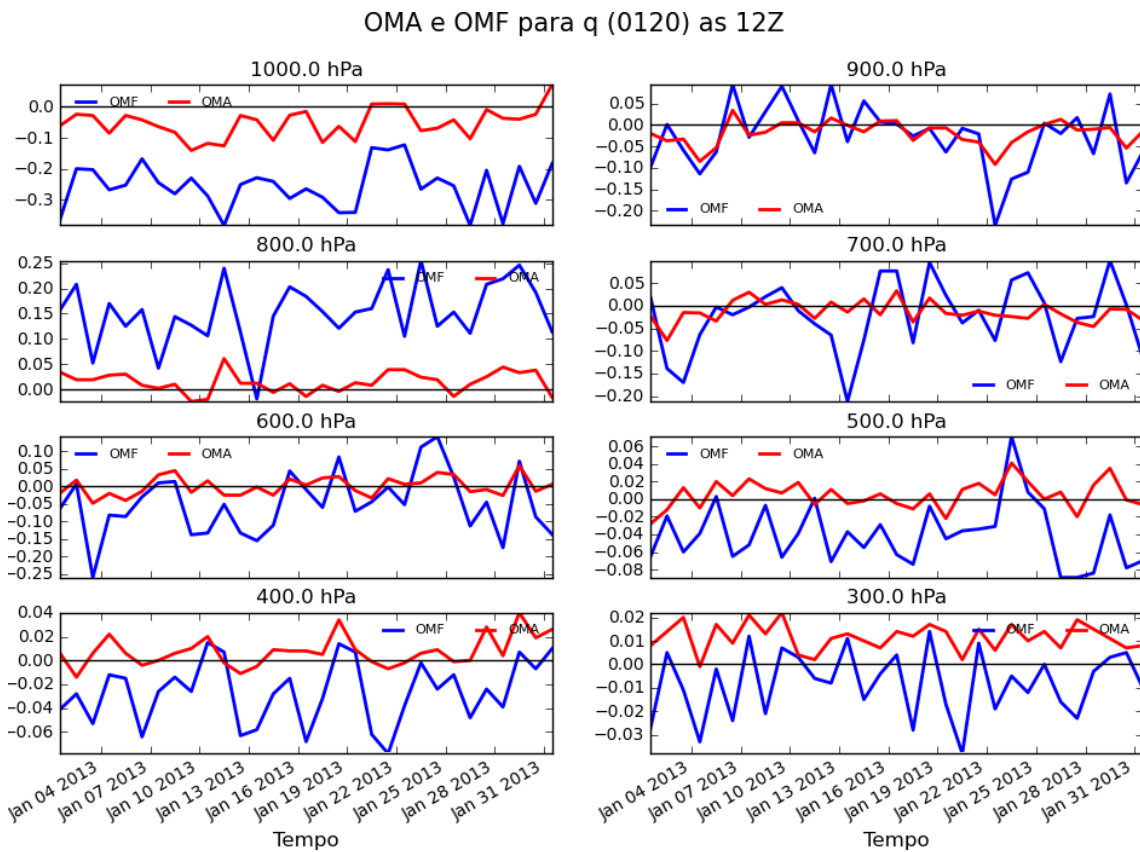


Figura 5.5 - Comparação OmF x OMA para os dados convencionais de  $q$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), para os níveis atmosféricos de 1000 hPa e 300 hPa, no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z.

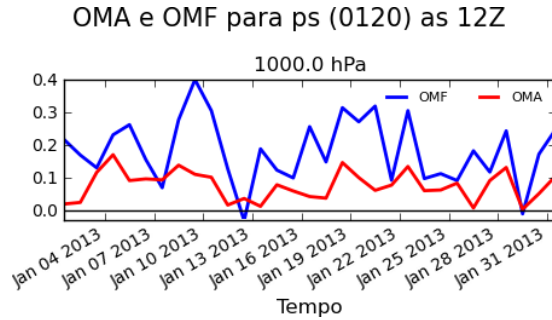


Figura 5.6 - Comparação OmF x OmA para os dados convencionais de  $ps$ , obtidos por radiossondagem (código 0120), no período de 01 a 31 de Janeiro de 2013, às 12Z.

Nessa versão da avaliação diagnóstica do SMG os dados convencionais não foram tratados adequadamente por ter investido na avaliação dos outros aspectos abordado nessa avaliação. Uma avaliação detalhada e criteriosa será feita nos próximos passos do processo de desenvolvimento do SMG e os resultados serão reportados nos próximos relatórios de diagnóstico do sistema.

## 5.2 Avaliação do uso 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 geoestacionários 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 geoestacionária, 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.

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  $\mu\text{m}$  do satélite GOES-13. A partir de novembro de 2017, o vento será estimado utilizando imagens do satélite GOES-16. Nessa versão, a área de cobertura será ampliada e a densidade de AMVs será maior devido à maior resolução espacial (2 km x 2 km) e temporal (15 minutos) das observações desse satélite.

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.

Nessa versão inicial, o esquema de avaliação busca responder as seguintes perguntas:

- a) Qual é a quantidade de observações utilizadas no processo de assimilação?
- b) Qual é a distribuição espacial (horizontal e vertical) das observações utilizadas e rejeitadas?
- c) Qual é a distribuição espacial da diferença entre o modelo e as observações (OmF)?

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 5.11 mostra a distribuição espacial de todos os tipos de observações disponíveis.

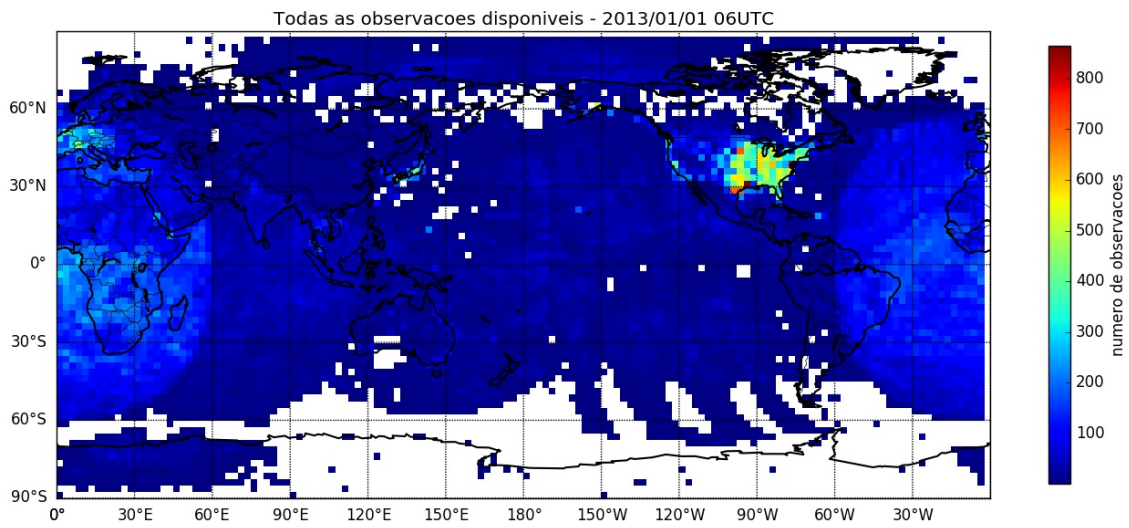


Figura 5.7 - Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus

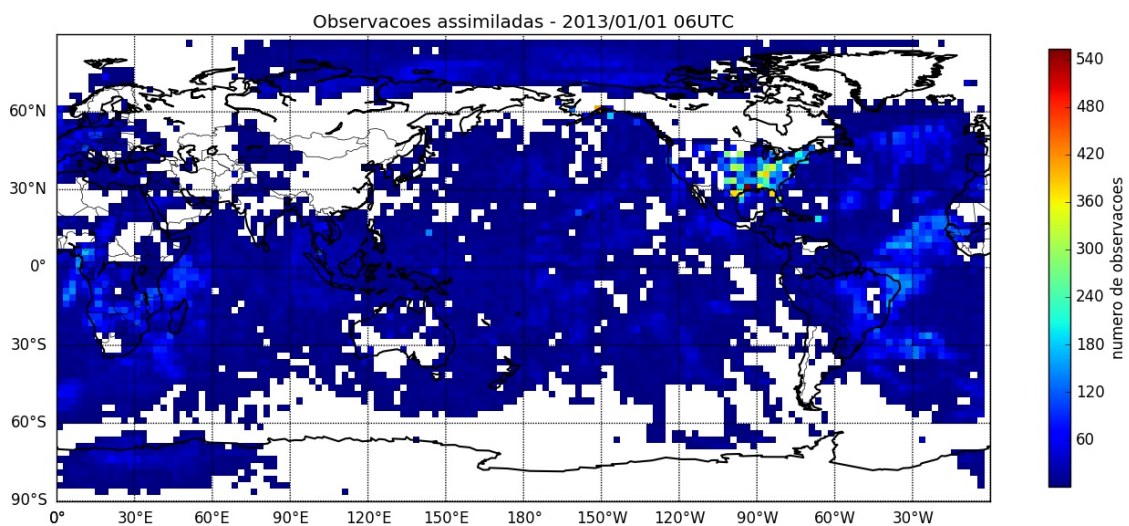


Figura 5.8 - Distribuição espacial de todas as observações de vento assimiladas. Valores acumulados em caixas de 2,5° x 2,5° graus.

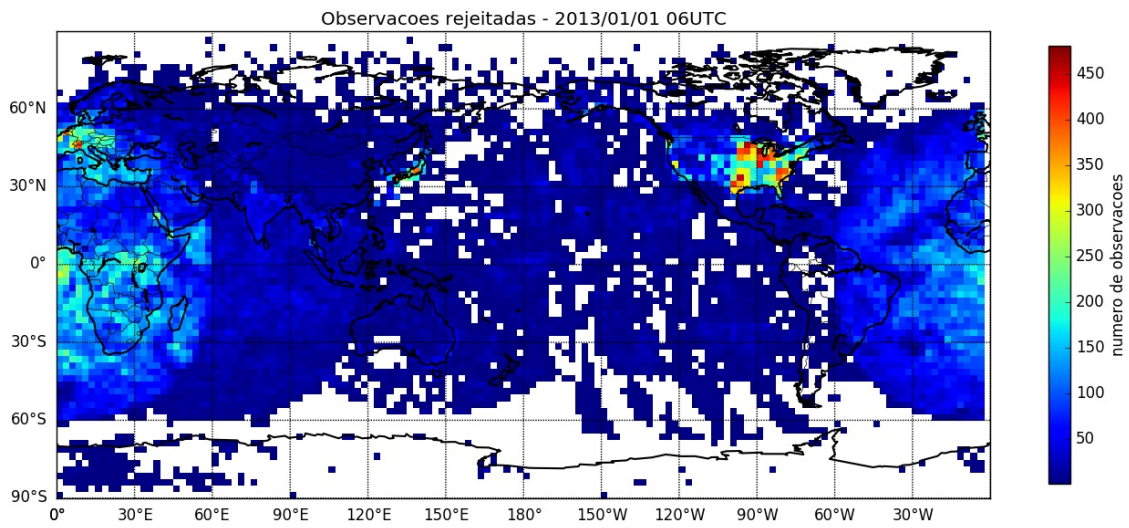


Figura 5.9 - Distribuição espacial de todas as observações de vento rejeitadas. Valores acumulados em caixas de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  graus.

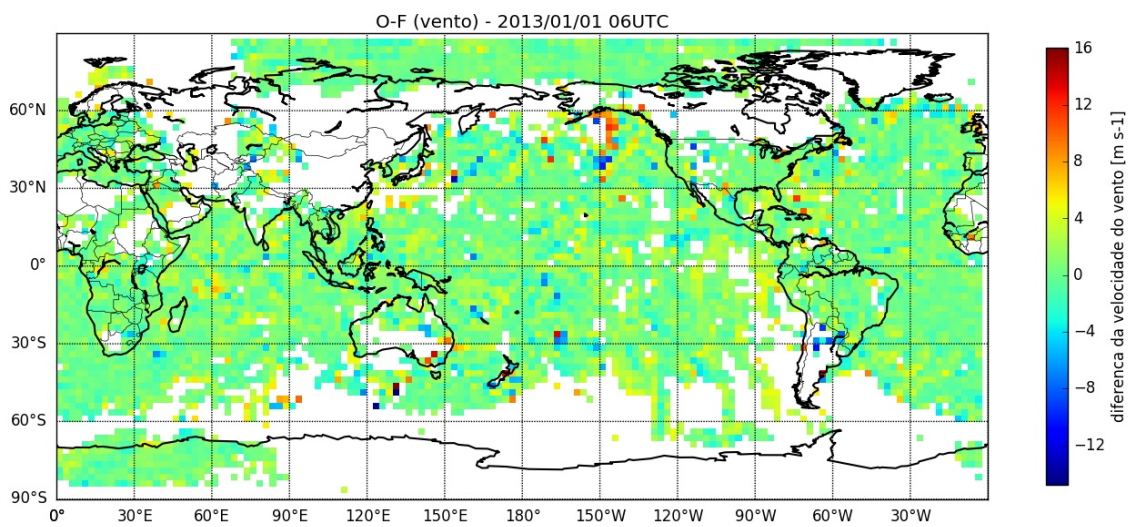


Figura 5.10 - Distribuição espacial da diferença entre a velocidade do vento assimilado e o *background*. Valores acumulados em caixas de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  graus.

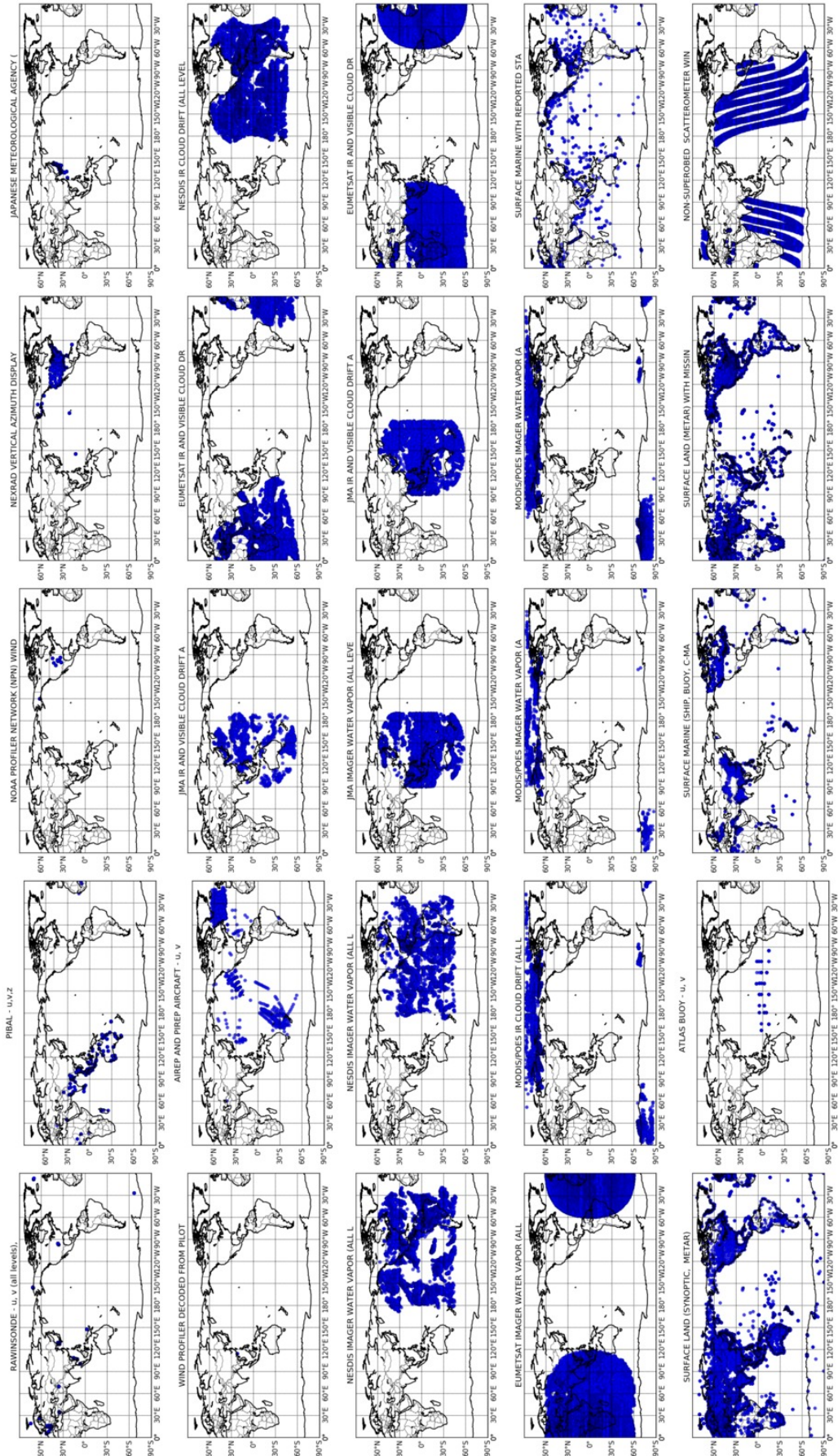


Figura 5.11 - Distribuição espacial de todas as observações de vento disponíveis divididos por tipo.

veis para o ciclo de assimilação no experimento EX1ALL das 06:00 UTC de 01 de janeiro de 2013.

Nas Figuras 5.7, 5.9 e 5.8 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).

Na continuidade da avaliação dos dados de vento de satélites nos próximos passos da evolução do SMG, pretende-se investigar a contribuição dos dados de vento e o desempenho desse sistema de observação no processo de assimilação. Análises do OmF e OmA serão realizadas para 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 5.12 abaixo.

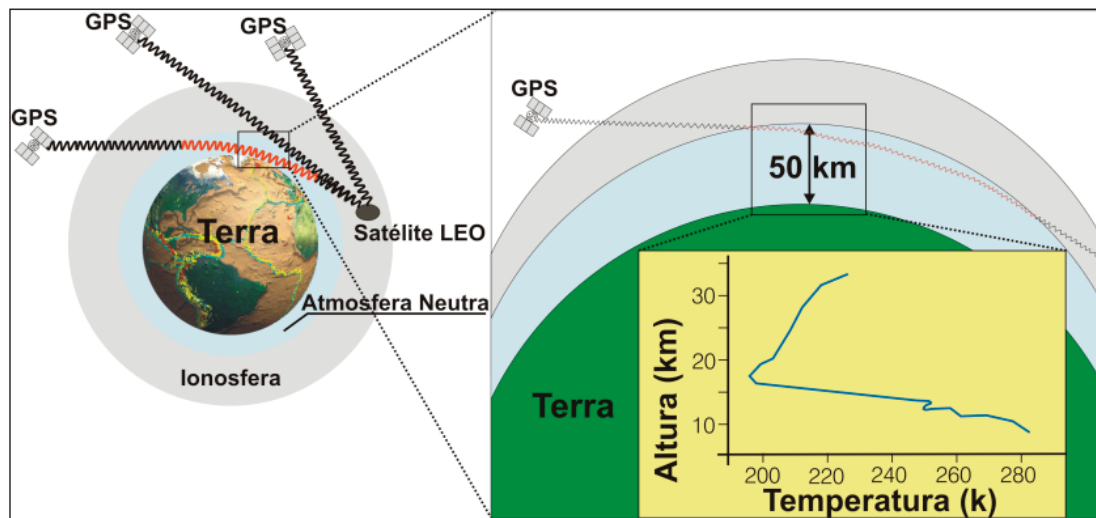


Figura 5.12 - Esquema ilustrativo do comportamento do sinal quando esse atravessa a atmosfera terrestre, no momento em que acontece uma ocultação do sinal GPS emitido pelo satélite do sistema e recebido por um receptor a bordo do satélite LEO (Figura adaptada de Lee et al. (2001)).

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. Todos esses satélites estão atualmente operacionais. Essa iniciativa 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. Essa constelação disponibiliza diariamente mais de 1500 perfis atmosféricos.

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 Assimilação de dados de ROGNSS no GSI

Os dados de ROGNSS assimilados no CPTEC são os processados pelo COSMIC *Data Analysis and Archive Center* (CDAAC) e *Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding Satellite Application Facilities* (GRAS SAF), e seguidamente no NCEP onde colocados no formato padrão e requerimentos do *Global Telecommunication System* (GTS), e que chegam ao CPTEC via FTP no fluxo de dados GTS. Um exemplo do arquivo contendo esses dados é “gdas1.t18z.gpsro.tm00.BUFR\_d.20140903”.

No GSI a escolha do tipo de dado de ROGNSS a ser assimilado é controlado pela variável `gps_dtype`, podendo ser `"gps_ref"` para os perfis de refratividade e `"gps_bnd"` para os perfis do ângulo de curvatura. Isso pode ser encontrado na lista de parâmetros de entrada `namelist` do GSI, no arquivo `"gsiparm.anl"` especificamente na seção `"&SETUP"`. Além disso, nessa seção é controlado o uso dos fatores de compressibilidade no cálculo da altura geopotencial a partir dos dados do modelo mediante a opção `use_compress`, sendo que se usado como falso então são empregados por padrão os coeficientes fornecidos em [Bevis et al. \(1994\)](#), e se verdadeiro são usados os coeficientes de [RÜEGER \(2002\)](#). Em [Cucurull et al. \(2013\)](#) se afirma que quando os fatores de compressibilidade fornecidos por [RÜEGER \(2002\)](#) são usados, os operadores de observações (ângulo de curvatura/refratividade) usam um conjunto mais preciso de índices de refração. Notar que o uso dos fatores de compressibilidade afetará não apenas a assimilação de dados de ROGNSS se não também todas as observações que para sua assimilação precisam do cálculo da altura geopotencial. Particularmente para a assimilação de ângulos de curvatura é necessário ajustar os parâmetros `"nsig_ext"` e `"gpstop"` referentes a extensão do número de camadas acima no topo do modelo necessárias para a assimilação desses dados e a altura limite para o uso dessas observações, respectivamente. O valor de `"nsig_ext"` é sugerido pelo próprio sistema, entanto que `"gpstop"` para os perfis de refratividade é 30 e para os ângulos de curvatura 50 (`"nsig_ext=12, gpstop=50"`) de acordo com a qualidade dos dados para alturas acima desses valores.

Uma vez escolhido o tipo de observação, as mesmas são lidas a partir do arquivo `BUFR`, é aplicado um controle de qualidade inicial que é especificado pelo centro provedor do dado, é realizado um controle de qualidade de "sanidade" verificando se a data está correta, se os valores são aceitáveis para as variáveis, dentre outras. Também é outorgado um valor de erro inicial às observações e são guardadas e escritas no arquivo de saída básica informações relevantes tais como o número de perfis e a missão de satélite onde provêm, número total de observações marcadas como boas ou ruins, a seleção de ângulos de curvatura/refratividade, dentre outras informações.

Considerando que os dados de ROGNSS provêm de várias fontes, no GSI também são controlados as missões de satélites que serão usados (`"issue = 1"`) ou monitorados (`"issue = -1"`) no processo de assimilação de dados.



Tabela 5.2 - Relação dos números, *flags* de “use/notuse”, tipos e os respectivos satélites usados na assimilação de dados de ROGNSS no GSI.

!	dtype	type	sub	iuse	...
READ_CONVINFO:	gps	4	0	1	METOP-A
READ_CONVINFO:	gps	41	0	-1	CHAMP
READ_CONVINFO:	gps	722	0	1	GRACE-A
READ_CONVINFO:	gps	723	0	-1	GRACE-B
READ_CONVINFO:	gps	740	0	1	COSMIC (FM1)
READ_CONVINFO:	gps	741	0	1	COSMIC (FM2)
READ_CONVINFO:	gps	742	0	1	COSMIC (FM3)
READ_CONVINFO:	gps	743	0	1	COSMIC (FM4)
READ_CONVINFO:	gps	744	0	1	COSMIC (FM5)
READ_CONVINFO:	gps	745	0	1	COSMIC (FM6)
READ_CONVINFO:	gps	820	0	1	SAC-C
READ_CONVINFO:	gps	42	0	1	TerraSAR-X
READ_CONVINFO:	gps	43	0	-1	Tandem-X
READ_CONVINFO:	gps	786	0	1	C/NOFS
READ_CONVINFO:	gps	421	0	-1	OCEANSAT-2
READ_CONVINFO:	gps	3	0	1	METOP-B
READ_CONVINFO:	gps	821	0	-1	SAC-D/Aquarius
READ_CONVINFO:	gps	440	0	-1	Megha-Tropiques

O operador de observações implementado para o cálculo dos perfis de refratividade a partir dos dados do modelo (refratividade modelada) é o proposto em Cucurull (2010), em que para isso é usada a fórmula de Thayer (1974) (Eq. 5.1), obtendo-se de forma mais precisa a refratividade ( $N$ ) na atmosfera neutra.

$$N = \kappa_1 \left( \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \kappa_2 \left( \frac{P_w}{T} \right) Z_w^{-1} + \kappa_3 \left( \frac{P_w}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (5.1)$$

Nessa equação,  $P_d$  é a pressão do ar seco,  $P_w$  é a pressão do vapor d’água e  $T$  é a temperatura absoluta. Os coeficientes  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  e  $\kappa_3$  são constantes do índice de refratividade atmosférica, e  $Z_d^{-1}$  e  $Z_w^{-1}$  são considerados os fatores inversos da compressibilidade do ar seco e do vapor d’água, respectivamente, tendo em conta pequenas características a partir do comportamento de um gás ideal.

Para o cálculo da refratividade modelada primeiramente a altura geométrica da observação é convertida a altura geopotencial. Seguidamente, as variáveis do modelo tais como pressão, temperatura (virtual) e umidade específica são interpoladas à localização da observação e a refratividade modelada é obtida usando a fórmula

anterior a partir desses valores interpolados. O algoritmo de assimilação produz incrementos de pressão em superfície, vapor d'água de níveis ao redor da observação e temperatura (virtual) ao redor da observação e em todos os níveis abaixo da observação (por exemplo, uma observação pode modificar a sua posição na vertical). Cada observação é tratada independentemente e dentro dos controles de qualidade e estrutura do erro a altura limite é 30 km, sendo que as observações em alturas acima são rejeitadas pelo sistema.

No cálculo dos ângulos de curvatura modelados, o operador de observações usado é o proposto em Cucurull et al. (2013) usado operacionalmente no NCEP. Nesse, a formulação (Eq. 5.2) corresponde à obtenção do ângulos de curvatura em função do parâmetro de impacto como segue:

$$\alpha(a) = -2a \int_a^\infty \frac{\frac{dn(n)}{dx}}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx \quad (5.2)$$

em que  $\alpha$  corresponde ao parâmetro de impacto,  $n$  é o índice de refração atmosférico e  $x = nr$ , é o raio refracional o qual seria o parâmetro de impacto de um raio com um ponto tangente de altura  $r$  e permanece constante ao longo da trajetória de um raio para uma atmosfera esfericamente simétrica.

Para a obtenção das observações de ângulo de curvatura modeladas, primeiramente os campos previstos devem ser convertidos em perfis de refratividade usando o operador anterior e logo em índice de refração segundo a relação  $n = 1 + 0.000001N$ . A seguir é calculado o produto  $nr$  e o ângulo de curvatura modelado é calculado usando a sua vez interpoladores lagrangianos para levar a refratividade modelada na localização da observação do ângulo de curvatura. São aplicados os procedimentos de controle de qualidade uma vez sintonizados os erros de representatividade, nessa etapa as observações acima de 50 km são rejeitadas. Os Jacobianos para a minimização da função custo são calculados e guardados bem como a informação de diagnóstico nos arquivos de saída do GSI. Percebe-se que o cálculo dos ângulos de curvatura modelados é mais complexo que o do perfil de refratividade modelado uma vez que são um produto anterior.

Mais informações sobre o uso dos dados de ROGNSS usando o GSI podem ser encontradas em Cucurull et al. (2007), Cucurull et al. (2013).

A assimilação de dados de ângulo de curvatura no CPTEC foi possível uma vez que atualizada a versão do GSI em uso nesse centro, sendo que no G3DVar não eram

assimilados. Porém, nesta primeira versão do protocolo de avaliação dos dados de ROGNSS no SMG são usados os perfis de refratividade.

### **5.3.2 Avaliação do desempenho dos dados de ROGNSS no SMG\_V1.0.0**

Como a atual versão do SMG é a primeira versão onde os dados de ROGNSS são assimilados nesse projeto, nessa seção é apresentado uma avaliação para caracterizar o desempenho desses dados no sistema. Para monitorar o desempenho de toda a base de dados no SMG durante a evolução do mesmo, foi criado um protocolo que padroniza a avaliação e permite comparar de forma objetiva as curvas de desempenho dos sistemas de observação e outras frentes de trabalho no desenvolvimento do SMG. Para realizar uma avaliação inicial do desempenho dos dados de ROGNSS usando esse protocolo foram usados os resultados das saídas do SMG processadas do pacote STAT nos experimentos EX2ORA e o EX1ALL. No primeiro observe que não foi assimilado os dados de radiância do ASMU-A, e nessa análise ele é tomado como controle (CNT). O experimento EX1ALL é tomando como um experimento mais evolutivo com a inclusão dos dados de radiância do AMSU-A. Os dados de ROGNSS no período analisado foram advindos dos satélites LEO: MetOp-A e MetOp-B, da constelação COSMIC, do TerraSAR-X, GRACE-A e C/NOFS. No protocolo as saídas do GSI e do pacote STAT são processadas, organizadas e são geradas figuras que sintetizam os resultados e facilitam a avaliação. Considerando que esses satélites atualmente apenas contam com receptores de sinais GPS, as figuras geradas fazem referência a assimilação de dados de rádio ocultação dos sinais GPS (ROGPS).

A primeira análise se refere a distribuição espacial dos dados assimilados nos experimentos EX1ALL para se avaliar se os mesmos cobrem todo o globo e se é possível identificar um padrão espacial nos valores do OmF. A Figura 5.13 mostra a posição média de cada perfil de radio ocultação com uma indicação de cores que relacionam com os satélites que as observaram. Observa-se que os satélites da serie MetOp tem uma melhor distribuição dos dados no globo do que os demais satélites.

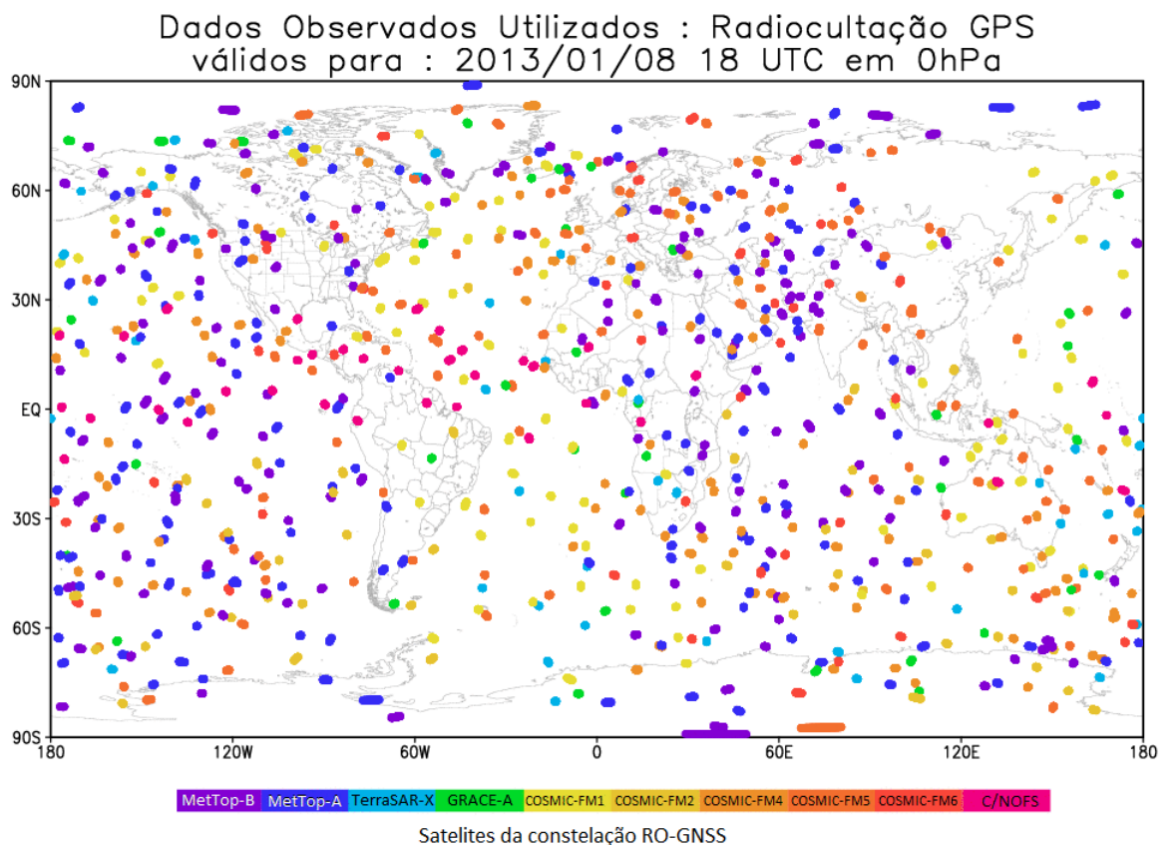


Figura 5.13 - Distribuição espacial dos perfis de ROGNSS assimilados no SMG para a data 2013010818 no nível de 0hPa no modelo em função dos satélites utilizados no SGI. A escala de cores nessa figura indicam os satélites envolvidos em cada perfil vertical assimilado.

A quantidade de dados de refratividade assimilados de cada satélite de ROGNSS é avaliada usando uma série temporal no período (figura não mostrada), na qual pode ser observado que os resultados para os dois experimentos indicam que de forma geral as quantidades assimiladas são similares em ambos os experimentos. Nota-se também que há existência de vários dias em que não há assimilação desses dados para alguns satélites, os quais estão relacionados com a disponibilidade dos mesmos para essas datas. Os motivos dessas falhas deverão ser investigados e sanados os problemas se existirem. Em uma análise mais minuciosa é possível observar que há uma diferença na razão entre dados assimilados/rejeitados durante o processo de assimilação de dados no período estudado. Assim, as diferenças entre ambos os experimentos (EXP-CTL) é apresentada na Figura 5.14, na qual pode ser observado que ao não assimilar os dados de radiancias existe uma tendência negativa nos primeiros dias do mês indicando que uma menor quantidade de dados de refratividade são assimilados e posteriormente essa tendência torna-se positiva indicando que a medida que o ciclo

de assimilação avança no tempo, maior quantidade de refratividade é assimilada. Ou seja, os dados de refratividade são impactados positivamente com o aumento do número de ciclos de assimilação quando são incluídas as radiâncias advindas do AMSU-A. Obviamente, o mesmo padrão é observado em relação à quantidade de dados rejeitados. Primeiramente, no experimento testando a inclusão dos dados de radiância eram rejeitados uma maior quantidade de dados de refratividade sendo que após aproximadamente o ciclo 52 (1800 UTC do dia 12 de Janeiro) se observa uma tendência à rejeitar menos dados de refratividade que no experimento controle. Isso é um indicativo do impacto negativo na quantidade de dados aceitos e rejeitados pelo GSI quando não são incluídos os dados de radiância no experimento controle, sinalizando para a importância desses dados dentro do sistema complementando o uso dos dados de ROGNSS.

Differences of the assimilated and rejected GPS RO observations by satellite.  
Period: 2013010100 - 2013013118

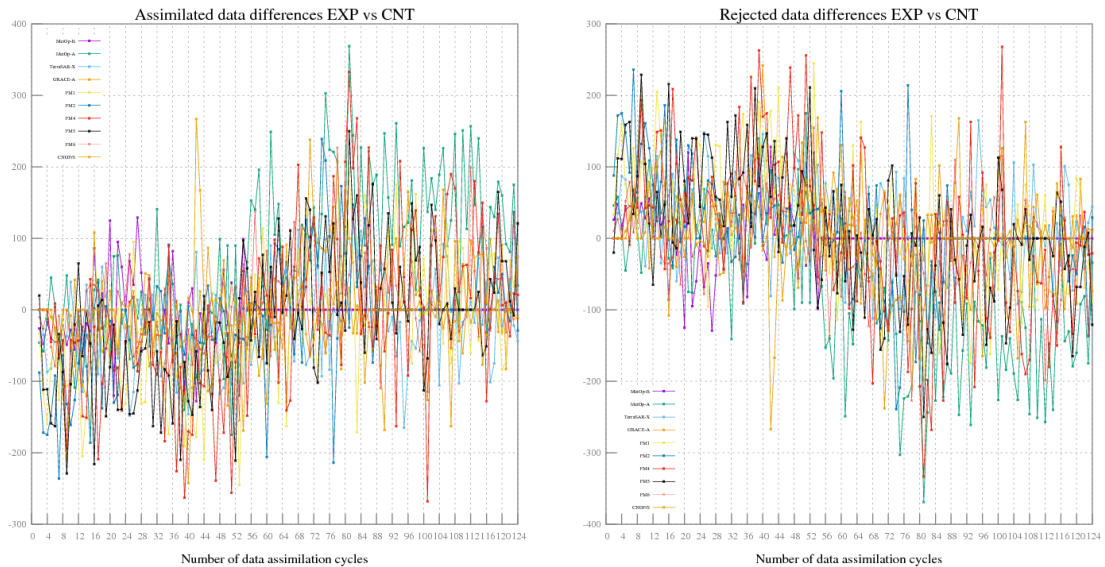


Figura 5.14 - Série temporal da diferença na quantidade de dados de refratividade assimilados (painel esquerdo) e rejeitados (painel direito) dos diferentes satélites LEO envolvidos na ROGNSS para o mês de Janeiro de 2013.

Para analisar o valor das diferenças de OmA, um perfil vertical das mesmas é apre-

sentado na Figura 5.15 para cada satélite. Primeiramente pode ser observado que assimilando dados de refratividade da ROGNSS os níveis mais impactados são os níveis altos da atmosfera, sendo que por exemplo, os dados dos satélites MetOp-B e MetOp-A abaixo de 8 km são rejeitados nos procedimentos de controle de qualidade como recomendado pelo centro de processamento GRAS SAF, isso está relacionado com a qualidade desses dados ao usar o método de óptica geométrica no processo de recuperação. Mais detalhes sobre a qualidade dos dados advindos de ambos os satélites nos níveis inferiores podem ser encontrados em HEALY (2014). No caso dos outros satélites foi comprovado o menor nível em que os dados não eram mais rejeitados durante todo o período, a fim de realizar corretamente as estatísticas da média e o desvio padrão. Após o processo de assimilação de dados um resultado ótimo seria que as análises geradas possuam diferenças pequenas de OmA, o qual indica que a análise se encontra bem perto do que foi observado naquele intervalo de tempo. Na Figura 5.15 pode ser observado que as curvas representado os resultados do experimento controle mantêm-se mais perto de zero, indicando que ambas as diferenças no OmA são menores nesse experimento. No caso do segundo experimento ao conter mais informações, especificamente as de radiâncias, essas diferenças observam-se mais frias, ou seja, que o *first-guess* possui valores maiores que o observado e conseqüentemente, a análise é também maior que o observado embora com uma diferença menor.

Vertical profiles of OmA's mean +/-stdev by satellite. Period: 2013010100 - 2013013118

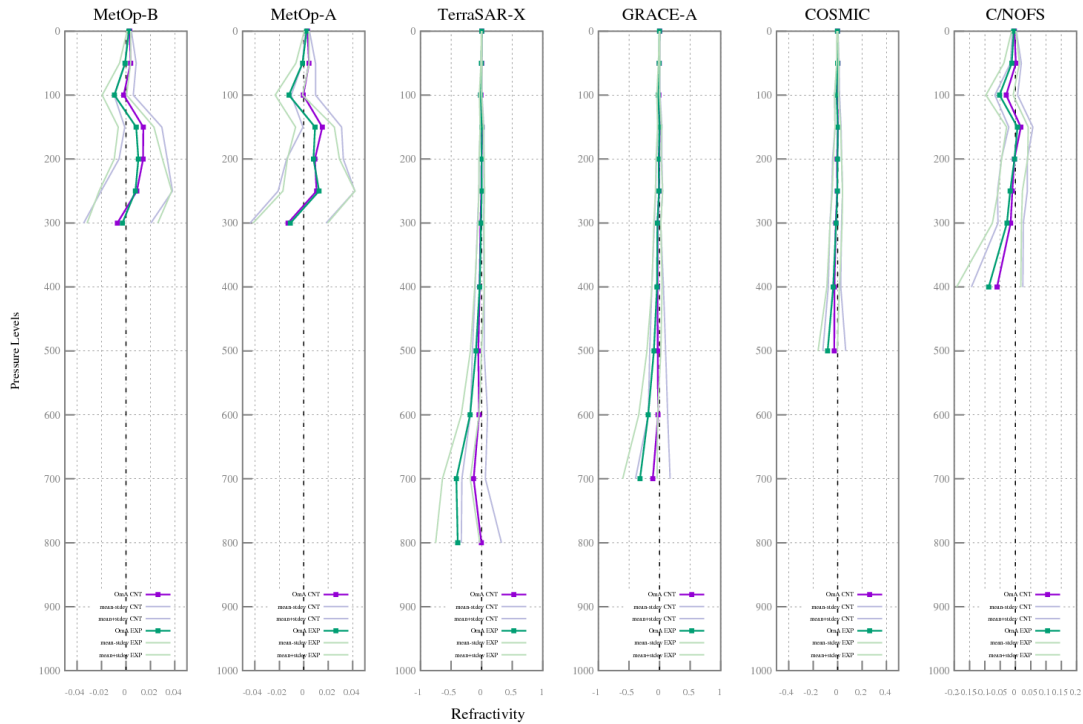


Figura 5.15 - Perfis verticais das diferenças médias de observações de refratividade menos as análises (OmA) em função dos níveis de pressão, para cada experimento e para cada satélites.

Um outro elemento avaliado no protocolo para os dados de ROGNSS são as informações sobre o valor da função custo ( $J_o$ ) para cada tipo de observação e global, antes e depois do processo de minimização. Esse resultado pode ser observado na Figura 5.16 em que se apresenta a contribuição do tipo de observação de ROGNSS usado (perfil de refratividade), na fração de redução da função custo. Observa-se que quando as observações de radiâncias são incluídas (EXP), a contribuição das observações de RO-GPS se mantêm entre 20% e 40% em cada ciclo de assimilação sendo maior nos horários correspondentes às 0600 e 1800 UTC pois a quantidade das outras observações é menor. Já quando as radiâncias não são assimiladas (CNT), as refratividades contribuem em 30% e 60%, ou seja, passam a ser o sistema com maior contribuição na fração de redução de  $J_o$ . Novamente os horários onde a contribuição é maior corresponde às 0600 e 1800 UTC. Por sua vez, em relação à contribuição de cada observação de refratividade, como se observa no painel direito da Figura 5.16, no experimento EXP a contribuição das refratividade oscila entre  $0,3 \times 10^{-6}$  e  $0,5 \times 10^{-6}$ , sendo que no experimento CNT essa contribuição é muito maior, entre  $0,^{-6}$  e  $1,7 \times 10^{-6}$  atingindo  $2 \times 10^{-6}$  em alguns ciclos de assimilação (por exemplo no

ciclo 92 que se corresponde às 1800 UTC do dia 22 de janeiro). A partir dessa figura, percebe-se que o segundo sistema de observações que mais contribui para a redução de  $J_o$  nos experimentos e período analisado são as observações de ROGNSS, sendo que se as observações de radiâncias não são assimiladas a contribuição das de ROGNSS aumenta.

Contribution of GPS RO's observations to the reduction of the total cost function.  
Period: 2013010100 - 2013013118

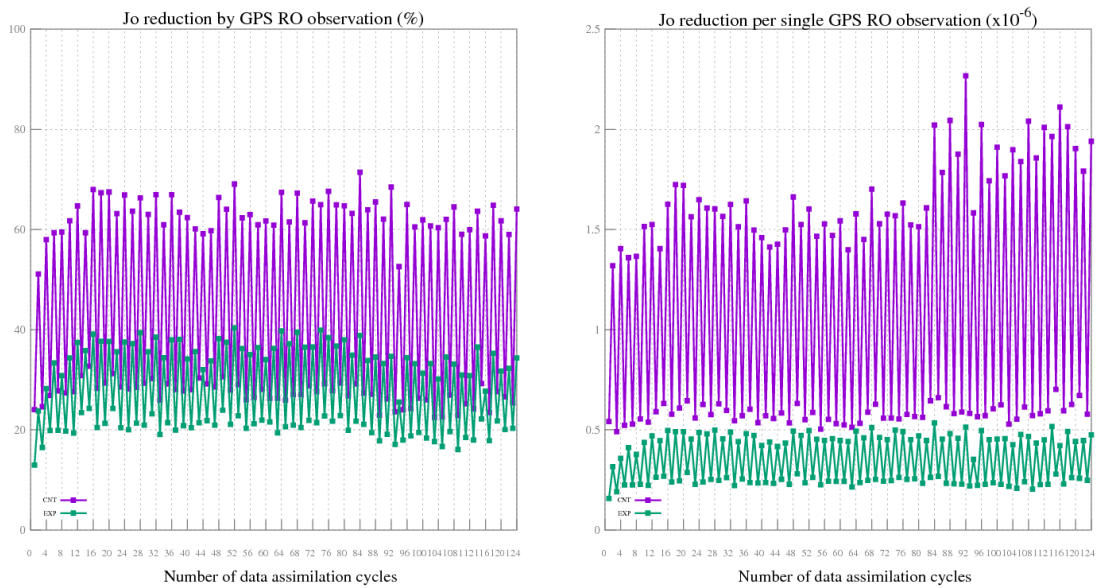


Figura 5.16 - Contribuição das observações de refratividade da ROGNSS em porcentagem (painel esquerdo) e normalizadas pelo número de observações utilizadas (painel direito), na redução da função custo nas análises geradas em cada ciclo de assimilação durante todo o mês de Janeiro de 2013, em cada experimento (CTL, curva roxa e EXP, curva verde).

#### 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 plataforma orbitais da série NOAA (NOAA-15, 16, 17, 18 e 19) e MetOP, 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, sendo a primeira versão do sistema SMG a ingerir esse tipo de dado. 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. Para a 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 5.17 e 5.18 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 (fig. 5.17), 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 (5.18), 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 plos dessa figura os dados de radiância 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 abundante e cobrem regiões não cobertas pelos satélites NOAA-18/19.

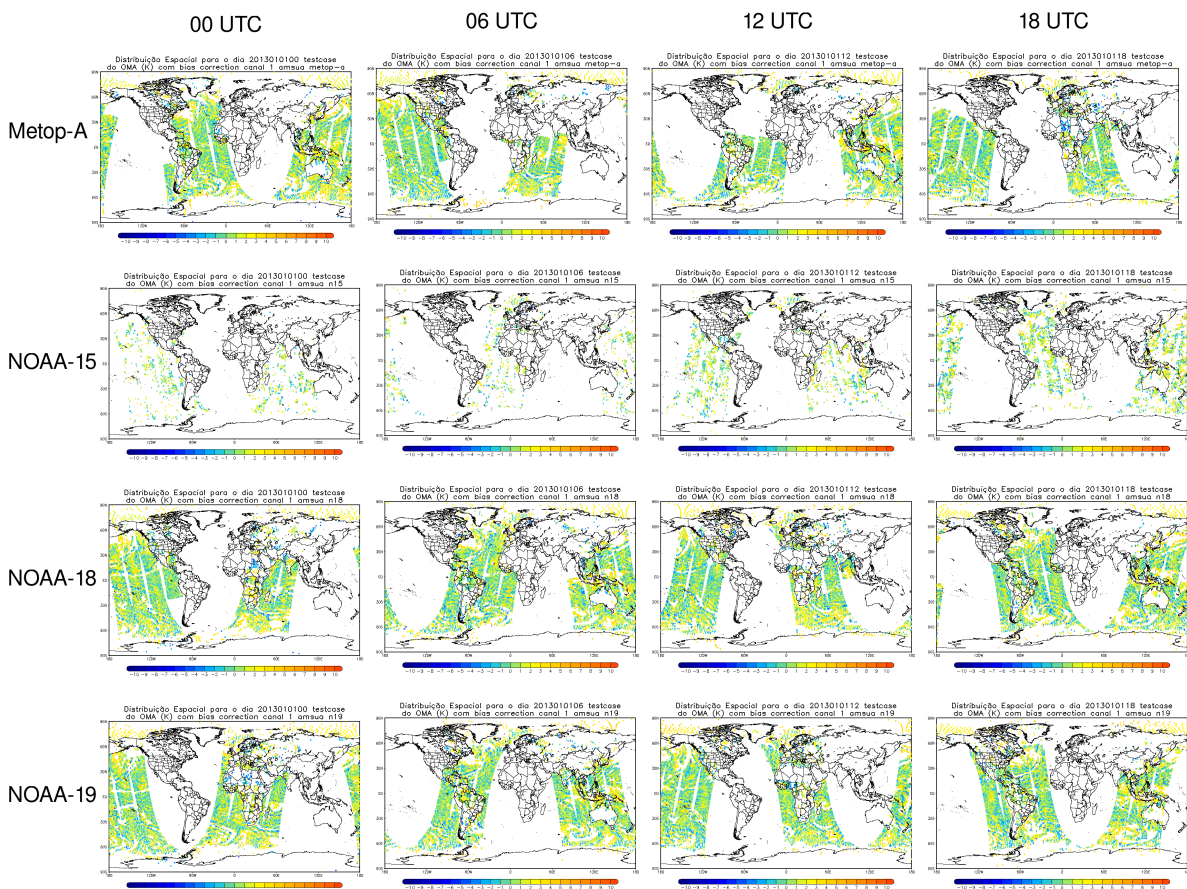


Figura 5.17 - Distribuição espacial de OmA (K) com correção de bias, durante os horários sinóticos. Considerando o canal 1 do experimento EX1ALL usando a versão SMG\_V1.0.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.

Para descrever o numero de observações assimiladas em cada um dos canais de cada satélite nos diferentes horário sinóticos a Figura 5.18 mostra um gráfico de barras com tais informações para o primeiro dia do experimento EX1ALL que usa a versão SMG\_V1.0.0. Nessa figura é possível observar que a maior concentração dos dados assimilados estão entre os canais 6-12. 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 numero 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.

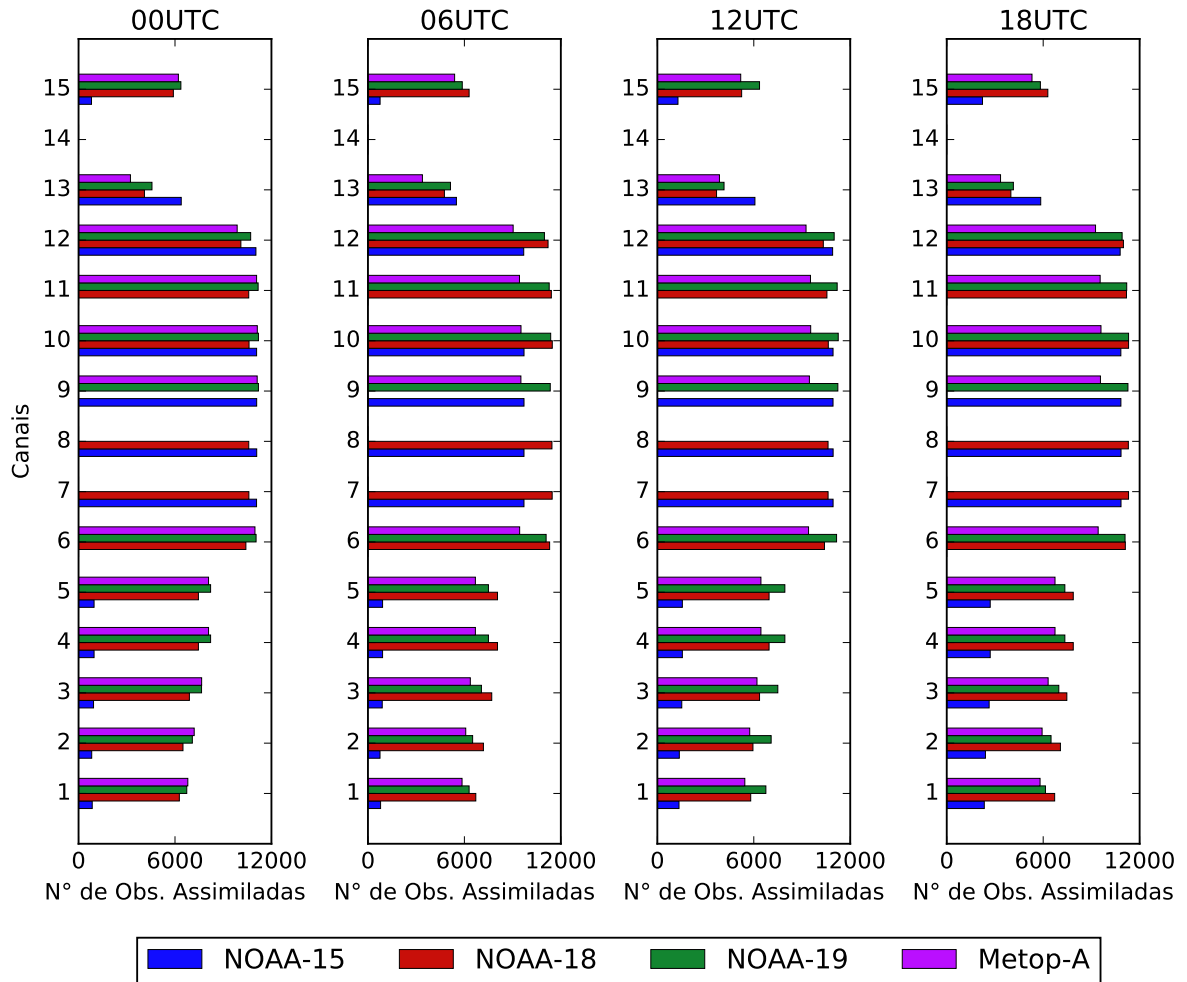


Figura 5.18 - Número de observações assimiladas, por canal, do experimento EX1ALL usando a versão SMG\_V1.0.0 para o dia 01/01/2013, para os satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19.

## 6 Avaliação da versão do ponto de vista do impacto dos dados nas previsões

Essa avaliação é realizada utilizando a ferramenta Sistema de Avaliação de Impacto (SAI) a qual identifica a contribuição dos dados na previsão numérica de tempo bem como nas previsões de precipitação em uma análise bastante preliminar. Uma avaliação mais robusta considerando as previsões até 5 dias deverá ser disponibilizada nas próximas versões do SMG, depois dos ajustes no modelos BAM avançar apropriadamente.

### 6.1 Avaliação do impacto dos dados nas previsões numéricas geradas pelo BAM

O objetivo do SAI é a avaliação do impacto de toda a base de dados na qualidade final da previsão de tempo gerada no sistema SMG, permitindo que seja quantificado os benefícios de cada sistema de observação, bem como diagnosticado suas deficiências e possíveis imperfeições quando for o caso. Esse sistema de avaliação será muito útil durante o processo de operacionalização do SMG pois permitira o monitoramento da assimilação dos dados ajudando a identificar problemas durante o processo e permitir o envolvimento dos responsáveis pelos dados no processo de assimilação operacional. No presente documento, a função do SAI é apresentar um diagnóstico do status da eficiência do sistema de assimilação em usar as informações contidas nas observações para impactar positivamente na qualidade das previsões geradas pelo modelo.

A Figura 6.1 mostra os resultados preliminares para os experimentos realizados para a avaliação da versão SMG\_1.0.0 em um gráfico de barras onde o EX0CNT (Dados convencionais usando a versão SMG\_0.0.1) é apresentado em azul, o EX1ALL (CONV+SATWIND+ROGNSS+AMSU-A usando a versão SMG\_V1.0.0) em verde e o experimento sem os dados de radiância em vermelho. Essa Figura 6.1 é composta de 4 subplots que descrevem: (a) do impacto fracional das observações nas análises; (b) fração de observações benéficas; (c) número total de observações assimiladas; (d) impacto por observação.

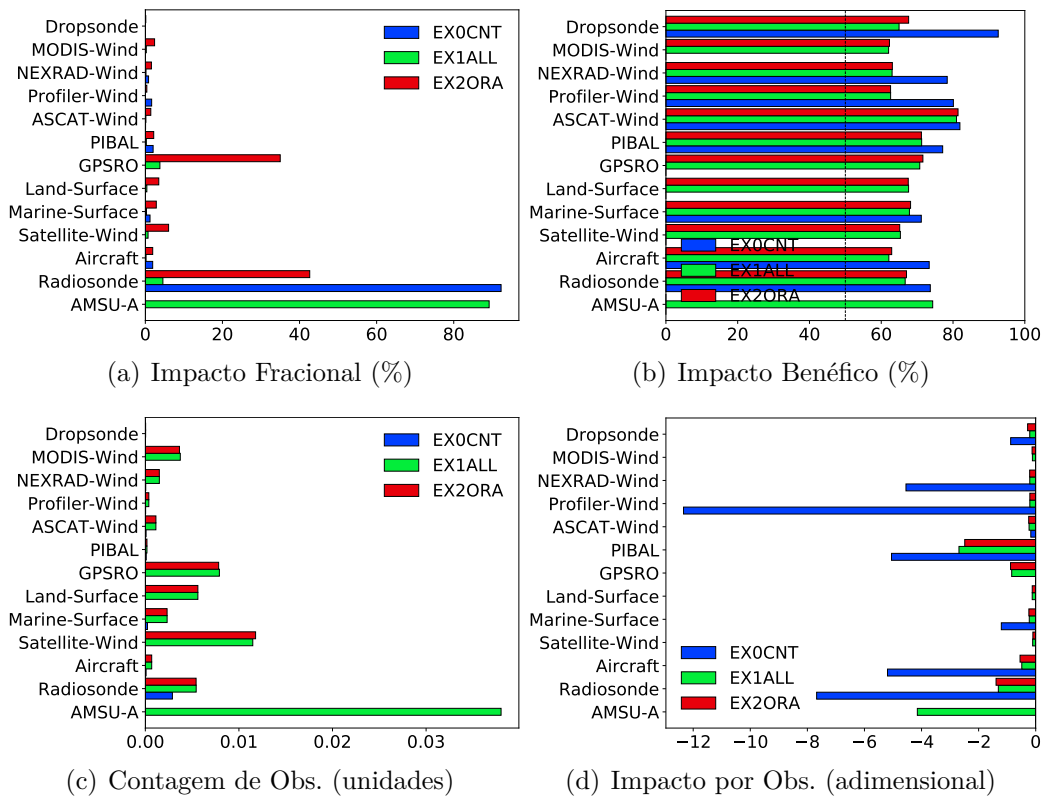


Figura 6.1 - Plotagens em barras para cada grupo de observação avaliado nos experimentos EX0CNT (azul), EX1ALL (verde) e EX2ORA (vermelho) realizados com o SMG, durante o mês de janeiro de 2013: (a) do impacto fracional das observações nas análises, a unidade é %; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é  $10^7$ ; e (d) do impacto por observação, a unidade é adimensional.

A Figura 6.1(a) apresenta no experimento controle quando apenas dados convencionais eram assimilados as radiossondas dominavam quanto a melhoria das previsões geradas com um impacto maior que 90% enquanto que os demais sistemas de observações apresentavam impacto menores do que 5%. No experimento EX2ORA, onde dados de radiância não foram assimilados o impacto das radiossondas foi de 40% seguido pelos dados de ROGNSS com 35% e SatWind com 7%. No entanto com a inclusão dos dados de radiância do sensor AMSU-A esse quadro muda drasticamente sendo esses dados com 90% e todos os demais inclusive as radiossondas, ROGNSS e SatWind com impactos menores do que 5%, o que demonstra a importância significativa dos dados de radiância do AMSU-A. Na Figura 6.1(b) observa-se que todos os sistemas de observações apresentam um impacto benéficos acima de 60%, com destaque para as dropsondes com valores acima de 90% quando apenas dados convencionais são assimilados. Obviamente que o numero de dados de cada

sistema de observação deve ser levado em consideração nessa análise. Esses valores são mostrados na Figura 6.1(c) e mostra que a quantidade de dados de radiância é muito maior que os dados dos outros sistemas. Algo que pode ser destacado nessa figura é que com a assimilação de dados de radiância houve um aumento, mesmo que sutil da quantidade de dados assimilados em outros sistemas de observação, tais como ROGNS (já destacado na seção anterior), radiossondas e MODIS-WIND. Um efeito contrário foi observado nos dados de SatWind que merecem ser investigados. Para normalizar os resultados em função do número de dados assimilados em cada experimento a Figura 6.1(d) apresenta o valor do impacto para cada observação individualmente e mostra o quanto é importante cada sistema sem penalizar nessa análise o número reduzido de observações disponível. Observa-se que quando apenas dados convencionais são assimilados os *Wind-Profiler* são bastante importantes. Quando dados de radiância do AMSU-A não são assimilados balões pilotos são os sistemas mais impactantes seguidos pelas radiossondas e ROGNSS. Quando as radiâncias são assimiladas elas são as mais importantes e depois são seguidas pelos mesmos sistemas e sequência observada sem a assimilação dos dados de radiâncias.

## 6.2 Diagnóstico preliminar das previsões de precipitação

A fim de se ter ideia sobre a qualidade dos campos de chuva produzidos pelo sistema SMG a partir das análises do sistema GSI, foram avaliadas as previsões de precipitação total produzidas pelo modelo BAM. A comparação é apresentada na Figura 6.2, em que estão mostradas também os campos de precipitação do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP v1.2 1DD) e também o campo de precipitação total produzido pelo modelo BAM, mas a partir das análises do NCEP.

O objetivo desta avaliação é verificar se a partir das análises produzidas ciclicamente pelo sistema SMG, o modelo BAM é capaz de reproduzir as características principais da distribuição global da precipitação. Na Figura 6.2, estão representadas as médias temporais das previsões de precipitação de 9 horas, válidas para o mês de Janeiro de 2013, às 12Z. Em geral, o modelo BAM é capaz de reproduzir os principais sistemas precipitantes, e.g., as zonas de convergência intertropical, do Pacífico Sul e Atlântico Sul. Além disso, nota-se também a proporção semelhante da distribuição da precipitação de larga escala e convectiva entre os campos avaliados. Neste aspecto, observa-se que o modelo BAM foi capaz de produzir (na média) acumulados mais coerentes com o observado, sobretudo sobre o Pacífico Sul. Apesar disso, sobre a região Amazônica, o modelo BAM acumulou mais precipitação (e também a espalhou mais), sendo que o modelo BAM com a análise do NCEP representou o campo (nesta

região) com distribuição e acumulados menos concentrados.

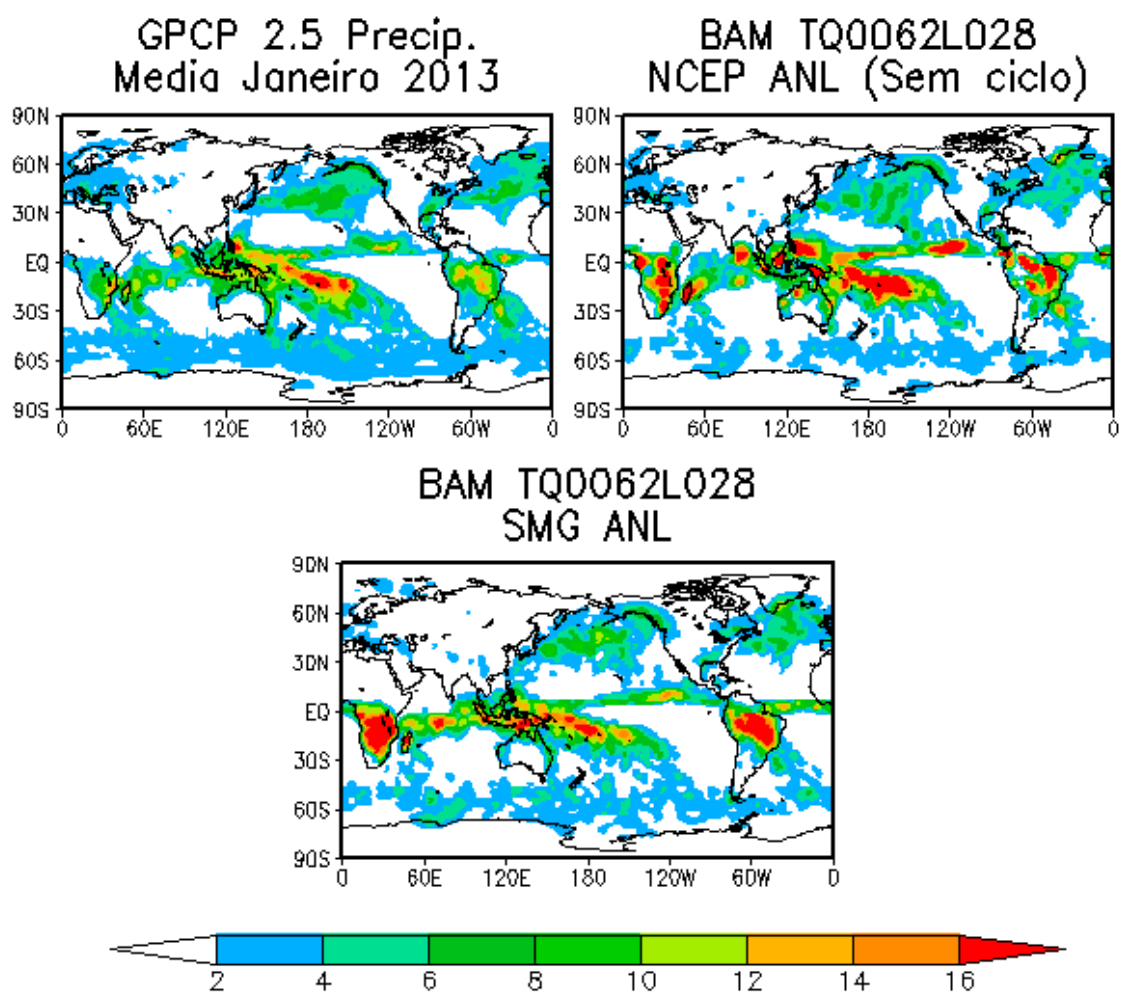


Figura 6.2 - Campos de precipitação total (mm/mês) produzidos pelo modelo BAM, a partir das análises do sistema SMG (figura de cima, à direita) e NCEP (figura de baixo). A comparação é feita com os dados observados dp GPCP (figura de cima, à esquerda).



## 7 Conclusões, comentários finais e perspectivas futuras

Nesta seção é sintetizado os resultados mais relevantes de cada frente de avaliação diagnóstica, as quais devem orientar o caminho no desenvolvimento do SMG, e na avaliação dos resultados por ele gerados no aprimoramento dos protocolos de avaliação. Essa síntese em forma de conclusões, portanto, terá dois enfoque: o primeiro sobre a avaliação diagnóstica da versão V1.0.0 e o segunda no que precisa ser melhorado ou aprimorado nos protocolos de avaliação. Isso é tratado nas seções subsequentes, as quais deverão ser mantidas nas próximas publicações das séries dos relatórios de avaliação diagnósticas do SMG, com o objetivo de nortear tanto o desenvolvimento do sistema como o processo de avaliação utilizado. Como perspectivas futuras aqui é descrito um *roadmap* dos próximos passos no desenvolvimento do sistema, apenas para formalizar as intenções, embora o processo de execução pode diferir por facilidades ou conveniências na implementação.

### 7.1 Diagnóstico da versão SMG\_V1.0.0

Como essa avaliação é a primeira, a avaliação diagnóstico da versão do sistema é apenas preliminar e diversos pontos dessa avaliação ainda não foram apropriadamente contemplados, os quais são evidenciados na próxima seção. Assim, para essa avaliação preliminar os pontos mais relevantes de cada um dos aspectos da avaliação são listados abaixo em forma de tópicos nos quais a mesma sequencia 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 radiância demonstrou o sucesso dessa tarefa e os resultados na qualidade das previsões de precipitação e a avaliação do impacto dos dados na qualidade das previsões atestam isso;
2. **Otimização do código:** Essa tarefa não foi necessária nessa versão

pois a resolução é muito baixa e não exigiu atenção nesse aspecto. Mais detalhes sobre esse item deverá ser abordado no futuro;

3. **Ajustes e configurações na física e dinâmica do BAM:** Esse item não foi avaliado pois ainda não foi tratado, o que deverá ser feito nos próximos meses com o apoio da equipe do modelo BAM da DMD;

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

1. **Implementação de melhorias na matriz B:** Dados aos bons resultados reportado pela versão SMG\_V1.0.0, 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;
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. Como a resolução espacial é baixa e a quantidade de dados ainda não é exorbitante esse aspecto ainda não foi impactante no desempenho do sistema. Isso deverá ser tratado adequadamente no desenvolvimento futuro do SMG;
3. **Avaliação da contribuição da Injunção de Umidade:** Como nessa versão não foram modificados os valores da injunção de umidade, essa avaliação apenas diagnostica a existência e a relevância do problema. Os resultados indicam que de fato há a necessidade de explorar a injunção de umidade pois observa-se uma tendência significativa de aumento dos valores não físicos de umidade com o processo cíclico. Os valores de umidade negativa são bastante frequentes nos polos e menor no equador enquanto que os valores supersaturados tem um padrão oposto. Durante o período de um mês que relativamente curto para esse estudo observou-se um aumento muito grande no numero de casos de supersaturação na região equatorial e esse valor aumenta com o aumento no número de dados assimilados o que indica preocupação na evolução do SMG e deve ser adequadamente tratado;

4. **Avaliação da configuração dos parâmetros de Conservação de Massa Seca:** Embora apenas um estudo de sensibilidade foi feito onde 3 meses de dados foram avaliados, os resultados mostram que o sistema SMG é sensível a modificação dos parâmetros de injeção da conservação de massa seca e deverá ser avaliado de forma mais apropriada na continuidade dos desenvolvimentos.

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

1. **Inclusão dos Dados Convencionais:** De forma geral a partir da análise preliminar apresentada nesse documento, no que se refere aos dados convencionais os valores do OmF e OmA das observações realizadas pelas radiossondas, foi possível observar que nas variáveis temperatura, umidade e pressão a superfície os valores do OmA foram menores do que os valores médios do OmF, o que é uma indicação do sistema de assimilação funcionando corretamente. Na caso do vento existem alguns níveis em que há a necessidade de se avaliar com detalhes todos os dados assimilados, pois não houve melhorias na análise em comparação com os valores previsto tendo a observação como referências;

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:** A versão do SMG demonstrou que com a assimilação dos dados de ROGNSS houve uma melhora do sistema em representar a atmosfera na análise. Um padrão interessante é que houve um aumento do número de dados assimilados quando dados de radiação foram assimilados o que é um bom indicador do processo de assimilação de dados implementado;

4. **Inclusão dos Dados de Radiação:** Os dados de radiação ainda não foram devidamente avaliados aqui, por não ser função do presente documento, o que deverá ser feito no futuro próximo.

## 7.2 Lista de melhorias a serem implementadas na avaliação

Como o processo de avaliação é dinâmico e deve acompanhar a evolução da versão do SMG, o mesmo sempre precisa de receber ajustes para se adequar a essa evolução e também aprimorar a forma de mostrar os resultados encontrados. Essa seção tem a função de listar as deficiências de cada protocolo como indicação para os investimentos futuros em tempo ou recursos humanos adicionais a serem depositados nesse projeto. Para as melhorias da Categoria I, associadas a implementação geral do sistema, como protocolos são tratadas as ferramentas de avaliação geral do mesmo, tais como o SAI, o SCANTEC e a avaliação de precipitação, todos apresentados na capítulo anterior desse documento. Assim, na presente versão os pontos que merecem destaque para cada um dos protocolos utilizados na avaliação do GSI são apresentados abaixo:

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

1. **Sistema de Avaliação de Impacto (SAI):** A versão usada do sistema para a elaboração dessa avaliação é bastante preliminar e diversos ajustes podem ser realizados com o refinamento do sistema separando a base de dados de forma mais discretizada e espacialmente. Isso deverá ser feito futuramente na continuidade do desenvolvimento da ferramenta;
2. **SCAMTEC:** Esse sistema não foi ainda utilizado nessa versão do documento;
3. **Avaliação da qualidade das previsões de precipitação:** A avaliação da precipitação atmosférica para essa versão apresentou-se adequada. Com a evolução do sistema metodologias mais apropriadas deverão ser implementadas quando outras resoluções espaciais mais alta forem utilizadas.

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

1. **Implementação de melhorias na matriz B:** Como uma meta futura a longo médio prazo, o desenvolvimento de um índice que informe ou quantifique a adequação da matriz **B** em uso no modelo seria bastante oportuno. Esse protocolo seria muito útil para monitorar a qualidade da matriz **B** em uso e indicar em que circunstâncias

ou quando deveria ser prioritário a substituição da matriz em uso. Está-se trabalhando nisso;

2. **Ajustes na minimização da Função Custo:** Há a necessidade de organizar melhor os resultados em figuras que sintetizem mais as informações colocando o valor médio e o desvio padrão em uma mesma figura e permitindo comparar duas versões em um mesmo gráfico. Os gráficos da contribuição parcial dos diferentes sistemas de observações (como apresentado na análise de ROGNSS) deveriam ser tratados nesse protocolo. Curvas de tendências poderiam ser implementadas nos gráficos dos valores mínimos da função custo;
3. **Avaliação da contribuição da Injunção de Umidade:** Nesse protocolo há a necessidade de se usar um período de dados maior e criar uma metodologia de separa a contribuição da integração do modelo e do passo de assimilação. Um estudo de cada um dos níveis do modelo também poderá ser explorado para identificar as regiões onde os valores de umidade não físico ocorreram na alta atmosfera;
4. **Avaliação da configuração dos parâmetros de Conservação de Massa Seca:** UM período maior de avaliação deverá ser realizado com pelo menos 1 ano de rodada para avaliar o comportamento e eficiência da injunção de conservação de massa seca na versão do BAM em uso no SMG. O desenvolvimento dos *scripts* desse protocolo ainda estão por ser implementado;

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

1. **Inclusão dos Dados Convencionais:** O protocolo de avaliação dos dados convencionais é ainda preliminar e muito ainda deverá ser feito. Isso será trabalhado no próximo passo do processo, onde um investimento pesado para cada um dos diversos tipos de dados serão apropriadamente avaliado criando metodologias específicas para os mesmos;
2. **Inclusão dos Dados de SatWind:** Esse protocolo também é preliminar e deverá receber investimentos para explorar melhor o uso desses dados com um diagnóstico preciso do desempenho dessa base de dados no SMG; Algo que ainda não foi avaliado é o papel dos dados de SatWind na ausência da radiância do AMSU-A, o que vai ser feito posteriormente;

3. **Inclusão dos Dados de ROGNSS:** Para o protocolo da ROGNSS deverá ser aprimorado com uma melhor avaliação dos dados rejeitados em especial nos últimos níveis da atmosfera;
  
4. **Inclusão dos Dados de Radiância:** Como essa versão não visa avaliar adequadamente a assimilação dos dados de radiância o desenvolvimento desse protocolo foi postergado para a próximo passo do desenvolvimento, o que deverá ser feito com atenção especial para os dados rejeitados e as possíveis causas.

### 7.3 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 gerar uma versão robusta com a assimilação de dados com o BAM na resolução T62 e depois de resolvidos os maiores problemas usando essa versão, faz-se a entrega da versão T213 com a assimilação de toda a base de dados disponível com a inclusão dos dados de radiância dos sensores hiper espectrais. Assim, para garantir que o desenvolvimento do sistema seja robusto, diversas subversões da versão V1.0.0 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. A ideia é que as duas frentes de trabalho, tanto o desenvolvimento como a avaliação avancem em paralelo sendo que o passo de avaliação é feita na versão anterior publicada. A tabela abaixo mostra um cronograma esquemático das atividades a serem realizadas nos próximos meses e as respectivas versões do sistema abordado em cada uma dessas frentes.

Tabela 7.1 - Cronograma para o período de curto prazo (Set.2017 a Jan.2018) das atividades associadas as próximas versões de publicação do SMG divididas em duas frentes de trabalho: Avaliação diagnóstica e Desenvolvimento.

Mês	Avaliação diagnóstica		Desenvolvimento	
	Atividades	Versão	Atividades	Versão
Set.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Avaliação robusta dos dados convencionais;</li> <li>-Avaliação da assimilação de radiações;</li> <li>-Avaliação robusta da assimilação de dados SatWind.</li> </ul>	V1.0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nova Matriz B usando dados do SMG_V1.0.0;</li> <li>-Ajustes na injeção de conservação de Massa Seca;</li> <li>-Ajustes iniciais da injeção de umidade;</li> <li>-Inclusão da radiação do MHS.</li> </ul>	V1.1.0
Out.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Refazer as análises de todas as frentes das três categorias;</li> <li>-Implementar melhorias nos protocolos;</li> <li>-Apriorar o protocolo de conservação de massa seca;</li> <li>-Corrigir erros e imperfeições nos protocolos.</li> </ul>	V1.1.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Matriz B com 1 ano de dados;</li> <li>-Ajustes na injeção de umidade;</li> <li>-Substituição de refratividades para Bending Angle;</li> <li>-Ajustes configuração do BAM;</li> <li>-Inclusão da radiação do HIRS;</li> <li>-Correção de bias da radiação.</li> </ul>	V1.2.0
Nov.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Refazer as análises de todas as frentes das três categorias;</li> <li>-Implementar melhorias nos protocolos;</li> <li>-Dar ênfase para o protocolo da humNphy;</li> <li>-Corrigir erros e imperfeições nos protocolos;</li> </ul>	V1.2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Correções de bugs e melhoramentos no código; -Ajustes finos na injeção de umidade;</li> <li>-Ajustes configuração do BAM;</li> <li>-Aprimoramento na base de dados assimilados;</li> <li>-Otimização do sistema visando melhor resolução.</li> </ul>	V1.5.0
Jan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Finalizar a avaliação na resolução T062</li> <li>-Refazer as análises de todas as frentes das Três categorias;</li> <li>-Implementar melhorias nos protocolos</li> <li>Publicar relatório final da versão T062.</li> </ul>	V1.5.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versão T213 com avaliação da instabilidade;</li> <li>-Matriz B usando dados na resolução T062;</li> <li>-Avaliação do custo computacional na minimização da FC;</li> <li>-Ajustes na base de dados usados;</li> <li>-Ajuste inicial nas injeções;</li> <li>-Tratamento de Bugs na nova resolução.</li> </ul>	V2.0.0

Na próxima fase que seria no período de Fevereiro a Julho de 2018, será aprimorada a versão do sistema na resolução T213, a qual pretende-se pré-operacionaliza-la em março e colocar em operação em julho. Mais detalhes dessa próxima fase será tratado na próxima versão desse documento com a publicação da versão SMG\_

V1.5.0, no final do ano de 2017. Esse 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 projeto no próximo ano em sintonia com o planejamento das atividades da assimilação de dados para o quadriênio 2016-2019. Cabe lembrar que nessas próximas versões também envolverá a combinação da assimilação híbrida, a previsão por conjunto e assimilação em modelos de superfície e os passos iniciais na assimilação oceânica.



## 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. 54

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. 54

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. 54

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S.; HERRING, T. A.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H. Gps meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, n. 3, p. 379–386, 1994. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2)>. 55

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>>. 56

CUCURULL, L.; DERBER, J. C.; PURSER, R. J. A bending angle forward operator for global positioning system radio occultation measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 1, p. 14–28, 2013. ISSN 2169-8996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2012JD017782>>. 55, 57

CUCURULL, L.; DERBER, J. C.; TREADON, R.; PURSER, R. J. Assimilation of global positioning system radio occultation observations into ncep's global data assimilation system. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 9, p. 3174–3193, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/MWR3461.1>>. 57

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.pdf](http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/presentations/2010_tutorial/L2-0628-GSI_Overview_JohnDerber.ppt.pdf)>. 35, 38

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)>. 26

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>>. 34

HEALY, S. B. Single frequency radio occultation retrievals: Impact on numerical weather prediction. **SAF/ROM/DMI/REP/RSR/018**, 2014. Disponível em: <[http://www.romsaf.org/general-documents/rsr/rsr\\_18.pdf](http://www.romsaf.org/general-documents/rsr/rsr_18.pdf)>. 61

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>>. 52

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>>. vi, 53

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. 4, 14, 18

RÜEGGER, J. M. Refractive index formulae for radio waves. 01 2002. 55

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. 54

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/mtc-m21b/2016/08.16.18.59>>. Acesso em: 31 ago. 2017. 39, 40

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. 39, 40

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>>. 54

THAYER, G. D. An improved equation for the radio refractive index of air. **Radio Science**, v. 9, n. 10, p. 803–807, 1974. ISSN 1944-799X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/RS009i010p00803>>. 56

WARNER, T. **Numerical Weather and Climate Prediction**. Cambridge University Press, 2010. ISBN 9781139494311. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6RQ3dnjE8lgC>>. 26

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. 27