



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.07.21.52-TDI

IMPACTO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS NO SISTEMA DE ASSIMILAÇÃO DE DADOS PSAS DO CPTEC-INPE

Flavio Santos de Cerqueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luiz Fernando Sapucci, aprovada em 16 de março de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BFQUNH>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

Dr^a 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)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.07.21.52-TDI

IMPACTO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS NO SISTEMA DE ASSIMILAÇÃO DE DADOS PSAS DO CPTEC-INPE

Flavio Santos de Cerqueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luiz Fernando Sapucci, aprovada em 16 de março de 2012.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BFQUNH>](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BFQUNH)

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C335i Carneiro, Rogério Lessa de Castro.
Impacto de perfis de rádio ocultação GNSS no sistema de assimilação de dados PSAS do CPTEC-INPE / Flavio Santos de Cerqueira. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xxiv + 99 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.07.21.52-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luiz fernando Sapucci.

1. GNSS. 2. GPS. 3. assimilação. 4. PSAS. 4. rádio ocultação.
I.Título.

CDU 551.5

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. José Antônio Aravéquia



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Dirceu Luis Herdies



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Luiz Fernando Sapucci



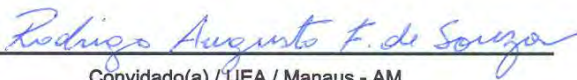
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de
Gonçalves



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza



Convidado(a) / UEA / Manaus - AM

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

☒ unanimidade

Aluno (a): Flávio Santos de Cerqueira

São José dos Campos, 16 de março de 2012

“As grandes obras são realizadas, não pela força, mas pela perseverança.”

Johnson

À minha esposa, Débora, e filhas, Natália e Ana Clara.

AGRADECIMENTOS

À Força Aérea Brasileira e ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo, por ter possibilitado a realização deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por ter me proporcionado os conhecimentos necessários para essa tarefa.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, por todo apoio e suporte oferecidos.

Ao Dr. Dirceu Luis Herdies, meu Orientador, por ter acreditado na minha capacidade de realizar esta pesquisa, pelos conselhos e orientações na elaboração do trabalho.

Ao Dr. Luiz Fernando Sapucci, meu co-Orientador, pelo incentivo, auxílio e orientações constantes. Foi um privilégio ter sido orientado e co-orientado por esses professores.

Ao Dérek Schubert, programador, sempre pronto a ajudar na solução dos diversos problemas encontrados durante a pesquisa, pela amizade e por toda ajuda e apoio.

Aos membros do Grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados(GDAD), pelo auxílio recebido, em especial aqueles envolvidos de forma direta e indireta com a implementação operacional do PSAS no CPTEC. Seria impossível a realização desta pesquisa sem a colaboração que recebi no CPTEC.

Aos colegas de curso que contribuíram para realização deste trabalho, e com amizade e alegria tornaram a jornada mais suave.

A tantos outros professores e funcionários do CPTEC /INPE que, prontamente, auxiliaram na busca por soluções.

Ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo, pelo apoio em todas as etapas do curso. Faço menção especial ao Tenente Coronel Cleber; ao Tenente Coronel Gisler e ao Major Cleomenes.

Às secretárias da Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), Simone Umeno e Luana Schmidt, pelo excelente trabalho, atenção e apoio prestados.

À minha família, minha esposa Débora e minhas filhas, Natália e Ana Clara, pelo amor e compreensão que recebi durante o tempo dedicado às diversas etapas do curso.

Por fim, agradeço a Deus que tornou tudo isso possível e selecionou pessoas incríveis para que eu pudesse conhecer e ter a possibilidade de concluir este trabalho. Não menos importante do que a conclusão da pesquisa, foram as amizades construídas e as diversas lições aprendidas na superação dos obstáculos.

RESUMO

Estudos sobre a sensibilidade dos modelos de previsão numérica de tempo a erros nas condições iniciais têm mostrado a importância de se ter uma descrição precisa do estado inicial da atmosfera, a fim de se obter boas previsões. Nesse contexto, a assimilação de perfis obtidos por rádio ocultação GNSS (*Global Navigation Satellite System*) tem se mostrado como uma ferramenta adicional na redução das deficiências do sistema de coleta de dados meteorológicos. A assimilação desses perfis tem sido aplicada em sistemas de assimilação com sucesso em importantes centros de previsão de tempo e os resultados mostram que os mesmos contribuem para a melhoria da qualidade das condições iniciais do modelo. Com o intuito de explorar os benefícios dessa adicional fonte de dados na previsão numérica de tempo gerada pelo modelo global do CPTEC-INPE, GPSAS T213L42, foram realizados experimentos assimilando perfis atmosféricos de altura geopotencial e umidade obtidos por rádio ocultação GNSS, utilizando dados da constelação COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate), para os meses de janeiro e julho de 2009. Os experimentos mostraram uma significativa redução no viés nas análises de altura geopotencial, umidade e vento, da troposfera e estratosfera, bem como um menor RMS das previsões em comparação com as análises. Os resultados mostraram que a inclusão dos dados de rádio ocultação GNSS proporcionou um ganho de 36hs na previsão. Sobre o Hemisfério Sul, Os ganhos na correlação de anomalia alcançaram valores de 0,17 a 0,22 para altura geopotencial em 500hPa, o equivalente a um ganho de 66 horas na previsão. Os benefícios da assimilação dos dados de ROGNSS também se estenderam aos campos de vento e umidade, demonstrando um significativo e positivo impacto desses dados sobre a previsão do modelo Global do CPTEC-INPE. O impacto da assimilação sobre as previsões mostrou-se mais proeminente sobre o Hemisfério Sul.

ASSIMILATION OF GPS RO PROFILES AND ITS IMPACT ON CPTEC-INPE GLOBAL MODEL

ABSTRACT

Assimilation of Radio Occultation profiles has shown to be a useful tool to reduce deficiencies in the meteorological data collection system. These profiles have the potential to improve the quality of the initial model conditions generated in the process of data assimilation, and have been applied successfully by many weather predictions centers. In order to explore the benefits of this additional data source on numerical weather prediction generated by the CPTEC-INPE Global model, experiments assimilating COSMIC profiles into PSAS (Physical-space Statistical Analysis System) have been done. In order to investigate the impact of RO-GPS data on the analysis and forecast generated by the CPTEC global model, COSMIC atmospheric profiles of geopotential height and water vapor were employed for two months (January and July 2009) . Experiments show that the assimilation of GPS RO data leads to a significant reduction of biases in the forecast of geopotential, humidity and wind in the upper troposphere and the stratosphere, as well as a better r.m.s fit when compared to analysis. The results show that the inclusion of GPS-RO data extends the forecast range by 36 additional hours. The impact on forecasts was most prominent when processing the data from the Southern Hemisphere. Anomaly correlation score for 500hPa geopotential heights improves by 0.17-0.22 in the Southern Hemisphere. The benefits from assimilating GPS RO data were also shown to apply to wind and humidity, demonstrating a significant and positive impact of GPS RO data in the CPTEC global model forecasting.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Constelação de satélites GPS a 20.200km de altitude, em seis órbitas planas com inclinação de 55°.....	06
Figura 2.2 - Distribuição de 2111 sondagens diárias realizadas em seis de maio de 2007 com o COSMIC que opera com seis satélites LEO.....	09
Figura 2.3 - Processo de ocultação e movimento relativo entre os satélites GPS e LEO.....	10
Figura 2.4 - Dedução de propriedades atmosféricas baseada em medidas precisas do atraso de fase e amplitude do sinal, sob a influência da ionosfera e atmosfera neutra..	10
Figura 2.5 - Perfil vertical de refratividade obtido durante o processo de ocultação.....	11
Figura 2.6 - Geometria de uma ocultação instantânea com o GPS e o satélite LEO.....	11
Figura 2.7 - Representação esquemática da geometria de uma rádio ocultação GPS.....	14
Figura 2.8 - Predomínio dos termos da Equação (2.3) em função da altura do ponto tangente durante um evento de Rádio Ocultação GNSS.....	17
Figura 2.9 - Visualização esquemática de um sistema de assimilação de dados 3DVar.....	24
Figura 2.10 - Fluxograma do algoritmo de Levenberg-Marquardt.....	27
Figura 3.1 - Distribuição espacial dos dados provenientes de instrumentos em bases terrestres disponíveis para assimilação no CPTEC-INPE referentes ao dia 14 de junho em 2005 (figura 1a) e em 2007 (figura 1b) às 12:00UTC.....	40
Figura 3.2 - Distribuição espacial dos dados de satélites utilizados para a assimilação no CPTEC-INPE referentes ao dia 14 de junho em 2005 (figura 2a) e em 2007 (figura 2b) as 12:00 UTC.....	40
Figura 3.3 - Sondagens diárias realizadas pelo COSMIC/ FORMOSAT-3 mostradas em verde, e estações de radiossonda plotadas em vermelho.....	42
Figura 3.4 - Quantidade de perfis verticais diários fornecidos pelo COSMIC e disponíveis para assimilação referentes ao mês de janeiro de 2009.....	43
Figura 3.5 - Quantidade de perfis verticais diários fornecidos pelo COSMIC e disponíveis para assimilação referente ao mês de julho de 2009.....	43

Figura 4.2 -	Desvio padrão dos valores de OMF para observações de altura geopotencial obtidas por rádio ocultação GNSS, em diferentes níveis de pressão e diferentes faixas de latitude abrangendo ambos os hemisférios.....	50
Figura 4.3 -	Desvio padrão dos valores de OMF para diferentes observações assimiladas no GPSAS.....	51
Figura 4.4 -	Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 20°N e 20°S.....	52
Figura 4.5 -	Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 20°S e 50°S. Dados de rádio ocultação ROGNSS, dados de satélite (TOV_B) e dados de radiossondas (RAOB).....	53
Figura 4.6 -	Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 50°S e 90°S. Dados de rádio ocultação (ROGNSS), dados de satélite(TOV_B), dados radiossonda(RAOB).	53
Figura 4.7 -	Valores de RMS para 12hs de previsão da variável altura geopotencial obtidos com o experimento de controle para o mês de janeiro de 2009, onde HS designa hemisfério sul, HN hemisfério norte e PS latitudes entre 50°S e 90°S a) Análise do controle (Actrl) utilizada como referência. b) Análise do experimento (RO GNSS) utilizada como referência.....	56
Figura 5.1 -	Experimentos de Controle e teste (Assimilação de perfis RO GNSS) com Previsões globais para o mês de janeiro de 2009. a) RMS altura Geopotencial em 250hPa. b) RMS altura geopotencial em 500hPa. c) CA para altura geopotencial em 250hPa.; d) CA em 500hpa; e) RMS UR em 500hPa; f) RMS vento meridional em 500hPa.....	60
Figura 5.2 -	Experimentos de Controle e teste (contendo assimilação de perfis verticais de altura geopotencial RO GNSS) com previsões globais para o mês de julho de 2009. a) RMS altura geopotencial em 250hPa. b) RMS altura geopotencial em 500hPa. c) RMS UR em 500hPa; d)RMS vento meridional em 500 hPa; e) CA para altura geopotencial em 250hPa f) CA em 500hpa.....	62
Figura 5.3 -	Viés referente aos experimentos controle e teste (Assimilação dos perfis de Altura Geopotencial RO GNSS). a) Viés Vento zonal 500hPa (jul/09); b) Viés Altura geopotencial 850hPa (jul/09); c) Viés Vento zonal 500hPa (jan/09); d) Viés Altura geopotencial 850hPa (jan/09)	63

Figura 5.4 -	Experimentos de controle e teste (Assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade - Jan09-Exp1c) com previsões globais para o mês de janeiro de 2009. a) RMS altura geopotencial em 500hPa; b) RMS altura geopotencial em 850hPa; c) CA altura geopotencial em 250hPa; d) CA altura geopotencial em 500hPa.....	64
Figura 5.5 -	Experimentos de controle e teste (Assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade - Jul09-Exp1c) com previsões globais para o mês de julho de 2009; a) CA altura geopotencial em 500hPa; b) CA altura geopotencial em 250hPa.....	65
Figura 5.6 -	Experimentos contendo a assimilação dos perfis RO GNSS de altura Geopotencial – Jul09-Exp1b e altura geopotencial e umidade - Jan09-Exp1c, com previsões globais para o mês de julho de 2009. a) CA altura geopotencial em 500hPa; b) RMS altura geopotencial em 500hPa; c) CA umidade relativa em 850hPa d) RMS umidade relativa em 850hPa; e) CA vento zonal em 850hPa;f) RMS vento zonal em 850hPa	66
Figura 5.7 -	Previsões para o HN com experimentos de controle (Controle-A1c) e assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade (Jan09-Exp1c). a) CA altura geopotencial em 500hPa.;b) CA altura geopotencial 850hPa.....	67
Figura 5.8 -	Previsões para o HS com os experimentos de controle (Controle-A1c) e Assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade nos meses de janeiro (Jan09-Exp1c) e julho (Jul09-Exp1c); a) CA altura geopotencial em 850hPa - JAN09.; b) CA altura geopotencial 850hPa-JUL09; c) CA altura geopotencial em 500hPa-JAN09 ; d) CA altura geopotencial 500hPa-JUL09; d) altura geopotencial 250hPa-JAN; e) altura geopotencial 250hPa-JUL	69
Figura 5.9 -	Previsões para o HS com os experimentos de controle (Controle-A1c) e Assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade nos meses de janeiro (Jan09-Exp1c) e julho(Jul09-Exp1c);a) viés altura geopotencial em 500hPa-JAN09.; b) viés altura geopotencial 850hPa -JAN09; c) viés altura geopotencial em 500hPa - JUL09 ; d) viés altura geopotencial 850hPa- JUL09.....	71

- Figura 5.10 - Experimentos de controle e assimilação de altura geopotencial e Umidade(Exp1c) para América do Sul, em janeiro;a) CA altura geopotencial em 500hPa b) CA altura geopotencial em 250hPa; c) CA vento zonal em 250hPa; d) CA vento meridional em 250hPa.. 72
- Figura 5.11 - Experimentos de controle (Ctrl-Aexp1c) e assimilação de altura geopotencial e umidade(Jul09-Exp1c), no mês de Julho, para a América do Sul; a) RMS Vapor d'água integrado; b) RMS UR 700hPa; c)RMS UR 850hPa; d) RMS vento zonal 250hPa; e) RMS vento zonal 500hPa; f) RMS vento meridional 500hPa.. 73

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1– Configuração utilizada nas diferentes resoluções dos modelos de PNT do CPTEC	37
Tabela 5.1– RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, para o mês de janeiro de 2009, para faixas de latitude abrangendo ambos os hemisférios. Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade.....	75
Tabela 5.2– RMS dos valores de OMF para altura geopotencial no mês de julho de 2009. Dados globais com a exclusão dos perfis RO GNSS para os experimentos de controle e experimento de assimilação de altura geopotencial e umidade ROGNSS (Exp1c).....	76
Tabela 5.3– RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, para o mês de Janeiro de 2009, para faixas de latitude abrangendo o hemisfério sul. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade.....	77
Tabela 5.4– RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, proveniente de radiossondagens no HS, para o mês de janeiro de 2009. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de altura geopotencial e umidade.....	78
Tabela 5.5– RMS dos valores de OMF para altura geopotencial obtida por radiossondas no mês de julho de 2009, com o experimento de controle e experimento de assimilação de altura geopotencial e umidade RO GNSS (Exp1c).....	79
Tabela 5.6– RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, proveniente de perfis RO GNSS no HS e HN. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade	80
Tabela 5.7– RMS dos valores de OMF e OMA da variável altura geopotencial, proveniente de dados globais. Exp1b designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e Exp1c altura geopotencial e umidade.....	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIRS	Atmospheric InfraRed Sounding
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
ATOVS	Advanced TIROS-N/NOAA Operational Vertical Souder
CDAAC	Centro de Análise e Arquivo de Dados do COSMIC
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application
COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAO	Data Assimilation Office
ECMWF	European Centre for Medium Range Forecast
GFS	Global Forecast System
GFSC	Goddard Space Flight Center
GFZ	National Research Center for Earth Sciences in Germany
GPSAS	Global Physical-space Statistical Analysis System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRAS SAF	Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding Satellite Application Facilities
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GTS	Global Telecommunication System
ICESAT	Ice, Cloud, and land Elevation Satellite
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITCZ	Inter-tropical Convergence Zone
KOMPSAT	Korean Multipurpose Satellite
LEO	Low Earth Orbit
Met Office	Meteorological Office
MetOp	Meteorological Operational Satellite
MRF	Medium Range Forecast
NCEP	National Centers for Environmental Predictions
NetCDF	Network Common Data Form
NWP	Numerical Weather Prediction
ODS	Observation Data Stream
OI	Optimal Interpolation
PNT	Previsão Numérica de Tempo
PSAS	Physical-space Statistical Analysis System
RO GPS	Rádio Ocultação GPS
RMS	Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de Impacto
α	Ângulo de Curvatura
γ	Gravidade normal à superfície terrestre
ρ	Densidade do ar seco
n	Refração
N	Refratividade
P	Pressão
P_w	Pressão de Vapor
q	Umidade específica
r_t	Raio do ponto tangente
T	Temperatura

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos	03
1.2 Conteúdo do trabalho	04
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 GNSS (Global Navigation Satellite System).....	05
2.2 Rádio Ocultação NSS	08
2.2.1 Obtenção de $\alpha(a)$ através de medidas de variação Doppler.....	13
2.3 Perfis atmosféricos a partir da RO GNSS	16
2.3.1 Refratividade(N).....	16
2.3.2 Componente Ionosférica	17
2.3.3 Componente Seca	17
2.3.4 Componente Úmida	18
2.4 Assimilação de dados de Rádio Ocultação GNSS	19
2.5 Estratégias de Assimilação	20
2.5.1 Exemplo de Procedimentos adotados na Assimilação da Refratividade	22
2.5.2 Assimilação Variacional de Dados	22
2.5.3 Utilização do Método Variacional 1D-VAR na obtenção do perfis de temperatura, pressão e umidade específica	24
2.6 Impacto da Assimilação RO-GNSS em outros centros operacionais.....	30
3 - MODELO DE PNT UTILIZADO E DADOS DISPONÍVEIS.....	35
3.1 Modelo Global	35
3.2 O Sistema de Assimilação de Dados PSAS.....	37
3.3 Dados convencionais e de satélites utilizados na assimilação	39
3.4 Dados RO GNSS disponíveis	41
3.5 Dados RO-GNSS FORMOSAT-3/COSMIC empregados	42
4 - METODOLOGIA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DO IMPACTO	45
4.1 Estratégia para desenvolvimento	46
4.1.1 Conversão da altura geométrica em altura geopotencial	47
4.2 Controle de qualidade dos dados RO-GNSS	48

4.3 Determinação preliminar de OmF	49
4.4 Distribuição e quantidade de dados de altitude assimilados no sistema operacional do CPTEC	52
4.5 Experimentos Realizados	54
4.6 Análise empregada na avaliação das previsões	55
5 - RESULTADOS DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS	59
5.1 Resultados dos experimentos de assimilação de perfis de altura geopotencial RO – GNSS	59
5.2 Resultados dos experimentos de assimilação dos perfis de altura geopotencial e umidade RO-GNSS	64
5.3 Análise dos experimentos para o hemisfério norte	67
5.4 Análise dos experimentos para o hemisfério sul	68
5.5 Análise dos experimentos para a América do Sul	72
5.6 Análise dos valores de Omf e OmA	74
6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	83
6.1 Conclusões	83
6.2 Perspectivas futuras	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO A – ESTRUTURA DOS PERFIS COSMIC 1DVAR	97

1 INTRODUÇÃO

Na última década observou-se um substancial progresso na ciência e tecnologia do sensoriamento remoto da atmosfera, bem como dos sistemas de navegação por satélite. Gleason (2009) utiliza o termo navegação para descrever o processo de determinação da posição, velocidade e, em alguns casos, a orientação de um objeto. Embora, até o advento dos sistemas de navegação global por satélite, uma navegação precisa fosse algo reservado apenas aos mais habilidosos navegadores, ou para aqueles que podiam arcar com os custos de um caro sistema de navegação. Hoje, o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) tem tornado a navegação precisa disponível às massas. Esses sistemas são utilizados para gerar uma estimativa da posição, velocidade e tempo, através do processamento de sinais transmitidos por satélites em órbitas conhecidas.

Nos últimos anos, o número de aplicações militares, comerciais e científicas, alavancadas por informações precisas de posicionamento e tempo, cresceu significativamente (Gleason et al., 2009). Com a evolução dos sistemas de navegação por satélite e a implantação de receptores GNSS em satélites de órbita baixa (*LEO-Lower Earth Orbits*), surge a Rádio Ocultação GNSS, técnica que permite a obtenção de perfis atmosféricos com aplicação na Previsão Numérica de Tempo e Climatologia. GNSS é o termo utilizado para se designar um sistema de navegação baseado em satélites artificiais capaz de fornecer posicionamento geo-espacial autônomo com cobertura global. Esse sistema integra todos os sistemas com essas características atualmente disponíveis. Dentre estes, destacam-se o sistema americano GPS (*Global Positioning System*) em completa operação; o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), sistema russo de navegação por satélite, atualmente em processo de restauração; o GALILEO, sistema de posicionamento da União Européia, em fase de desenvolvimento, e o COMPASS, projeto de expansão do atual sistema de navegação regional Chinês.

A primeira missão que permitiu empregar a técnica de Rádio Ocultação GNSS foi a que lançou o satélite GPS/MET, que gerou dados de sondagem da atmosfera neutra e da ionosfera. Em sequência ao sucesso do GPS/MET também foram lançados outros satélites LEO com receptores GPS a bordo, dentre os quais estão o CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), MetOP (*Meteorological Operational Satellite*), e FORMOSAT-3/COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate*). China e Korea estão trabalhando em futuros programas de Rádio Ocultação, respectivamente denominados ICESAT/GLAS, TERRA-SAR, COMPASS E KOMPSAT-5 (Shuanggen et al, 2011). Os atuais avanços e as projeções, em relação à quantidade e qualidade de perfis atmosféricos distribuídos ao redor do globo, revelam um futuro promissor para a RO GNSS dado ao já demonstrado significativo impacto nos resultados dos modelos numéricos de previsão de tempo.

Grandes centros de previsão numérica de tempo têm se utilizado dessa fonte de dados para aumentar a habilidade de previsão de seus modelos numéricos. Em um estudo preliminar conduzido por Cucurrul et al.(2006), os resultados mostraram que a assimilação das observações RO GNSS produziu uma redução no viés da temperatura e da umidade para todas as latitudes, em especial sobre o hemisfério sul e trópicos. Em setembro de 2006, o Met Office implementou a assimilação de perfis de refratividade fornecidos por RO GNSS em seu modelo de previsão numérica de tempo global. Em um artigo intitulado “*Operational NWP Assimilation of GPS Radio Occultation Data*” (Buontempo et al. 2008), são apresentados dois experimentos com o objetivo de determinar o potencial impacto da assimilação de dados RO GPS nos resultados da previsão numérica. Mesmo sob a limitação de uma pequena quantidade de dados, provenientes dos satélites CHAMP e GRACE-A, o experimento revelou um positivo impacto sobre os valores de temperatura, altura geopotencial, e pressão ao nível médio do mar no Hemisfério Sul.

A atual expansão dos sistemas GNSS e o crescente aprimoramento da técnica de obtenção de dados tornam a rádio ocultação GNSS promissora, com potencial de fornecer vasta rede de dados de qualidade e globalmente distribuídos. Antevendo os benefícios dessa rede de dados para previsão numérica de tempo, grandes centros de previsão têm se preparado e aplicado com sucesso a assimilação de perfis RO GNSS. Considerando os bons resultados obtidos por outros centros, e a pouca quantidade de dados meteorológicos da atmosfera superior disponíveis, sobretudo no hemisfério sul, o presente trabalho se propõe a investigar o impacto da assimilação de perfis verticais de altura geopotencial e umidade, provenientes de rádio ocultação GNSS, no sistema de assimilação de dados do CPTEC-INPE.

1.1 Objetivos

O Objetivo principal desse trabalho é avaliar o impacto da assimilação dos dados de rádio ocultação GNSS na melhoria do desempenho do modelo de previsão numérica de tempo do CPTEC, do ponto de vista operacional. Para isso os seguintes objetivos específicos são perseguidos:

- a) Fazer um estudo da quantidade de dados de RO-GNSS disponíveis e avaliar sua distribuição espacial e fluxo temporal verificando seu potencial para a operacionalização;
- b) Avaliar as diferenças entre os perfis de RO GNSS e o First Guess do modelo para verificar quais os erros desse tipo de observação a ser utilizado no processo de assimilação;
- c) Desenvolver uma metodologia de assimilação de dados de altura geopotencial e umidade, provenientes de rádio ocultação GNSS visando sua futura operacionalização no CPTEC-INPE;
- d) Avaliar o impacto da assimilação dos perfis de RO GNSS na versão global do PSAS atualmente operacional no CPTEC, simulando condições operacionais;

- e) Analisar o impacto da assimilação dos dados RO GNSS de altura geopotencial e adicionalmente da altura geopotencial e umidade simultaneamente.
- f) Avaliar a distribuição espacial dos perfis verticais de altura geopotencial atualmente disponíveis para assimilação e verificar o impacto da assimilação dos perfis RO GNSS em diferentes faixas de latitude.

1.2 Conteúdo do trabalho

Para atingir tais objetivos o trabalho é dividido nas seguintes partes: O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre assimilação de perfis de RO GNSS, na qual é apresentada uma detalhada descrição dos sistemas de navegação que compõem o GNSS, a formulação utilizada na técnica de RO GNSS, uma revisão sobre a assimilação desses dados e seu impacto em outros centros. No Capítulo 3 são apresentados detalhes dos modelos utilizados nos experimentos, os dados RO GNSS disponíveis para o estudo, bem como os demais dados utilizados. No Capítulo 4 são apresentados detalhes da metodologia utilizada para a assimilação dos perfis de RO GNSS no GPSAS e detalhes da estratégia utilizada para avaliar o impacto desses dados. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados e a respectiva análise dos mesmos. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, as conclusões que o trabalho permitiu obter e as perspectivas futuras para a evolução da assimilação desses dados no CPTEC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para alcançar os objetivos propostos é necessário tratar alguns conceitos relacionados à teoria em questão, bem como o equacionamento do problema envolvido. Para tanto, o presente capítulo apresenta uma detalhada descrição dos sistemas de navegação que compõem o GNSS, os conceitos e a formulação utilizada na técnica de RO GNSS, uma descrição dos métodos de obtenção de perfis atmosféricos a partir da RO GNSS, estratégias de assimilação de dados RO GNSS e seu impacto em outros centros.

2.1 GNSS

Serão descritos a seguir os principais sistemas de navegação global por satélites existentes, bem como o potencial de contribuição desses sistemas no fornecimento de uma densa rede de dados globalmente distribuídos.

Dentre os sistemas de navegação global por satélites existentes, o GPS foi o primeiro a alcançar completa capacidade operacional, tendo o seu primeiro satélite sido lançado em 1978. Atualmente é o único sistema que se encontra funcionando operacionalmente em sua totalidade. Originalmente denominado “NAVSTAR (*Navigation System with Timing And Ranging*) Global Positioning System”, planejado para operar com uma constelação de 24 satélites postos em órbita pelo Departamento de Defesa dos EUA, o sistema foi montado para fins militares, contudo, nos anos oitenta, o Governo Norte-Americano decidiu tornar o sistema disponível para aplicações civis, sendo hoje utilizado para os mais diversos fins.

Os satélites que compõem o GPS encontram-se a uma altitude de 20.200 km, em órbita com inclinação de 55 graus. Esses satélites foram dispostos em seis órbitas planas, com quatro satélites operando em cada plano (Figura 2.1). Pesando cerca de 900 kg e com 5,3 metros de extensão, incluindo os painéis solares, cada satélite possui vida útil de aproximadamente 7,5 anos. A constelação de 24 satélites foi concluída em nove de março de 1994. Atualmente, em decorrência do fato de que a vida útil dos satélites tem sido

maior do que o previsto no programa de substituições, e considerando o último lançamento do GPS IIR-21M, em 17 de agosto de 2009, o número de satélites em operação alcança os trinta e dois.

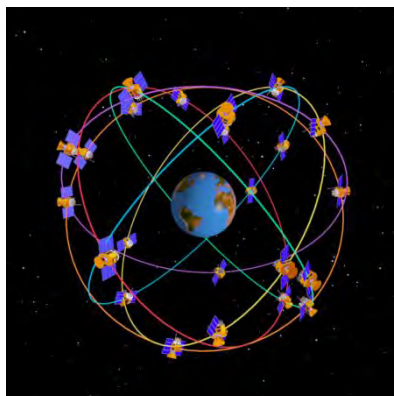


Figura 2.1 – Constelação de Satélites GPS a 20.200km de altitude, em seis órbitas planas com inclinação de 55°.

Os receptores GPS utilizam a triangulação dos sinais de satélites para determinar sua localização. Os satélites dispõem de dois tipos de sinais com acurácias diferentes, um sinal bruto e disponível para fins civis, conhecido como “C/A” (*Coarse-acquisition code*), com uma precisão de aproximadamente 10 metros. Há, ainda, outro sinal (P) de alta precisão, criptografado, para fins militares. A utilização de dados GPS, em conjunto com fotografias aéreas, permite a localização da latitude e longitude de qualquer ponto do globo com uma precisão de aproximadamente 30 centímetros (McDonald et al.,2000). Os sinais de navegação GPS operam em duas bandas-L, 1575,42 MHz(L1) e 1227,60MHz(L2), nos comprimentos de onda de (~19cm) e (~24,4cm) respectivamente, e cada satélite está equipado com relógios atômicos de rubídio ou césio de alta precisão.

O GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), gerenciado pelo Governo da Federação Russa e com operação sob o comando do Ministério da Defesa da Federação Russa, surgiu em contrapartida ao GPS Norte-Americano e ambos os sistemas compartilham os mesmos princípios da transmissão de dados e

métodos de posicionamento. O sistema foi oficialmente declarado operacional em 24 de setembro de 1993. O segmento espacial operacional do GLONASS consiste de 21 satélites em três planos orbitais. Os três planos orbitais são separados de 120 graus. Cada satélite opera em órbitas circulares a 19.100 km, com um ângulo de inclinação de 64,8 graus, completando uma órbita em aproximadamente 11 horas e 15 minutos. A Rússia tem trabalhado na operacionalização do GLONASS. Em 14 de dezembro de 2009 foram lançados três modernizados satélites GLONASS-M, dando segmento ao plano de completa restauração do sistema (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

GALILEO, sistema de navegação por satélite Europeu em desenvolvimento, caracteriza-se como um sistema independente sob o controle civil e interoperável com o GPS e o GLONASS. A fim de alcançar a total operacionalidade do projeto, o sistema necessita de uma constelação de 30 satélites e uma rede de estações terrestres associadas espalhadas ao redor do globo. A Agência Espacial Europeia (ESA) está responsável pelo completo desenvolvimento do sistema GALILEO até 2013. Como proposto, sob um acordo realizado em 2004 com os EUA, o sinal aberto do GALILEO, operando próximo a mesma frequência da transmissão L1 do GPS (1575.42MHz), terá uma estrutura de sinal semelhante ao novo sinal do GPS civil L1C, a fim de baixar o custo da fabricação dos equipamentos e permitir que eles processem sinais de ambos os sistemas GNSS. O primeiro lançamento do programa Galileu foi realizado em dezembro de 2005. O lançamento do satélite GIOVE-A deu início ao programa. Em abril de 2008 o segundo satélite, GIOVE-B, foi lançado na estação da Agência Espacial Europeia, que planeja o lançamento de mais quatro satélites até 2012.

A China também possui um sistema de navegação por satélite denominado Beidou-1, com até quatro satélites. Esse sistema é experimental, com limitações de cobertura e aplicação. Contudo, a China tem desenvolvido um GNSS constituído de 35 satélites. Esse novo sistema é conhecido como Compass ou Beidou-2 (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Em 14 de abril de 2007 a China lançou o satélite COMPASS M-1. Este satélite representa o primeiro, de um novo sistema de navegação global por satélite (GNSS), que planeja operar com um total de 35 satélites. Diferentemente dos satélites de navegação chineses anteriores, COMPASS M-1 transmite em banda L, usando uma estrutura de sinal similar aos outros sistemas GNSS e compartilhando frequências próximas aos conhecidos GPS, GALILEO e GLONASS. Desta forma, a adição de outro GNSS, particularmente um que irá transmitir na mesma banda de frequência do GPS e GALILEO, empolga a comunidade GNSS. Um sistema assim tem um grande potencial para introduzir vastos benefícios aos usuários do GNSS, como, por exemplo, uma rica rede de dados globalmente distribuídos.

2.2– Rádio ocultação GNSS

A técnica de rádio ocultação teve início a partir de meados dos anos sessenta, sendo utilizada progressivamente, com grande sucesso, nas missões planetárias para medir perfis verticais de densidade e temperatura das atmosferas de Vênus, Marte e outros planetas. Com o advento do sistema de navegação por satélite, tais como o GPS, que utilizam transmissores em órbita média, juntamente com receptores instalados em satélites LEO, tornou-se possível a obtenção de perfis atmosféricos com a precisão necessária para aplicação na meteorologia operacional e na pesquisa climática.

Na obtenção de perfis atmosféricos, a técnica utilizada é baseada na variação do índice de refração observado nos sinais de rádio transmitidos do satélite GPS, por exemplo, para o satélite LEO, que perfilam a atmosfera enquanto o satélite se movimenta ao redor do planeta no instante de ocultação.

A aplicação da técnica de rádio ocultação com intuito de obter informações atmosféricas está fortemente relacionada ao desenvolvimento da constelação de satélites com receptor GNSS. As medidas de rádio ocultação GNSS são capazes de representar o estado da atmosfera de uma maneira quase instantânea. Com 24 satélites GPS, um único receptor GPS instalado em um

satélite LEO irá observar aproximadamente 500 ocultações por dia, distribuídas quase que uniformemente ao redor do globo, e com todas essas ocultações provendo dados atmosféricos úteis. A Figura 2.2 ilustra uma distribuição de sondagens diárias.

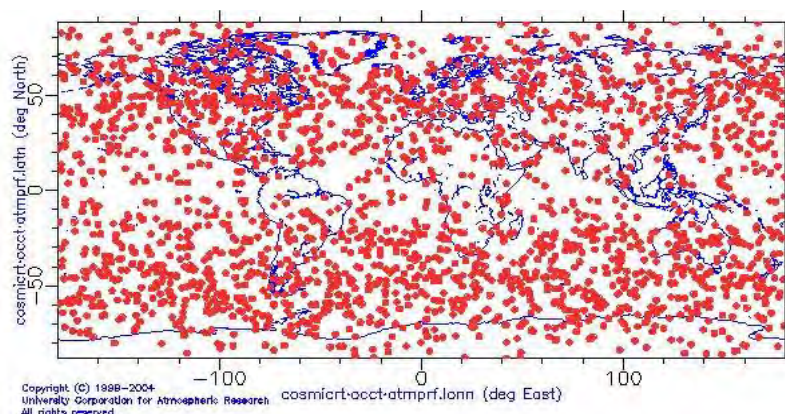


Figura 2.2 – Distribuição de 2111 sondagens diárias realizadas em seis de maio de 2007 com o COSMIC que opera com seis satélites LEO.

A distribuição da cobertura horizontal depende principalmente da inclinação e do período da órbita do satélite LEO. A cobertura é ampliada através da adição de novos receptores em órbita. Considerando apenas a implementação dos receptores GPS COSMIC, o alvo é viabilizar aproximadamente 4000 ocultações diárias, fornecendo em média um perfil a cada 360 quilômetros quadrados por dia.

Um único evento de ocultação dura de 1 a 3 minutos e é capaz de fornecer cerca de 4000 medidas por perfil, que tipicamente começa em 100 km e se estende com dados úteis até aproximadamente um quilômetro de altura.

A ocultação GPS ocorre quando a transmissão do satélite GPS é recebida pelo satélite LEO em modo ascendente ou descendente ao redor da Terra (Fig.2.3). As propriedades atmosféricas são deduzidas com base em medidas precisas no atraso de fase e amplitude do sinal, ao atravessar a ionosfera e a atmosfera neutra (Fig.2.4).

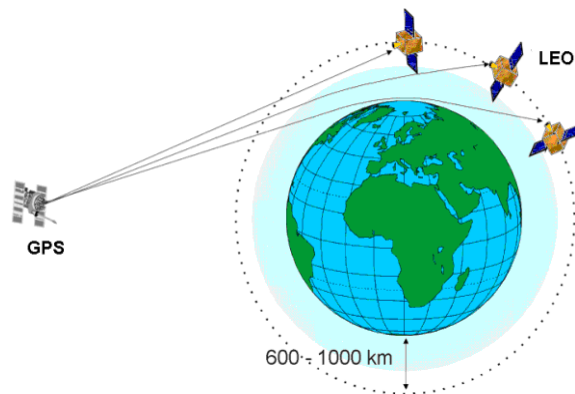


Figura 2.3 – Processo de ocultação e movimento relativo entre os satélites GPS e LEO



Figura 2.4 – Dedução de propriedades atmosféricas baseada em medidas precisas do atraso de fase e amplitude do sinal, sob a influência da ionosfera e atmosfera neutra.

O movimento relativo entre os satélites GPS e LEO promovem um escaneamento vertical da atmosfera. Considerando uma geometria óptica e uma simetria esférica, um feixe atravessando a atmosfera é refratado e sofre atraso devido ao gradiente vertical de densidade do ar. À medida que o satélite se desloca, as ondas de rádio fatiam a atmosfera em sucessivas camadas (Fig.2.5).

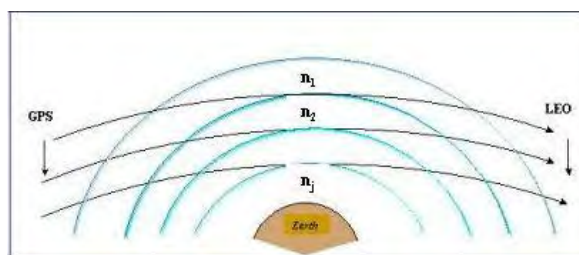


Figura 2.5 – Perfil vertical de refratividade obtido durante o processo de ocultação.

Através da variação de fase do sinal, e do conhecimento preciso das velocidades e posições dos satélites envolvidos, obtêm-se o ângulo de curvatura (α), (Fig.2.6). A posição e as velocidades dos satélites em questão são determinadas com o auxílio das observações dos demais visíveis sobre o LEO. O processo de obtenção do ângulo α em função do parâmetro de impacto (a) é descrito por Vorob'ev e Krasil'Nikova(1994), Kursinsk et al.(2000), e tem como base a geometria da ocultação em uma atmosfera esfericamente simétrica. A obtenção de α (a) e os conceitos envolvidos, tais como, Regra de Bouguer e caminho óptico são abordados na seção 2.2.1 deste capítulo.

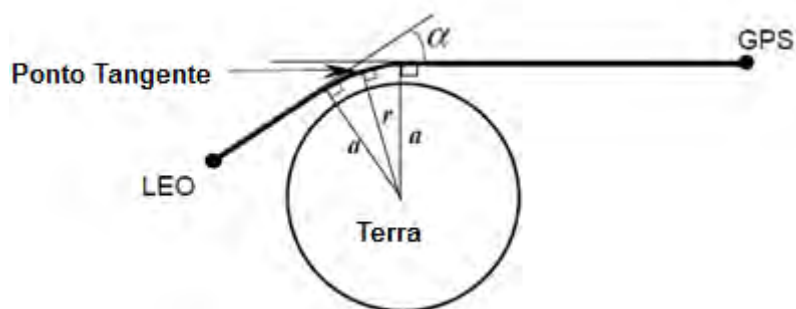


Figura 2.6 – Geometria de uma ocultação instantânea com o GPS e o satélite LEO. O ângulo de curvatura(α) e o parâmetro de impacto(a) são determinados por meio da alteração Doppler na frequência, da posição e medidas de velocidades dos satélites.

Fonte: Kuo et al.(2000)

Durante um evento de radio ocultação GPS, a variação de fase do sinal é essencialmente devido a três fatores: erros induzidos pelo relógio do satélite, deslocamento Doppler (mudança de fase do sinal no decorrer do tempo durante a ocultação), em decorrência do movimento relativo entre o

transmissor e o receptor, e devido ao atraso adicional de propagação causado pela redução da velocidade da luz no meio atmosférico. Os erros de relógio são corrigidos por meio da técnica de duplas diferenças (Alber et al., 2000). O deslocamento Doppler no vácuo pode ser calculado através do conhecimento das posições e velocidades dos satélites GPS e LEO. De forma que, a contribuição atmosférica, ou seja, a variação Doppler em excesso no sinal recebido é obtida subtraindo-se o erro do relógio e o erro esperado no vácuo, do erro total observado.

Assim, a variação Doppler em excesso é descrita por meio de três quantidades geométricas nomeadas por: ângulo de curvatura(α), parâmetro de impacto(a) e pelo ponto tangente(r_t), conforme visualizado na Figura 2.6. À medida que a geometria do transmissor e do receptor muda, estando o sinal no modo ascendente ou descendente na atmosfera, a sequência de perturbações na frequência pode ser relacionada à sequência de pares ($a, \alpha(a)$) ligadas ao perfil do índice de refração(n) pela equação (KURSINSKI et al., 1997):

$$\alpha(a) = 2a \int_{r_t} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (2.1)$$

Onde r é a distância do centro de curvatura e a integral é sobre a porção da atmosfera acima do raio no ponto tangente(r_t). A dependência do ângulo de curvatura (α) e do parâmetro de impacto (a) em relação ao tempo, durante uma ocultação, como visto anteriormente, é derivada a partir de medidas acuradas da frequência referentes à refração do sinal. A contribuição atmosférica na variação do sinal é combinada com a posição e as velocidades dos satélites envolvidos para estimar o ângulo de curvatura e o parâmetro de impacto. De posse desses dados, por meio de um processo denominado Inversa de Abel, é possível obter a refração $n(r_t)$ em termos de α e a (Fjeldbo et al., 1971).

$$n(r_t) = \exp \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{a_1} \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right\} \quad (2.2)$$

Onde $a_1 = n \cdot r_t$ é o parâmetro de impacto para um feixe cujo raio tangente é r . Assim, dado $\alpha(a)$, a Equação(2.2) acima pode ser avaliada numericamente.

2.2.1 – Obtenção de $\alpha(a)$ Através de Medidas de Variação Doppler

Antes da explanação a respeito da obtenção de $\alpha(a)$, os tópicos: Raio Óptico e Regra de Bouguer, utilizados na abordagem, são descritos abaixo:

▪ **Raio Óptico**

A obtenção de dados atmosféricos por rádio ocultação é baseada no conceito de raio óptico, onde a luz é descrita como uma propagação ao longo de linhas chamadas caminho óptico. Ondas de luz se propagam em uma direção ortogonal a frentes de ondas geométricas definidas como a superfície na qual o sinal de fase é constante (Kursinsk et al.,2000). Linhas representando essa trajetória são chamadas caminho óptico. A partir dessa definição, a equação diferencial do caminho óptico pode ser derivada (Born; Wolf, 1980) como:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \text{grad } n, \quad (2.3)$$

onde r designa o vetor posição ao longo do caminho óptico, grad é o gradiente e ds é um incremento no comprimento ao longo do caminho óptico, de forma que:

$$dr = s \, ds, \quad (2.4)$$

Onde s é o vetor unitário na direção do caminho óptico.

▪ **Regra de Bouguer**

Considerando uma mudança na quantidade, $r \times ns$, ao longo do caminho óptico dada por:

$$\frac{d}{ds} (r \times ns) = \frac{dr}{ds} \times ns + r \times \frac{d}{ds} (ns) \quad (2.5)$$

Utilizando a eq.(2.4), o primeiro termo da direita é zero e de (2.3) vem que a eq.(2.5) se transforma em:

$$\frac{d}{ds}(\mathbf{r} \times \mathbf{n}s) = \mathbf{r} \times \mathbf{grad} \, n \quad (2.6)$$

A Equação (2.6) mostra que apenas a porção não radial do gradiente do índice de refração contribui para a mudança em $\mathbf{r} \times \mathbf{n}s$. De forma que, a magnitude de $\mathbf{r} \times \mathbf{n}s$, dada por

$$r n \sin \phi \equiv a \quad (2.7)$$

é constante se $n = n(r)$. Sendo ϕ o ângulo entre o caminho óptico e a direção radial. A constância de a na eq.(2.7), em uma atmosfera simetricamente esférica, é conhecida como Regra de Bouguer e representa a Lei de Snell em um meio esfericamente simétrico (Kursinsk et al.,2000).A fim de avaliar a qualidade da lei de Bouguer como aproximação para a atmosfera terrestre, tem-se a seguinte consideração: Os maiores valores de n , e consequentemente as maiores variações horizontais em n , ocorrem próximo à superfície, onde o caminho óptico atravessa regiões muito secas e muito úmidas, como no caso do sinal cruzando uma linha costeira. Em uma condição extrema, o índice de refração em áreas úmidas pode chegar a 1.0004, enquanto que em regiões secas, esse valor se aproxima de 1.0003, causando uma variação horizontal em n ao longo do caminho óptico de 0.01%. Esse percentual altera o valor de a em aproximadamente 0.6km, um valor muito pequeno, que faz da regra de Bouguer uma boa aproximação para a atmosfera terrestre e simplifica as observações de ocultação.

- **Obtenção de $\alpha(a)$**

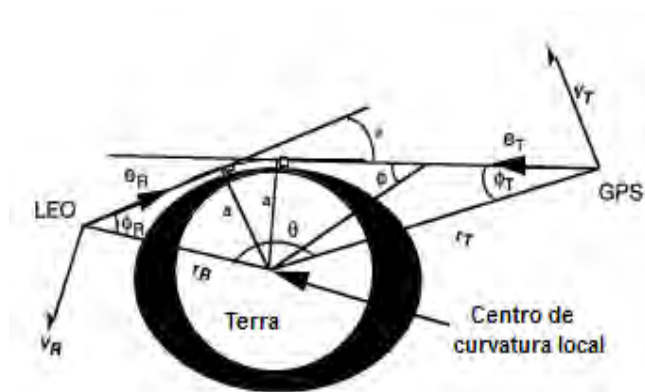


Figura 2.7 – Representação esquemática da geometria de uma rádio ocultação GPS.
Fonte: Kursinski et al.(2000).

Conforme mencionado anteriormente, o efeito da curvatura atmosférica sobre o sinal GPS recebido no receptor do satélite LEO pode ser mensurado por meio da variação Doppler adicional relativa àquela esperada para o sinal que seria recebido em linha reta, sem a curvatura causada sob a influência da atmosfera. Considerando a condição de simetria esférica local, a variação Doppler pode ser combinada com o conhecimento prévio da posição do satélite e vetor velocidade para obtenção do ângulo de curvatura em função do parâmetro de impacto $\alpha(a)$. Usando a geometria e a notação da Figura 2.7, a variação Doppler (f_d) na frequência transmitida (f_T), medida no receptor, produzida pela projeção da velocidade do satélite sobre o sinal, é dada por (Kursinsk et al., 2000):

$$f_d = \frac{f_T}{c} (V_T \cdot \vec{e}_T + V_R \cdot \vec{e}_R) \quad (2.8)$$

$$f_d = -\frac{f_T}{c} (V_T^r \cos \phi_T + V_T^\theta \sin \phi_T + V_R^r \cos \phi_R - V_R^\theta \sin \phi_R) \quad (2.9)$$

Onde V_R e V_T são as velocidades do receptor e transmissor, $\vec{e}_T$ e $\vec{e}_R$ são versores representando as direções do feixe no receptor e transmissor, e c é a velocidade da luz. Os índices r e θ sobrescritos indicam vetores velocidade radial e tangencial respectivamente, ϕ_T e ϕ_R são os ângulos entre o feixe e o vetor posição do satélite junto ao transmissor e receptor (Fig. 2.7).

À medida que r aumenta, $n \rightarrow$ unidade, assim sabemos que a constante na Equação (2.7) é igual a “ a ”, o parâmetro de impacto definido na Figura 2.7. Adicionalmente, no ponto tangente r_t , $\sin \phi = 1$, de forma que, $a = n \cdot r_t$. Com base na lei de Bouguer e na geometria da figura, temos que:

$$r_T \sin \phi_T = r_R \sin \phi_R = a \quad (2.10)$$

$$\alpha = \phi_R + \phi_T + \theta - \pi, \quad (2.11)$$

Onde r_R e r_T são as distâncias do receptor e transmissor do centro de curvatura, e θ o ângulo entre os vetores posição do transmissor e do receptor. Dada a posição precisa do transmissor e do receptor, a frequência do sinal transmitido, e a variação Doppler da ocultação, $\alpha(a)$ pode ser derivado iterativamente das equações 2.9, 2.10 e 2.11 pela eliminação de ϕ_R e ϕ_T . Devido à utilização da lei de Bouguer, essa derivação só é exata sob a condição de simetria esférica. Embora os erros em α e a em função de uma não simetria tenham um pequeno efeito nos perfis de refratividade recuperados em comparação com o uso da inversa de Abel.

2.3- Perfis atmosféricos a partir da RO GNSS

2.3.1- Refratividade(N)

O índice de refração(n), em determinado meio é definido como a velocidade da luz no vácuo dividida pela velocidade da luz no meio. Contudo, na atmosfera, o índice de refração é muito próximo da unidade, sendo assim, é conveniente expressá-lo através da refratividade(N), definida como $N = (n-1) \cdot 10^6$. Na atmosfera eletricamente neutra, a refratividade(N) é função da temperatura (T), da pressão do ar seco(P), da pressão do vapor d'água (P_w), e da contribuição ionosférica (n_e), sendo expressa pela equação (KURSINSKI et al.,2000):

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 4.03 \cdot 10^7 \frac{n_e}{f^2} \quad (2.12)$$

Onde T é a temperatura em Kelvin, as pressões P e P_w são dadas em hPa, a densidade de elétrons (n_e) é expressa em m^{-3} , e a frequência (f) do sinal GPS em Hz.

A Equação (2.12) apresenta três componentes: o primeiro termo, denominado de componente seca (P,T); o segundo termo, componente úmida (P_w , T); e o terceiro termo, componente ionosférica (função da frequência e da densidade de elétrons).

O domínio dos termos descritos na eq.(2.12) sobre a refratividade (N) ao longo da atmosfera pode ser melhor visualizado na Figura 2.8, a seguir.

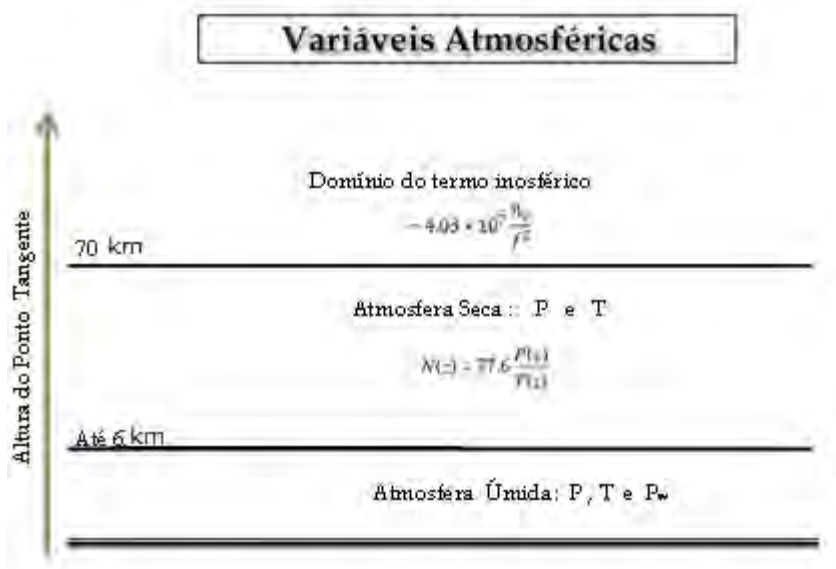


Figura 2.8 – Predomínio dos termos da equação (2.3) em função da altura do ponto tangente durante um evento de Rádio Ocultação GNSS.

2.3.2- Componente ionosférica

Acima de aproximadamente 70 km o termo ionosférico é predominante e as demais contribuições podem ser desprezadas. Neste caso a refratividade(N) é proporcional à densidade de elétrons (n_e). Contudo, a fim de se eliminar esse efeito, uma correção ionosférica é aplicada na análise dos valores de refratividade nos baixos níveis. Utilizando-se as duas frequências GPS disponíveis (L1 e L2), a alteração na refratividade (N), em função das diferentes frequências, é atribuída a componente ionosférica e pode ser subtraída (Hajj, G. A. et al. 2002).

2.3.3- Componente seca

Para perfis atmosféricos de RO GNSS nos níveis onde a contribuição do vapor d'água pode ser desprezada ($T < 240K$) a expressão para N se reduz a:

$$N(z) = 77.6 \frac{P(z)}{T(z)} \quad (2.13)$$

Considerando o equilíbrio hidrostático como uma suposição válida:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -g(z)\rho(z) \quad (2.14)$$

E, a equação de estado:

$$\rho(z) = \frac{N(z) * m}{77.6 * R} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} m = \text{massa molecular do ar seco} \\ R = \text{constante dos gases} \\ \rho = \text{densidade} \end{cases} \quad (2.15)$$

Dada uma condição de contorno, como por exemplo: P=0 em 150 km

Obtêm-se:

- Perfis de Pressão.
- Perfis de Temperatura (através de P e ρ).
- Perfis de Altura Geopotencial (valores de pressão e altura geométrica).

2.3.4- Componente úmida

Na ausência de vapor d'água na atmosfera, os perfis de P e T retornados pela Equação (2.13) correspondem aos valores atmosféricos reais. Contudo, na presença de umidade essa mesma equação irá fornecer valores de temperatura mais baixos do que o real. Visto que o vapor d'água da atmosfera real está sendo computado como moléculas de ar seco. Dentro da comunidade RO GPS esses perfis são conhecidos como “*Dry Temperature*”.

Para se obter os verdadeiros valores de pressão e temperatura, dentro da camada úmida, é necessário considerar a refratividade(N) representada pela equação:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (2.16)$$

Quando a umidade exerce uma importante contribuição em N, na média e baixa troposfera, o sistema fica indeterminado (2 equações e 3 variáveis: P, T e P_w). Tal fato torna necessário o conhecimento prévio e independente de uma das variáveis, a fim de se determinar as outras. Normalmente se utiliza valores de temperatura de uma fonte externa, como modelos de previsão, para se obter a pressão e a pressão de vapor iterativamente. Alternativamente, podem-se utilizar informações de pressão, temperatura e umidade específica do modelo com seus erros característicos (matriz de covariância de erros) e encontrar a melhor estimativa para P, T e q (assimilação variacional). Esse processo é aplicado nos dados fornecidos pelo COSMIC e GRAS SAF, sistema de tratamento de dados RO GNSS, na entrega dos perfis obtidos com satélites LEO.

2.4 Assimilação de dados de rádio ocultação GNSS

A pouca quantidade de dados sobre os oceanos e em outras regiões remotas exerce um considerável e negativo impacto sobre as condições iniciais dos modelos de previsão numérica de tempo, impondo limites às habilidades de previsão (Rabier et al. 1996). A diferença entre os desvios padrões da altura geopotencial em 500mb, das análises globais de cinco invernos, obtidas pelos modelos do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e , do ECMWF (*European Centre for Medium Range Forecast*), foi calculada por Nutter et al.(1998), apresentando maiores diferenças primeiramente sobre o Oceano Pacífico, Atlântico e regiões polares do hemisfério norte, justamente onde as observações de radiossonda são mais esparsas.

Outra evidência experimental de que a RO GNSS poderia ter um impacto positivo nos modelos de previsão do tempo foi obtida através de comparações estatísticas entre perfis de refratividade RO GPS e análises de perfis de temperatura de um modelo de previsão numérica global (Rocken, et al., 1997). Ficou evidente a maior similaridade sobre regiões com maior densidade de

dados (EUA, Europa). Considerando-se que possíveis erros nos dados de refratividade obtidos através da RO-GPS são homogêneos sobre todas as regiões, a diferença encontrada, desta forma, é atribuída à qualidade das análises do modelo de previsão, que apresentam maiores erros sobre as regiões onde os dados são mais esparsos. Analogamente, Leroy (1997) encontrou maiores diferenças, entre as análises de altura geopotencial operacionais do ECMWF e as computadas com dados de RO GPS, sobre regiões onde os dados eram mais esparsos. Esses estudos sugerem que a assimilação de dados RO-GNSS pode ter um significativo impacto positivo nas previsões numéricas de tempo globais, ou ainda, simplesmente em regiões que apresentam baixa densidade de dados de radiossonda, como no caso da América do Sul.

Através de uma assimilação contínua dos dados de RO-GPS fornecidos pelo COSMIC, conforme mostrado por Kuo et al.(1997) e Leroy(1997) , obteve-se uma transferência de dados direcionada aos campos de vento. Com essa melhora na descrição dos campos de temperatura, pressão e vento, importantes sistemas de circulação atmosférica de escala sinótica (que governam os ciclones de superfícies, frentes e fenômenos associados) serão melhor descritos nas condições iniciais dos modelos sobre os oceanos e em áreas com escassez de dados.

2.5 Estratégias de assimilação

Antes de começar a assimilar os dados RO GNSS, é necessário determinar qual variável assimilar. Em resumo, a obtenção das estimativas de temperatura e ou vapor d'água através da RO GNSS são obtidas por meio dos seguintes passos:

- a) Obtenção de medidas das fases e amplitudes de dois sinais de rádio GNSS (L1 e L2).
- b) Cálculo dos ângulos de curvatura para L1 e L2 respectivamente, com base nas precisas posições e velocidades do GNSS e do satélite LEO.

- c) Remoção do efeito ionosférico e reconstrução do ângulo de curvatura (α) da atmosfera neutra em função do parâmetro de impacto (a).
- d) Otimização do ângulo de curvatura observado através do uso da climatologia em altas altitudes.
- e) Reconstrução do perfil vertical de refratividade utilizando a inversa de Abel.
- f) Obtenção dos perfis verticais de temperatura ou vapor d'água por meio dos perfis de refratividade, e adicionalmente de fontes externas de dados.

Diferentes considerações são necessárias, tratando-se da assimilação nos respectivos estágios de obtenção dos dados RO GNSS:

- 1- Dados brutos das medidas de fase.
- 2- Ângulos de curvatura (α_1, α_2) referentes às frequências L1 e L2.
- 3- Ângulo de curvatura da atmosfera neutra (α), pós-correção ionosférica.
- 4- Refratividade (N).
- 5- Temperatura (T) ou Vapor d'água (P_w).

Considerando os diferentes estágios de obtenção dos dados, sabe-se que dados menos processados produzem melhores resultados, contudo, dada a crescente complexidade nesse sentido, as opções 1 e 2 não são práticas. Os custos computacionais e a necessidade de desenvolvimento de complicados operadores observacionais tornam essas opções inviáveis (Cucurul, 2009).

A assimilação do ângulo de curvatura (α) é um opção superior à assimilação de α_1 e α_2 para cada frequência, pois apresenta a vantagem de ter um operador observacional menos complicado. A refratividade (N) e valores de T e P_w também são possíveis de serem assimilados. No caso da assimilação dos valores de temperatura e vapor d'água provenientes das observações de rádio ocultação, a grande vantagem está no fato de que a forma dos dados é a mesma daquela encontrada nas variáveis do modelo, e podem, desta forma, serem prontamente utilizados na geração de uma extensa variedade de

análises objetivas em diferentes sistemas de assimilação. Por outro lado, existem também desvantagens na utilização dos dados de T e Pw. Uma delas está no erro associado ao se assumir que o valor da refratividade N_{gps} é o mesmo da refratividade N_{local} (Kuo, 2000). Outra desvantagem está na utilização de uma fonte de dados externa para se obter os perfis de vapor d'água. A precisão desse perfil é afetada pela precisão dos dados externos utilizados. A utilização de métodos variacionais é utilizada para amenizar esses fatos.

2.5.1 Exemplo de procedimentos adotados na assimilação da refratividade

Os procedimentos adotados na assimilação da refratividade(N), dada pela Equação (2.16), podem ser resumidamente descritos pelos seguintes passos:

- a) A altura geométrica da observação é convertida em altura geopotencial.
- b) As observações são localizadas entre dois níveis do modelo.
- c) As variáveis de pressão, temperatura (virtual) e umidade específica são interpoladas para o local das observações.
- d) A refratividade do modelo é então computada dos valores interpolados.
- e) Otimização ou processo de assimilação com a geração de incrementos de geopotencial, umidade específica ao redor do nível de observação e temperatura (virtual) ao redor do nível de observação.
- f) Controle de Qualidade dos dados baseados em estatística mensal de comparação entre as observações e as simulações do modelo para a refratividade N.
- g) Ajuste dos erros de N de forma a torná-los representativos (Cucurull, 2009).

2.5.2 Assimilação variacional de dados

A maioria dos atuais sistemas de assimilação de dados são baseados em métodos variacionais (Var). Uma visão mais detalhada dessa teoria é fornecida

em Lorenc (1996). A técnica variacional fornece uma estrutura para a assimilação de uma variedade de tipos de observações meteorológicas. Através da utilização de um operador (*“forward model”* ou *“forward operator”*), as informações no espaço do modelo podem ser mapeadas no espaço das observações, e vice-versa, de uma maneira consistente (Eyre, 1997). A aproximação variacional para a assimilação de dados é usualmente formulada como um problema de minimização da seguinte função custo:

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} (y_o - H[x])^T (O + F)^{-1} (y_o - H[x]) \quad (2.17)$$

onde x indica a análise (o estado ótimo da atmosfera levando em consideração as observações e as previsões do modelo) e y_o o vetor das observações. A variável x_b indica o background, ou seja, o estado da atmosfera fornecido por uma previsão anterior de curto prazo. $H[x]$ denota um operador observação, possivelmente não linear, que traz as medidas x do modelo para o campo y das observações. As matrizes B , O e F são matrizes de covariância de erro, descrevendo as incertezas assumidas nos dados do background, das observações, e no operador observação respectivamente. Por meio da minimização de J com relação ao vetor estado x , obtêm-se a solução que minimiza o desvio total em relação aos dados do background e os dados das observações. Se todos os erros estão normalmente distribuídos e tanto o background como as observações estão sem viés, essa solução é também a solução probabilidade máxima (Lorenc, 1986).

A expressão para $J(x)$ é geral, sem levar em conta a dimensão de x . O método de análise, contudo, pode ser aplicado para retornar perfis verticais em uma dimensão (1D-Var), uma superfície (2D-Var) ou para analisar o estado de um modelo regional ou global em três dimensões (3D-Var), ou ainda três dimensões espaciais e uma temporal (4D-Var). Uma ilustração esquemática de um sistema 3D-Var é dada na Figura 2.9.

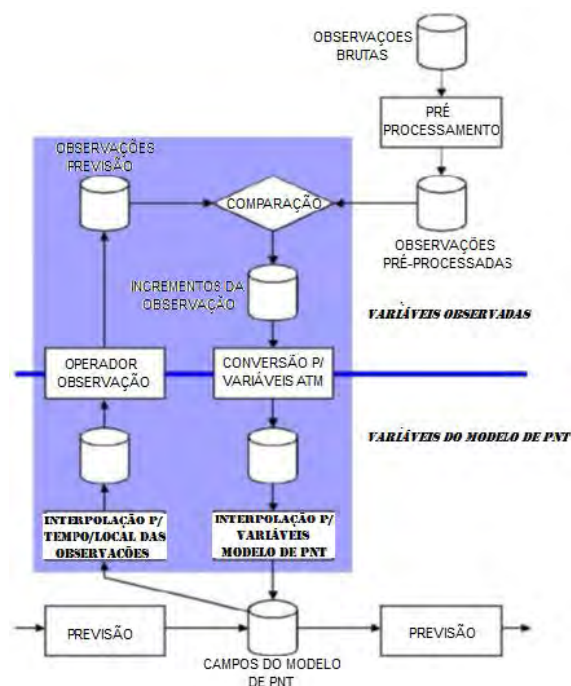


Figura 2.9 – Visualização esquemática de um sistema de assimilação de dados 3DVar.
Fonte: Eyre, (1997).

A cada tempo de análise, os campos da PNT são interpolados para o local das observações, e o operador correspondente é utilizado para calcular as “Observações dadas pelo modelo”, que são comparadas com as observações reais. Incrementos para os campos de PNT são então calculados, de forma que a diferença entre a previsão e as observações atuais, bem como entre análise e background são reduzidas. Uma vez que o mínimo da função custo é alcançado, a próxima previsão é produzida com base nos campos de PNT atualizados.

2.5.3 Utilização do método variacional 1D-VAR na obtenção dos perfis de temperatura, pressão e umidade específica.

Além da utilização do método variacional como ferramenta de controle de qualidade, “1D-Var retrievals” é uma alternativa aos clássicos perfis de temperatura na atmosfera seca (“dry temperature”) predominantemente utilizados pela comunidade RO GNSS. 1D-Var ou “statistically optimal

retrievals” (Rodgers, 1976, 1990, 2000; Palmer et al., 2000) fornece uma solução ao conhecido problema de ambiguidade de temperatura e umidade nas medidas de rádio ocultação da baixa troposfera. Considerando que os erros característicos tanto das observações como do background são realísticos, a estrutura variacional (Var) também fornece uma caracterização completa dos erros para os perfis obtidos.

Quando a temperatura e o vapor d’água são obtidos simultaneamente dos dados de ocultação, conforme descrito no item 2.3, Equação (2.12), tem-se a indesejada ambiguidade, ou seja, o sistema fica indeterminado. No procedimento clássico, obtém-se a “temperatura seca” da atmosfera por meio da omissão do efeito do vapor d’água na chamada “atmosfera seca”, em altos níveis e altas latitudes. Ou ainda, obtém-se o perfil de umidade utilizando-se os campos de temperatura provenientes de um modelo atmosférico, contudo tais procedimentos podem levar a erros significativos. Essa dificuldade é ,então, contornada, com a utilização da técnica 1DVar, que considera os erros dos campos do “background” e das quantidades observacionais, melhorando a qualidade dos perfis obtidos. Adicionalmente, com o emprego da técnica 1DVar, os perfis de temperatura, pressão e umidade específica podem ser obtidos diretamente dos perfis de refratividade ou ângulo de curvatura. A prática tem mostrado que, os resultados obtidos com a técnica 1DVar são bem melhores que técnicas de perfilamento clássicos. Uma vez que, os perfis de P, T e q, retornados por meio da técnica de ajuste 1DVar de refratividade ou ângulo de curvatura, encontram-se disponíveis no CDAAC e GRAS SAF, estes podem ser diretamente utilizados como dado observacional dentro do sistema de assimilação dos modelos numéricos, empregados nos centros de previsão do tempo. O CDAAC, atualmente, disponibiliza esses dados em tempo real e o GRAS tem desenvolvido o mesmo produto para o satélite MetOp. Outra alternativa é a assimilação direta dos dados de refratividade, dentro do sistema de assimilação empregado no modelo numérico. O GRAS disponibiliza um software denominado ROPP que apresenta rotinas com algoritmos que podem ser adaptados aos sistemas de assimilação dos modelos de previsão. Um

operador “*Forward Model*” , componente do ROPP, computa perfis de refratividade das variáveis de estado, P, T e q, do background, permitindo a comparação com as observações de refratividade da rádio ocultação.

A condição básica da técnica de assimilação variacional baseia-se em assumir que, o valor de probabilidade máxima do vetor estado da atmosfera, x , satisfaz a condição de mínimo da função custo $J(x)$, dada pela equação abaixo, cujos termos foram apresentados na seção 2.5.2.

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} (y_0 - H[x])^T (O + F)^{-1} (y_0 - H[x]) = \text{mín} \quad (2.18)$$

Encontrar o mínimo da função custo $J(x)$ é um problema multidimensional não linear, que usualmente pode ser solucionado por um algoritmo numérico iterativo. HONG Zhen-jie et al.,(2001) descreve a utilização do algoritmo Levenberg-Marquardt, que requer a solução iterativa da equação:

$$(J''(x_n) + k \cdot I) \cdot (x_{n+1} - x_n) = -J'(x_n) \rightarrow 0. \quad (2.19)$$

onde o sufixo n representa o índice de interação, k é uma variável escalar positiva, I é a matriz identidade, $J'(x_n)$ e $J''(x_n)$ são a primeira e a segunda derivada do valor da função custo com relação à x_n :

$$J'(x_n) = -H'[x_n]^T (O + F)^{-1} (y_0 - H[x_n]) + B^{-1} (x_n - x_b) \quad (2.20)$$

$$J''(x_n) = H'[x_n]^T (O + F)^{-1} H'[x_n] + B^{-1}, \quad (2.21)$$

Onde $H'[x_n]$ é a derivada parcial do operador observação com respeito a x_n . Na Equação (2.21) o termo $H''[x_n]$ foi removido por aproximação. Em um exemplo prático o valor inicial de K é tido como 0.001, e o processo iterativo ocorre da seguinte forma:

- Cálculo de $J(x_n)$;
- Solução da eq. Linear (2.19) para obtenção de x_{n+1} ;
- Se $J(x_{n+1}) \geq J(x_n)$, K é multiplicado por 10, e retorna a *b*);
- Se $J(x_{n+1}) < J(x_n)$, K é dividido por 10, e $x_n = x_{n+1}$, retorna para *b*).

A Figura 2.10, a seguir, ilustra um fluxograma do algoritmo de Levenberg Marquardt.

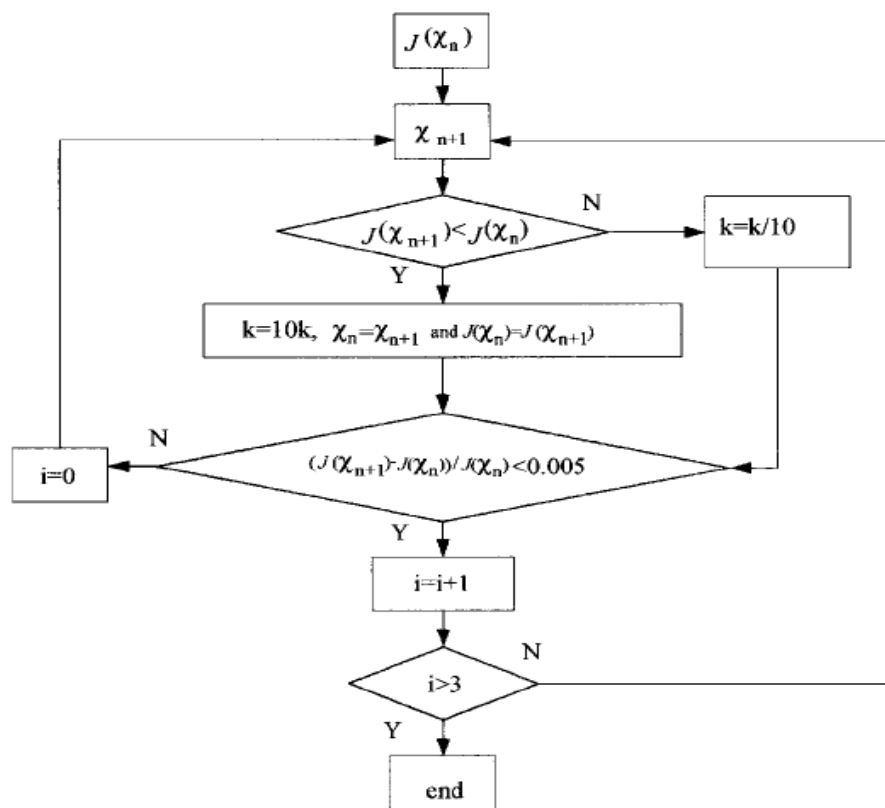


Figura 2.10 – Fluxograma do algoritmo de Levenberg-Marquardt.
Fonte: HONG Zhen-jie et al.,(2001).

No emprego da técnica de assimilação 1DVAR de refratividade, para obtenção dos perfis observacionais de temperatura, umidade e pressão, o vetor observação y_0 é dado pelo perfil vertical em uma dimensão da refratividade atmosférica em função do parâmetro de impacto (*a*):

$$y_0 = N(a) \quad (2.22)$$

E o vetor estado do background, x_b , é obtido dos campos de T, P e q do modelo numérico disponível (ECMWF, Met Office, NCEP, CPTEC e outros) nos níveis de pressão padrão. Os valores das posições e tempo correspondentes aos eventos de ocultação são obtidos por meio de interpolação.

O operador observação, $H[x]$, mapeia o vetor estado, $x(T, P \text{ e } q)$, dentro do perfil atmosférico, o qual é função da altitude. De forma que,

$$H[x] = N(\varphi(x)) \quad (2.23)$$

Onde φ é o operador interpolação, que mapeia o vetor estado, (x) , nos níveis de pressão padrão, dentro dos níveis de ocultação em função da altitude. N é o operador que computa a refratividade atmosférica, dado pela equação:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (2.24)$$

A exemplo do procedimento adotado com o modelo do ECMWF, no computo do operador interpolação, a temperatura virtual (T^v) é requerida em todas as camadas de pressão padrão, e dada por :

$$T_i^v = T_i(1 + 0,608q_i) \quad (2.25)$$

Sendo i o número da camada, e T_i e q_i a temperatura absoluta e a umidade específica da camada, respectivamente. Supondo que a temperatura virtual varia linearmente entre as camadas, a relação entre a altitude potencial na camada i e $i+1$ pode ser deduzida pela equação hidrostática:

$$Z_{i+1} = Z_i + \frac{R_d}{9,80665} \frac{(T_{i+1}^v - T_i^v)}{(\ln T_{i+1}^v - T_i^v)} \ln \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} \right) \quad (2.26)$$

$R_d = 0,287 \text{ J/(gK)}$ a constante dos gases para a atmosfera seca.

Dos perfis do modelo atmosférico, são computados os logaritmos da umidade específica, temperatura e temperatura virtual, e as suas primeiras derivadas com relação à altitude potencial, μ_i , β_i e γ_i . Desta forma, a umidade específica, temperatura e pressão em qualquer ponto $z(Z_i < z < Z_{i+1})$ podem ser obtidas por interpolação:

$$q(z) = q_i \exp\{\mu_i (z - Z_i)\}, \quad (2.27)$$

$$T(z) = T_i + \beta_i (z - Z_i), \quad (2.28)$$

$$p(z) = p_i \left\{ 1 + \frac{\gamma_i}{T_i} (z - Z_i) \right\}^{-9,80665/R_d} \quad (2.29)$$

e a pressão de vapor p_w pode ser calculada pela equação:

$$q = 622 \frac{p_w}{p - 0,37p_w} \quad (2.30)$$

Assim, finalmente a refratividade atmosférica(N) é calculada por meio da Equação (2.24).

Por meio da variação da temperatura virtual com a altitude (γ_i), a altitude potencial em várias camadas de pressão, Z_i , pode ser estimada com a extrapolação do plano horizontal de altitude potencial zero.

Uma descrição mais detalhada das matrizes de covariância do erro do vetor observação, background e operador, é dada por HONG Zhen-jie et al.,(2001). O mesmo autor descreve dois experimentos de obtenção de perfis por RO GPS com a utilização da técnica 1DVar aplicada a refratividade. Esses perfis de umidade específica e temperatura foram comparados com aqueles obtidos por radiossondas, análise do modelo ECMWF e clássicos “dry temperature” (standard). Foi observado que os perfis de rádio ocultação, em relação ao

modelo, revelaram melhor a estrutura da troposfera superior. Já nos baixos níveis, sob a influência de umidade, onde o erro dos dados RO GNSS tende a ser maior, foi observado que as diferenças entre os resultados da assimilação 1DVar e os dados do modelo não são muito significativos. Contudo, em regiões onde as observações convencionais são esparsas, tais como: oceanos, desertos e regiões montanhosas, onde o desempenho da previsão numérica é relativamente baixo, espera-se que as observações RO GNSS venham a melhorar razoavelmente as previsões do modelo atmosférico (HONG Zhen-jie et al., 2001).

2.6 Impacto da assimilação RO-GNSS em outros centros operacionais.

Percebendo os possíveis benefícios da assimilação de dados RO-GNSS e a crescente evolução desses sistemas, grandes centros de previsão numérica de tempo têm desenvolvido técnicas de implementação da assimilação de dados RO-GNSS em seus modelos operacionais. “ *Assimilation of GPS RO Observations into NCEP’s Global Data Assimilation System*”(Cucurull et al., 2006), descreve o desenvolvimento da capacidade de assimilação de dados RO GPS pelo NCEP/EMC (*Environmental Modeling Center*). Visando a futura operacionalização do COSMIC, o NCEP desenvolveu em 2006 a capacidade de assimilar perfis de refratividade e ângulos de curvatura.

Utilizando dados do CHAMP foram realizados testes a fim de se avaliar os potenciais benefícios desses produtos. Os resultados preliminares demonstraram que a assimilação dos dados de RO GPS produziu uma redução significativa no viés de umidade e temperatura em todas as latitudes, com extensão dos benefícios sobre os campos de vento nos trópicos e geopotencial em 500hPa.

Em maio de 2007 perfis de refratividade do COSMIC passaram a ser assimilados operacionalmente no sistema de assimilação de dados global do NCEP.

Tendo como base um experimento (Cucurull et al., 2007) utilizando dados de refratividade fornecidos pelo CDAAC (*COSMIC Data Analysis and Archival*

Center), entre 24 de outubro e 30 de novembro de 2006, os níveis de habilidade de diversos campos foram avaliados para duas situações distintas: a primeira com observações convencionais e de satélite e a segunda adicionando-se os dados de refratividade da RO GPS às observações já existentes. Nesse experimento, foram assimilados aproximadamente 1000 perfis por dia, com cada perfil apresentando em torno de 200 níveis entre a superfície e 40km de altura. As observações acima de 30km foram rejeitadas a fim de se evitar incrementos irreais nos altos níveis do modelo. Também foram respeitadas as janelas de assimilação de ± 3 horas na captação dos dados. Na comparação dos experimentos com a sua própria análise, foi observado que a assimilação dos dados de refratividade COSMIC no modelo do NCEP aumentou o desempenho do modelo, quantificado pela correlação de anomalia (AC). O impacto do COSMIC foi mais significativo nos trópicos, com um ganho de ~ 12 horas no dia 5. Os benefícios da assimilação de dados RO GPS também foram importantes nos extratropicais, com maior impacto no HS, gerando um ganho de ~ 6 horas no sexto dia.

No Hemisfério Sul e Hemisfério Norte, as diferenças entre controle e experimento representaram estatisticamente um nível de 21% e 18%, respectivamente, no quarto dia de previsão. As maiores diferenças nos trópicos e hemisfério sul deveram-se provavelmente a baixa densidade de observações convencionais.

Em termos de viés e erro médio quadrático, a comparação entre a previsão e a própria análise mostraram uma redução no viés do modelo do NCEP para região extratropical quando os dados RO GPS são assimilados no sistema. Houve uma redução de 0.15K e 0.18K no viés da previsão do modelo, no quinto dia, para o HN e HS, respectivamente, em comparação com a previsão sem os dados RO GPS.

Os benefícios da assimilação de dados do COSMIC no modelo do NCEP também se estenderam a outros níveis de pressão e a outras variáveis, tais

como vento e umidade. Para ambos os níveis de pressão, 500 hPa e 1000 hPa, o aumento na habilidade da AC foi mais significativo no HS, onde os benefícios do COSMIC foram percebidos na previsão de curto prazo (2 dias) e aumentaram com as previsões de médio prazo (~12 horas no sexto dia).

Buontempo et al.(2008) destaca o Met Office como o primeiro Centro de Previsão Numérica de Tempo a assimilar dados de RO GNSS operacionalmente. Após a disponibilização dos dados RO GPS do CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Researche and Application*) em fevereiro de 2006 e GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) em maio de 2006, o Met Office, através de um experimento visando avaliar o impacto de tais dados no sistema, tornou operacional a assimilação de dados de refratividade RO GPS em 26 de setembro de 2006.

Apesar do número limitado de observações fornecidas pelo CHAMP e GRACE-A, o positivo impacto sobre a previsão foi percebido nos campos de temperatura da baixa estratosfera e alta troposfera, e também nos campos de altura geopotencial e pressão ao nível médio do mar do Hemisfério Sul. O experimento descrito por Buontempo et al.(2008), visando avaliar o potencial impacto dos dados RO GPS nas previsões, utilizou dados dos meses de janeiro e junho de 2006 com duas rodadas para cada mês, sendo a primeira com as observações convencionais e a segunda adicionando as observações de rádio ocultação. O modelo utilizado apresentava 50 níveis verticais estendendo-se até aproximadamente 65 km, com uma resolução de ~ 40km nas latitudes médias(N320 L50). Os dados de refratividade foram utilizados no sistema de assimilação 4D-VAR. O impacto foi verificado por meio da comparação dos campos de previsão de ambas as rodadas, com e sem os dados RO GPS, com os respectivos campos da análise e também com as observações de radiossonda. Buontempo et al.(2008) descreve que houve uma redução no viés da temperatura (T+24) entre 50 e 500hPa tendo como referência observações de radiossonda. Também houve redução no viés do campo de altura geopotencial de 500 hPa. Um efeito indireto foi observado na

circulação geral, com os campos de temperatura na baixa estratosfera e a razão de precipitação convectiva tendo sido afetadas pela assimilação de dados de RO GPS.

O impacto da assimilação de dados de rádio ocultação GPS no Met Office, descrito por Rennie (2010), apresenta uma comparação entre a assimilação da refratividade e a assimilação do ângulo de curvatura. Os resultados dos experimentos mostraram um impacto positivo para ambas as assimilações, com resultados superiores na maioria dos casos para a assimilação do ângulo de curvatura, sobretudo na região extratropical do Hemisfério Norte (Rennie, 2010).

Em 12 de dezembro de 2006, o ECMWF deu início à assimilação operacional dos dados de RO GNSS provenientes do COSMIC. A assimilação dos perfis de ângulo de curvatura proporcionou uma redução significativa no viés da temperatura e altura geopotencial nos altos níveis, sobretudo no Hemisfério Sul (Healy, 2007).

3 SISTEMA DE ASSIMILAÇÃO/PREVISÃO UTILIZADOS E DADOS DISPONÍVEIS.

Para verificar o impacto da assimilação de dados provenientes de rádio ocultação GNSS no modelo global do CPTEC (GPSAS T213L42), perfis verticais de altura geopotencial e umidade fornecidos pelo COSMIC foram utilizados. A seguir serão descritos detalhes desse modelo e do sistema de assimilação utilizados, bem como o conjunto de dados COSMIC disponível para o desenvolvimento desse trabalho.

3.1 Modelo global do CPTEC

O Modelo Global em operação no CPTEC, com resolução T213L42, tem sua origem no MRF (*Medium Range Forecasting Model*) usado pelo NCEP em 1985. Esse mesmo modelo foi implementado no *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA), que introduziu modificações no decorrer dos anos, gerando diferenças substanciais em relação ao modelo original do NCEP.

Conforme descrito por Cavalcanti et al.(2002), os processos dinâmicos e as parametrizações físicas do modelo CPTEC/COLA são as mesmas aplicadas ao modelo COLA, com esquema de convecção profunda Kuo (Kuo 1974), convecção rasa segundo Tiedtke (1983), esquema Mellor e Yamada aplicado à difusão vertical na camada limite planetária (MELLOR YAMADA 1982), e difusão tipo bi-harmônica para difusão horizontal, necessária ao controle de ruídos de pequena escala. As variáveis de superfície determinadas pelo modelo climático são temperatura da superfície do solo, umidade do solo, albedo da superfície, e espessura da neve, que são introduzidas no início da integração com os valores climatológicos e ajustadas durante a integração. Os dados climatológicos de temperatura da superfície e umidade do solo são dados por Willmott et al.(1985).

O CPTEC iniciou operacionalmente a previsão numérica de tempo global, em novembro de 1994, com a implementação da primeira versão denominada 1.0 CPTEC/COLA, originária da versão 1.7 do modelo do COLA. Sendo que, algumas modificações e adaptações foram realizadas visando às necessidades operacionais do CPTEC. Dentre elas, estão: truncamento romboidal, adotado pelo COLA, generalizado para truncamento triangular, introdução de resoluções horizontal e vertical versáteis, adaptações nos arquivos de entrada e saída e utilização de temperatura da superfície do mar média observada da última semana. Também em 1998, uma nova versão, 2.0 CPTEC/COLA, foi colocada em operação. As principais alterações foram a inclusão de uma modificação no modelo de tratamento da interação atmosfera-biosfera, nova opção de parametrização da convecção profunda e um novo esquema de difusão horizontal, além da implementação de um pós-processamento diferente.

Os Processos Físicos Parametrizados - de acordo com Bonatti (1999), a superfície da Terra é composta de uma variedade de diferentes plantas, solos e formações geográficas, as quais trocam massa, momentum e calor com a atmosfera em graus e modos dos mais variados. Este MCGA inclui uma formulação explícita da vegetação sobre a superfície da Terra e seus intercâmbios com a atmosfera e solo, que é baseada em um modelo biosférico simples (SSIB). A camada limite planetária é parametrizada através de um esquema fechado de ordem 2.0 para a difusão vertical. Os efeitos da mistura de calor, momentum e umidade pela turbulência de pequena escala são representados por essa difusão vertical. A radiação é dividida em aquecimento devido as ondas curtas (radiação solar) e devido as ondas longas (radiação terrestre). A formulação do aquecimento solar no MCGA inclui o aquecimento atmosférico devido a absorção de radiação solar pelo ozônio. Os processos úmidos do MCGA incluem a condensação de grande escala, a convecção profunda e a convecção rasa.

Atualmente, o modelo global do CPTEC é rodado operacionalmente para previsão de tempo com as resoluções T126L28, T213L42 e T299L64, com

previsões para 15 e 7 dias. O T designa truncamento triangular nas ondas zonais 126, 213 e 299 respectivamente, enquanto o L representa o número de níveis na vertical. A resolução T213L42 empregada neste estudo é rodada utilizando o PSAS na geração da análise, as demais fazem uso de análises provenientes do NCEP. A tabela 3.1, abaixo, ilustra as configurações utilizadas no modelo Global do CPTEC.

Tabela 3.1 - Configuração utilizada nas diferentes resoluções dos modelos de PNT do CPTEC.

Itens configurados	Resolução T126L28	Resolução T213L42
<i>Dinâmica Espectral</i>	<i>Euleriano</i>	<i>Euleriano otimizado</i>
<i>Representação em ponto de grade</i>	<i>Não Reduzida</i>	<i>Reduzida</i>
<i>Convecção profunda</i>	<i>Kuo</i>	<i>Kuo</i>
<i>Convecção Rasa</i>	<i>Tiedtke</i>	<i>Grell</i>
<i>Radiação de onda longa</i>	<i>Hashvardhan</i>	<i>Souza</i>
<i>Parametrização de superfície</i>	<i>Ssib</i>	<i>Ssib</i>
<i>Parametrização da camada limite</i>	<i>Mellor e Yamada</i>	<i>Mellor e Yamada</i>

Fonte: Sapucci et al.,(2010).

3.2 O sistema de assimilação de dados PSAS

O Sistema de Análise Estatística em Espaço Físico, PSAS (Physical-space Statistical Analysis System), foi desenvolvido no “*Data Assimilation Office*” (DAO) do “*Goddard Space Flight Center*” (GFSC) da NASA, com o intuito de substituir a componente de análise de interpolação ótima (IO).

Esta técnica de análise de dados consiste em implementar um algoritmo estatístico que combine observações irregularmente espaçadas com previsões em pontos de grade para produzir uma estimativa ótima do estado da atmosfera. O PSAS apresenta as seguintes características (Cohn et al.,1998): resolve as equações de análises globalmente ao invés de localmente, eliminando a aproximação local e a seleção de dados do sistema IO; a formulação do PSAS é realizada diretamente no espaço físico, da mesma

forma que os esquemas de interpolação ótima, mas diferentemente dos esquemas de análise variacional espectral; tem custo computacional pequeno, considerando que a dimensão do espaço da observação ($p \sim 10^5$) é uma ordem de magnitude menor que o espaço do modelo de previsão ($n \sim 10^6$); o PSAS é independente da formulação do modelo de previsão, tornando-se um algoritmo adequado para diversas aplicações (Cohn et al., 1998).

Um esquema de interpolação estatística procura obter uma estimativa ótima do estado do sistema através de combinações de observações com o “first guess” do modelo. Sob estas condições, a equação da análise é descrita da seguinte forma:

$$w_a = w_f + K (w_o - H w_f) \quad (3.1)$$

$$K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1} \quad (3.2)$$

Onde,

w_a - é o vetor representando o campo analisado

w_f - denota o “first guess” do modelo

w_o - é o vetor das observações

O operador H é um operador de interpolação generalizada o qual transforma as variáveis do modelo em variáveis observacionais, e P^f e R representam a matriz de covariância dos erros de previsão e a matriz de covariância dos erros de observação, respectivamente. A matriz $K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1}$ é conhecida como Ganho de Kalman. As equações de análise são solucionadas aproximadamente pelo sistema de interpolação ótima (OI): para cada ponto de grade os pesos na Equação (3.2) são computados com um número reduzido de pontos de grade $p' \ll p$, e a Equação (3.1) é utilizada para obter o campo analisado. Este método é claramente impraticável se todas as observações forem retidas. O algoritmo PSAS consiste em resolver um sistema linear $p \times p$ para uma quantidade x

$$(H P^f H^T + R) x = w_o - H w_f \quad (3.3)$$

E em seguida obter o estado analisado w_a através da equação:

$$w_a = w_f + H^T x \quad (3.4)$$

que é uma matriz vetor mais leve.

3.3 Dados convencionais e de satélites utilizados na assimilação

O PSAS está apto a assimilar observações em superfície, tais como: altura geopotencial, componentes do vento sobre os oceanos e valores do conteúdo de água precipitável. Em altitude são assimilados perfis de altura geopotencial, componentes do vento e umidade específica, considerando neste caso apenas os níveis padrões (Herdies et al., 2007).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mantém um canal de obtenção de informações meteorológicas para aplicação em tempo real, denominado Global Telecommunication System (GTS). Encontram-se disponíveis nesse sistema diversos tipos de observações convencionais e não convencionais, tanto de superfície como de altitude. Dentre as observações de superfície, destacam-se as realizadas por estações meteorológicas, sensores instalados em boias oceânicas e a bordo de navios. As principais observações de altitude são provenientes de estações de radiossondagem, balões piloto e sensores a bordo de aviões. As observações convencionais são provenientes, em sua grande maioria, de estações terrestres. Sendo assim, apresentam uma distribuição espacial muito irregular e favorecem áreas continentais. Por outro lado, as observações não convencionais, obtidas via satélites, permitem a obtenção de dados sobre oceanos e em regiões onde os dados convencionais são mais escassos. Dentre as informações de satélite disponíveis atualmente no CPTEC para previsão numérica de tempo (Herdies et al., 2007), citam-se: observações de vento à superfície sobre o oceano provenientes do sensor QuikScat (Quik Scatterometer da NASA), perfis verticais de temperatura e umidade inferidos pelo *Advanced TIROS-N/NOAA Operational Vertical Souder* (ATOVS), e observações da altura geopotencial e conteúdo de água precipitável provenientes de sondagem do sensor AIRS/AMSU (Atmospheric InfraRed Souder/Advanced Microwave Sounding Unit).

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, um exemplo da distribuição espacial dos dados convencionais e dos dados provenientes de satélites disponíveis para assimilação no CPTEC.

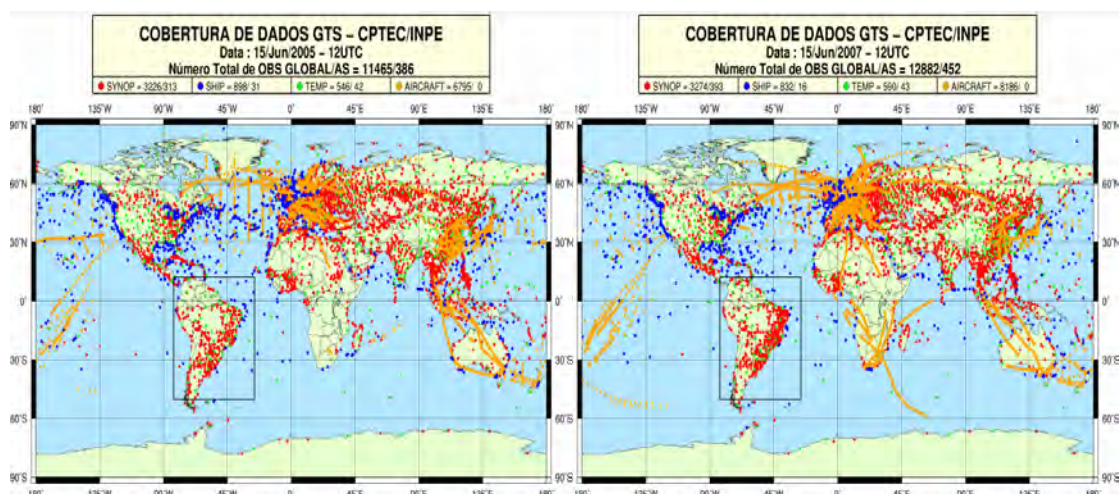


Figura 3.1- Distribuição espacial dos dados provenientes de instrumentos em bases terrestres disponíveis para assimilação no CPTEC-INPE referentes ao dia 14 de junho em 2005 (figura 1a) e em 2007 (figura 1b) às 12:00 UTC: Estações meteorológicas de superfície (SINOP), sensores em navios (SHIP), radiossondagens (TEMP), e a bordo de aviões (AIRCRAFT).
 Fonte: Herdies et al.,(2007).

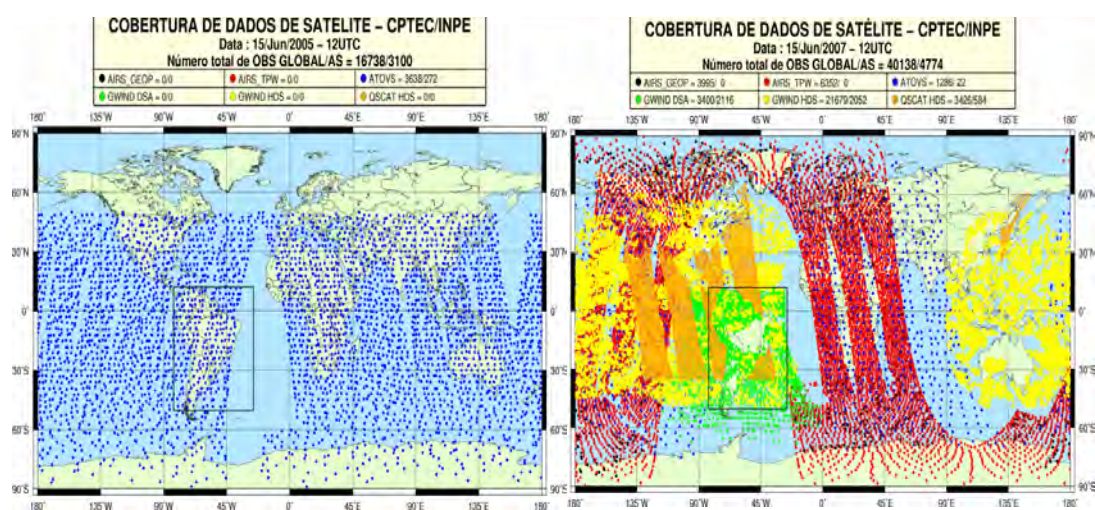


Figura 3.2- Distribuição espacial dos dados de satélites utilizados para a assimilação no CPTEC-INPE referentes ao dia 14 de junho em 2005 (figura 2a) e em 2007 (figura 2b) às 12:00 UTC. Os pontos em preto e vermelho se referem aos perfis de geopotencial e valores do TPW do AIRS/AMSU, os pontos em azul se referem aos perfis do ATOVS, os valores do vento por satélites gerados na DSA são plotados em verde enquanto que os obtidos via GTS são plotados em amarelo. Os dados do QuikSCAT são plotados em laranja.
 Fonte: Herdies et al.,(2007).

3.4 Dados de RO GNSS disponíveis

O CDAAC (*COSMIC Data Analysis and Archival Center*) processa dados brutos de RO GNSS e fornece perfis verticais em tempo próximo ao real, aproximadamente noventa minutos após a observação. Um algoritmo também fornece dados reprocessados para diferentes missões, tais como, GPSMET, GRACE-A e CHAMP, de forma consistente. Em modo pós-processamento, com maior acurácia, tais dados são disponibilizados em até seis semanas após as observações. Assim, esses perfis vêm sendo largamente utilizados com o objetivo de se aprimorar a qualidade das previsões numéricas de tempo, melhorar a capacidade das pesquisas climáticas e promover avanços em outras áreas. O Projeto GRAS SAF também disponibiliza dados de RO GNSS em tempo próximo ao real provenientes do satélite MetOp.

Com uma maior penetração na baixa troposfera, através de novas técnicas, os instrumentos do COSMIC/FORMOSAT-3 têm se mostrado capazes de observar a estrutura da camada limite da atmosférica tropical, fornecendo valiosas informações sobre o vapor d'água nos baixos níveis (Liou, 2008).

No presente trabalho, para assimilação dos dados RO GNSS de altura geopotencial e umidade no PSAS, procurou-se dentre os dados de diversos satélites disponíveis aqueles que fornecessem um maior número de perfis úmidos de RO GNSS com a maior qualidade possível. Os dados mais recentes do COSMIC/FORMOSAT-3 foram selecionados por atenderem a tais requisitos fornecendo aproximadamente 2500 perfis por dia.

A utilização dos meses de janeiro e julho de 2009 escolhidos para compor os experimentos, abrangendo inverno e verão, segue o exemplo de outros trabalhos aplicados aos modelos do NCEP (Cucurrull et al., 2007) e MetOffice (Buontempo et al., 2008). Entretanto, em função da crescente disponibilização de dados RO GNSS, aqui foram empregados um número de perfis duas vezes superior àquele empregado nos experimentos acima mencionados.

3.5 Dados RO GNSS FORMOSAT-3/COSMIC empregados

FORMOSAT-3/COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*) designa uma missão que teve seu lançamento em 14 de abril de 2006, através de uma parceria científica entre os EUA e Taiwan, com o intuito de demonstrar a utilidade dos dados RO GNSS na previsão de tempo operacional e análise climática. A missão colocou seis pequenos satélites, cada um carregando avançados receptores GPS, dentro de seis diferentes órbitas, separadas de 30 graus, a 800 km acima da superfície terrestre. Estes satélites formam uma constelação única, de órbita baixa, que recebem sinais dos satélites GPS norte-americanos. Com a habilidade de realizar ocultações tanto ascendentes como descendentes, o COSMIC/FORMOSAT-3 tem produzido atualmente 2500 sondagens diárias da atmosfera, uniformemente distribuídas ao redor do globo, desde 2007. Noventa por cento dos perfis obtidos são disponibilizados operacionalmente aos centros de previsão em até 3 horas após as observações.

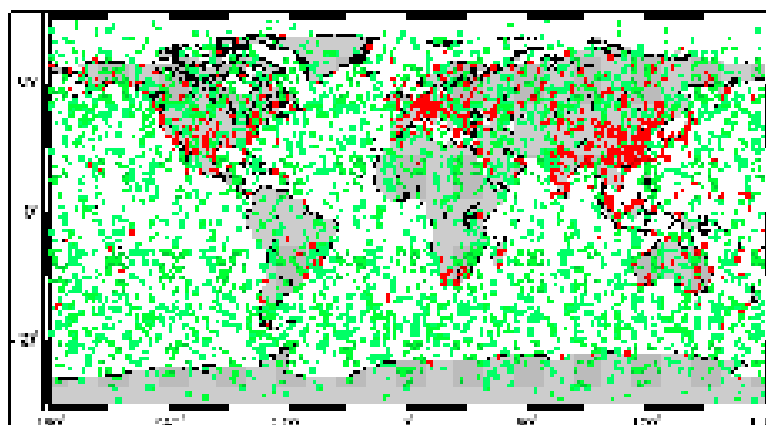


Figura 3.3 - Sondagens diárias realizadas pelo COSMIC/FORMOSAT-3 mostradas em verde, e estações de radiossonda plotadas em vermelho.

Para o experimento do presente trabalho, as Figuras 3.2 e 3.3 ilustram a quantidade de dados diários disponíveis e utilizados nos meses de janeiro e julho de 2009, os quais compõem o experimento.

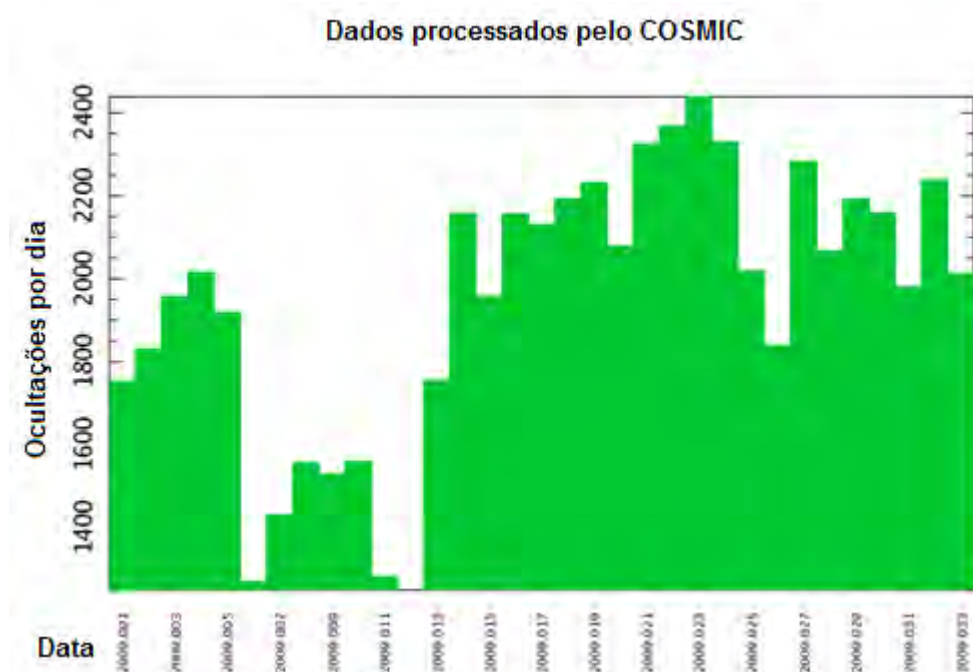


Figura 3.4 – Quantidade de perfis verticais diários fornecidos pelo COSMIC e disponíveis para assimilação referente ao mês de janeiro de 2009. Fonte: COSMIC/ CDAAC(2009).

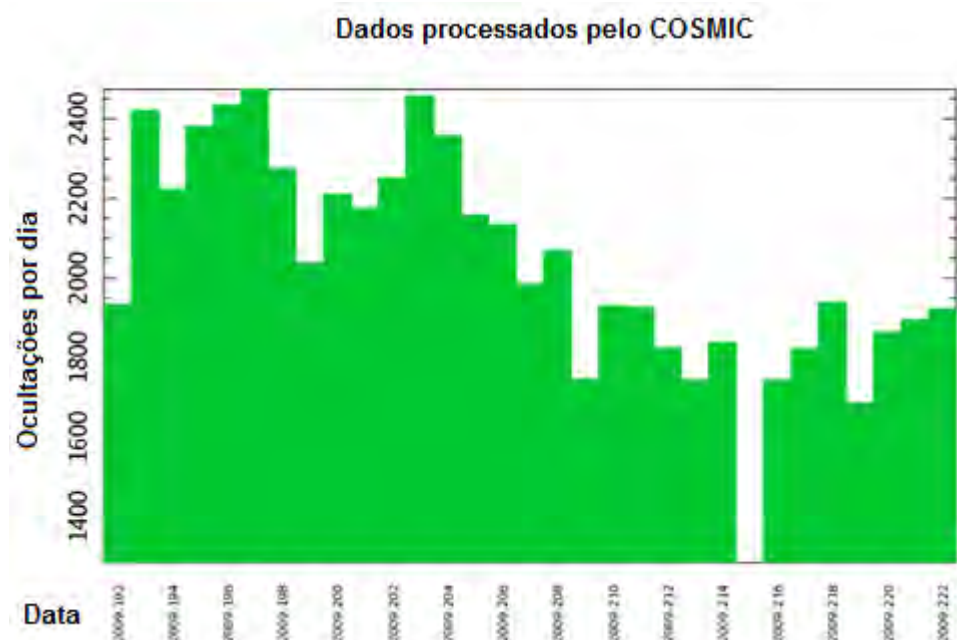


Figura 3.5 - Quantidade de perfis verticais diários fornecidos pelo COSMIC e disponíveis para assimilação referente ao mês de julho de 2009. Fonte: COSMIC/ CDAAC(2009).

4 METODOLOGIA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS DE ASSIMILAÇÃO E NA AVALIAÇÃO DO IMPACTO

Antes de dar início a assimilação dos dados RO GNSS, faz-se necessário determinar qual variável utilizar na assimilação, dentre as possíveis disponíveis no PSAS. Conforme já abordado na seção 2.5, a obtenção das estimativas de temperatura e ou vapor d'água através da RO GNSS passa por diferentes níveis de processamento. Embora dados menos processados produzam melhores resultados, a alta complexidade, os custos computacionais, e a necessidade do desenvolvimento de complicados operadores observacionais tornam as opções de dados brutos das medidas de fase e ângulos de curvatura referentes às frequências L1 e L2 inviáveis (Cucurul, 2009). A assimilação do ângulo de curvatura da atmosfera neutra (α), da refratividade (N) e valores de T e P_w com aplicação de métodos variacionais, parecem ser as formas mais apropriadas de assimilação de dados RO GNSS (Kuo, 2000). Cada uma dessas opções apresenta diferentes considerações, vantagens e desvantagens peculiares. No presente trabalho optou-se pela assimilação da altura geopotencial e umidade provenientes das variáveis T e P_w . Para essa opção foram considerados diversos fatores, desde recursos computacionais disponíveis, até a utilização do PSAS e sua transição para o novo sistema de assimilação, LETKF (*Local Ensemble Transform Kalman Filter*), além das vantagens e desvantagens inerentes a cada variável. Tal escolha apresenta a vantagem de um menor custo computacional, em relação a N e α , e não requer a utilização de um operador observacional. A grande vantagem na assimilação dos valores de temperatura e pressão de vapor está no fato de que a forma dos dados é a mesma daquela encontrada nas variáveis do modelo, e podem, desta forma, serem prontamente utilizados na geração de uma extensa variedade de análises objetivas em diferentes sistemas de assimilação (Kuo, 2000). Considerando as desvantagens, uma delas está no erro associado ao se assumir que o valor da refratividade N_{gps} é o mesmo da refratividade N_{local} (Kuo, 2000). Para amenizar esse problema um controle de qualidade (Poli et al., 2009), que será descrito na seção 4.2, foi aplicado. Uma segunda

desvantagem provém da utilização de uma fonte de dados externa nos baixos níveis para se obter os perfis de vapor d'água. A precisão desse perfil é afetada pela precisão dos dados externos utilizados. Neste caso, como solução, a utilização de métodos variacionais foi aplicada para amenizar tal fato.

4.1 Estratégia para desenvolvimento

Os perfis 1DVar fornecidos pelo COSMIC, utilizados no presente trabalho, são disponibilizados em: <<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/>>. A técnica 1DVar, descrita na seção 2.5.3 e empregada na obtenção dos perfis úmidos, é aplicada utilizando as análises do ECMWF. Esses perfis encontram-se no formato NetCDF e apresentam a estrutura descrita no anexo A. São disponibilizados dados de pressão, temperatura e pressão de vapor, todos em função da altura geométrica acima do nível médio do mar, para cada ponto de observação, com sua respectiva latitude e longitude.

O GPSAS, entretanto, está preparado para assimilar dados de vento, altura geopotencial, e razão de mistura, com os dados de entrada no formato ODS (*Observation Data Stream*). Desta forma, um programa foi elaborado para converter os dados do formato NetCDF para o formato ODS. Adicionalmente, foi criado um *script* para converter os dados de pressão de vapor, fornecidos pelo COSMIC, para razão de mistura, bem como converter a altura geométrica em altura geopotencial. Todos os programas desenvolvidos em função do presente trabalho estão descritos em detalhes na publicação intitulada: “Operacionalização da Assimilação de Dados GNSS no PSAS” (Souza et al.; 2011).

Considerando que os perfis verticais fornecidos pelo COSMIC disponibilizam dados com uma resolução vertical elevada (a cada 100 metros em algumas regiões), antes de realizar as conversões acima mencionadas, foi desenvolvida uma rotina para aplicar um *thinning* filtrando as observações redundantes para

o sistema. Com o método aplicado apenas as observações nos níveis padrões utilizados no GPSAS permaneceram (Souza et al.; 2011).

4.1.1 Conversão da altura geométrica em altura geopotencial

O procedimento de conversão da altura geométrica em altura geopotencial, utilizado, é descrito por (Mahoney, 2001). A altura geopotencial (H) em função da altura geométrica (Z), e da latitude (ϕ), é obtida através da equação:

$$H(Z, \phi) = \frac{\gamma_s(\phi)}{\gamma_{45}} \cdot \frac{R(\phi) \cdot Z}{R(\phi) + Z} \quad (4.14)$$

Sendo $\gamma_{45} = 9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a aceleração da gravidade na latitude de 45° ; $R(\phi)$, o raio da terra, em função da latitude, dado por:

$$R(\phi) = \frac{6378.137}{1.006803 - 0.006706 \cdot \sin(\phi)^2} \cdot \text{km} \quad (4.15)$$

e, γ_s , a equação de Somigliana para a gravidade normal a superfície de um elipsóide de revolução(HEISKANEN; MORITZ, 1969):

$$\gamma_s = 9.7803 \left[\frac{1 + (1.932E - 3 \cdot \sin(\phi)^2)}{\sqrt{1 - (6.694E - 3 \cdot \sin(\phi)^2)}} \right] \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.16)$$

Na conversão da pressão de vapor (P_w) para umidade específica (q) temos:

$$q = 622 \frac{p_w}{p - 0.37 p_w} \quad (4.17)$$

Onde p é a pressão no nível desejado.

4.2 Controle de qualidade dos dados RO GNSS

A assimilação da refratividade N , conforme descrito por Zou et al.(1999), pode acarretar erros significativos em regiões com consideráveis gradientes horizontais de refratividade, sobretudo na baixa troposfera, tendo em vista o fato da diferença entre N_{GPS} e N_{Local} decrescer com a altura. N_{Local} , neste caso, representa a refratividade dada pelo modelo, através da Equação (2.15), e N_{GPS} , a refratividade derivada da inversa de Abel, Equação(2.2), a partir do ângulo de curvatura (α), obtido por meio de um operador H considerando os campos do modelo. Assim, conforme descrito por Zou et al.(1999), a diferença ($N_{GPS} - N_{Local}$), serve para ilustrar o potencial de introdução de erros em N em função de se assumir uma simetria esférica. O autor também ressalta, em seu experimento, que essa diferença é em média menor do que a diferença entre a refratividade do modelo e a refratividade GPS observada. Desta forma o autor recomenda uma restrição ao uso de N nos baixos níveis especialmente nos casos da utilização direta de perfis derivados de N , como por exemplo, perfis de “dry temperature”. Kuo et al.(2000) considera conveniente a assimilação de refratividade acima do nível onde a suposição de simetria esférica não produza erros significativos. Essa estratégia tem sido adotada pelo NCEP e Met Office, que possuem modelos bem balanceados, e optaram por assimilar dados de refratividade acima de 4 km de altitude, (Cucurull et al.,2006) e (Buonotempo et al.,2008).

No presente trabalho, os perfis 1DVAR são empregados como uma alternativa ao problema para os níveis baixos. Adicionalmente foi aplicado um procedimento de controle de qualidade para os dados RO GPS descrito por Poli et al., 2009. O autor ressalta que a técnica de sondagem por rádio ocultação GNSS está baseada na propagação de ondas de rádio banda L na atmosfera terrestre. Especialistas em Radares Meteorológicos tipicamente consideram que uma refração normal ocorre quando o gradiente de refratividade dN/dz está entre -79 e 0 km^{-1} (DOVIAK; ZRNIC, 1984). Abaixo dessa faixa até -158 km^{-1} , é considerado super-refração. Sendo que subrefração pode ocorrer abaixo de -158 km^{-1} ou acima de 0 km^{-1} . Com base

em seu experimento voltado especificamente para controle de qualidade, análise de erros e impacto dos dados RO GNSS provenientes do COSMIC na previsão numérica de tempo, o autor (Poli et al.,2009) aconselha um procedimento de controle de qualidade denominado QC1, onde todos os dados RO GNSS observados localizados abaixo das regiões onde dN/dz atinge valores inferiores a -50 km^{-1} são considerados suspeitos. O valor conservador de -50 km^{-1} é adotado visando incluir a possibilidade de que algum dado de refratividade, ainda que em condições anormais, possa ter sido mascarado durante o processo de inversão. Dessa forma, no processo de organização dos dados utilizados (Souza et al.; 2011) foi adicionada uma rotina de exclusão dos dados cujos valores dN/dz encontravam-se abaixo de -50 km^{-1} . Após a aplicação desse controle foi observado uma redução de aproximadamente 5% na quantidade total de dados.

4.3 Determinação preliminar de OMF

Com o intuito de se obter ferramentas de análise para o estudo do impacto da assimilação de dados RO GNSS no GPSAS, foi realizado um levantamento preliminar dos valores da observação menos o *first guess*, designados por OMF, tendo como variável a altura geopotencial. A determinação preliminar de OMF para os perfis RO GNSS tem por finalidade a obtenção do desvio padrão desses valores. O desvio padrão das medidas de OMF das variáveis a serem assimiladas é um parâmetro necessário e utilizado pelo PSAS no processo de assimilação. Os valores preliminares de OMF para os perfis GNSS foram obtidos das análises geradas com o *first guess* do experimento de controle para o mês de janeiro de 2009 e das observações de altura geopotencial provenientes da RO GNSS. O cálculo foi realizado para todo o mês de janeiro, a cada horário sinótico, tendo-se o devido cuidado de produzir valores de OMF a partir de campos de (*first guess*) provenientes de análises sem a assimilação dos dados RO GNSS. As medidas de OMF, não só para observações RO GNSS, mas também para outros dados de altitude, tais como radiossondas e satélites, podem ser comparadas antes e depois da assimilação dos dados RO

GNSS, sendo úteis na avaliação do impacto da assimilação desses dados no sistema.

Os valores de OMF foram convenientemente separados por faixas de latitude, para melhor análise, em função da diferente distribuição de dados e resposta do modelo. As Figuras 4.2 e 4.3, abaixo, ilustram o desvio padrão das medidas de OMF da variável altura geopotencial para diferentes observações.

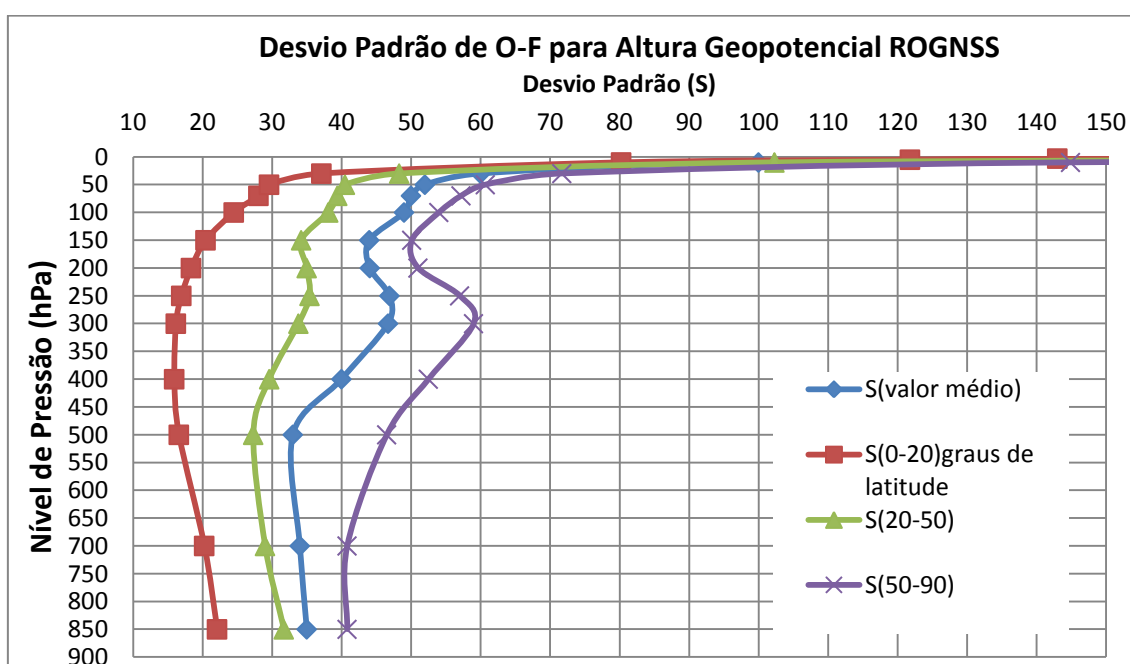


Figura 4.2 - Desvio padrão dos valores de OMF para observações de altura geopotencial obtidas por rádio ocultação GNSS, em diferentes níveis de pressão e diferentes faixas de latitude abrangendo ambos os hemisférios.

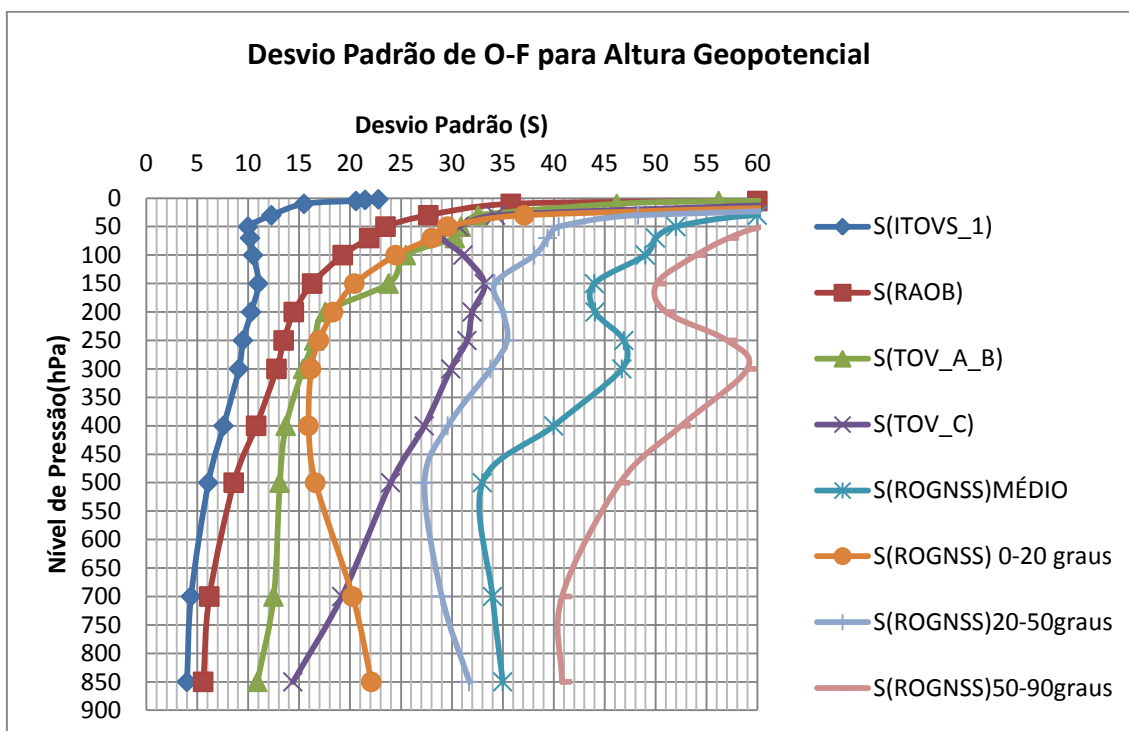


Figura 4.3 - Desvio padrão dos valores de OMF para diferentes observações assimiladas no GPSAS.

Os valores referentes às observações RO GNSS foram obtidos experimentalmente, conforme anteriormente descrito. O desvio padrão, para as demais observações, visualizado na Figura 4.3, refere-se aos valores atualmente utilizados pelo PSAS no processo de assimilação. A Figura 4.2 ilustra um substancial aumento de OMF para perfis RO GNSS sobre as altas latitudes, em ambos os hemisférios. Contudo, analisando os hemisférios norte e sul, separadamente, verificou-se que o aumento substancial de OMF entre as latitudes de 50° e 90° é causado pelo hemisfério sul, onde alguns desses valores de OMF chegam a ser duas vezes superiores entre 50°S-90°S em comparação a região compreendida entre as latitudes de 0° e 20°. Tais diferenças podem ser atribuídas a distribuição da quantidade de dados disponíveis para assimilação, que teriam um impacto direto na qualidade da análise e consequentemente no *first guess*.

4.4 Distribuição e quantidade de dados de altitude disponíveis para assimilação no sistema operacional do CPTEC

O levantamento preliminar dos valores de OMF realizado para as observações RO GNSS, descrito na seção 4.3, apontou grandes diferenças ao se considerar diferentes faixas de latitude. Buscando uma melhor compreensão, tanto dessas diferenças, bem como do impacto da assimilação desses dados no GPSAS, foi realizado um levantamento da quantidade e distribuição dos dados de altitude assimilados pelo sistema. Dessa forma, torna-se possível associar valores maiores ou menores de OMF, referentes aos perfis GNSS, a regiões com maior ou menor disponibilidade dos demais dados, que compõem a análise utilizada na elaboração do *first guess*.

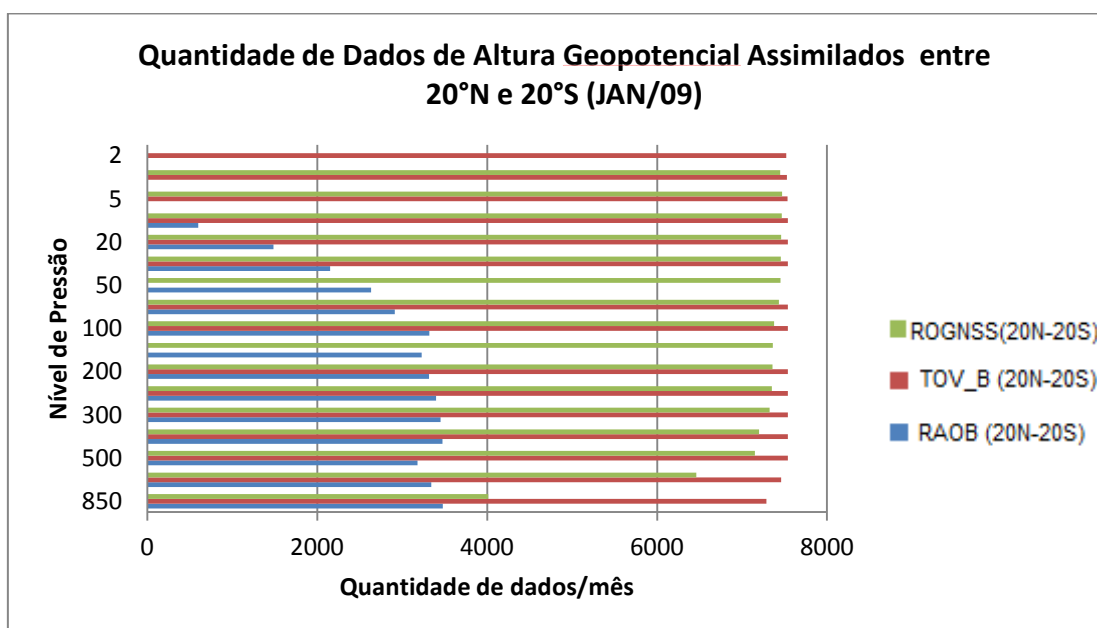


Figura 4.4 – Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 20°N e 20°S. Dados de rádio ocultação (ROGNSS), dados de satélite (TOV_B) e dados de radiossondas (RAOB).

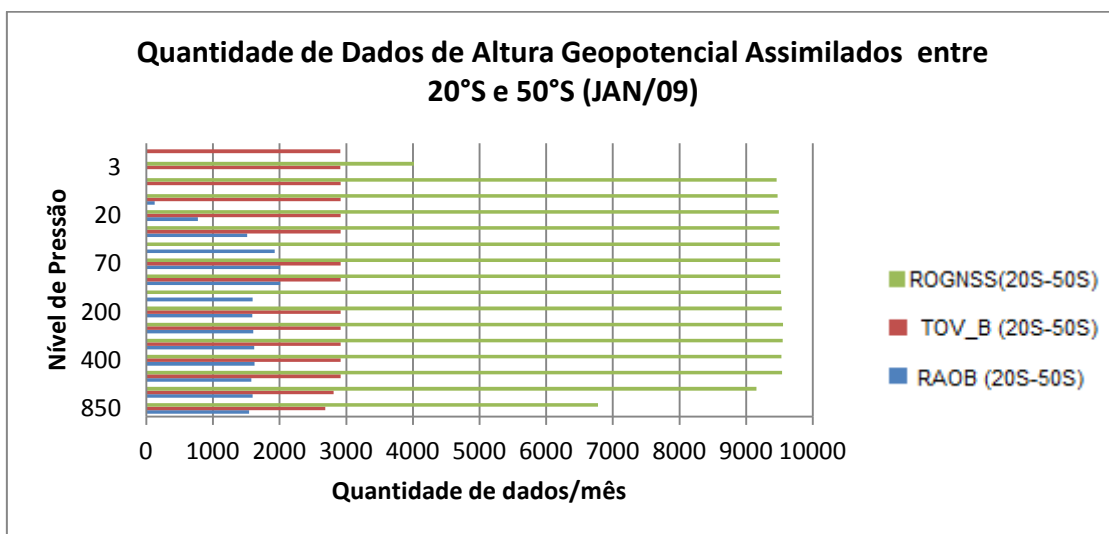


Figura 4.5 - Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 20°S e 50°S. Dados de rádio ocultação (ROGNSS), dados de satélite (TOV_B) e dados de radiossondas (RAOB).

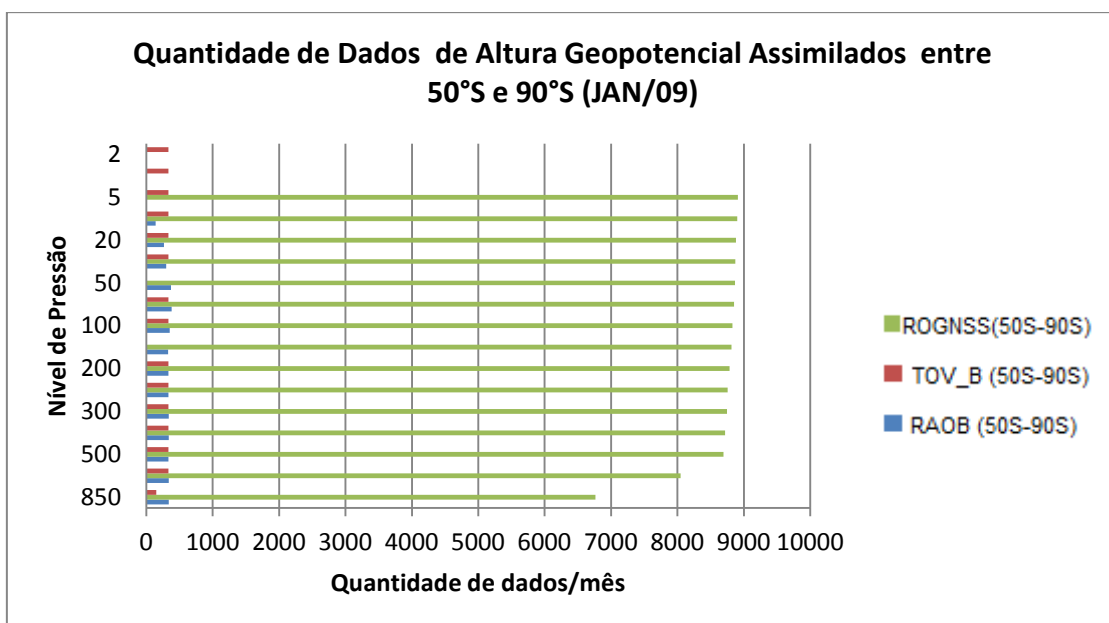


Figura 4.6- Quantidade de dados de altura geopotencial assimilados no mês de janeiro/09 entre as latitudes de 50°S e 90°S. Dados de rádio ocultação (ROGNSS), dados de satélite (TOV_B) e dados de radiossondas (RAOB).

Observou-se que a quantidade de dados de altitude assimilados pelo sistema decresce drasticamente à medida que se considera latitudes cada vez mais

próximas ao Polo Sul. Os poucos dados em forma de perfis verticais, tais como radiossondas e dados de satélites disponíveis para assimilação, atingem valores inferiores a 400 perfis por mês, o equivalente a aproximadamente 10 a 12 perfis diários, entre as latitudes de 50°S e 90°S. Esses números passam, respectivamente, para um valor aproximado de 70 e 100 perfis diários de radiossondagens e dados de satélite, entre as latitudes de 20°S e 50°S. Essa escassez de dados é compatível com o aumento dos valores de OMF verificados para latitudes maiores sobre o hemisfério sul. Igualmente, pode-se esperar um significativo impacto da assimilação dos perfis de RO GNSS sobre tais latitudes, uma vez que este número passa de 12 para aproximadamente 300 perfis, assimilados entre as latitudes de 50°S e 90°S, e de 100 para 400 perfis, entre as latitudes de 20°S e 50°S. Outro fator relevante, que pode ser observado, é a forte queda na quantidade de dados provenientes de radiossondas para níveis de pressão acima de 50hPa, visto que os balões que levam as radiossondas normalmente estouram antes de atingir esse nível. Em contrapartida, os dados de RO GNSS, que começam a ser coletados no topo da atmosfera, são abundantes nos níveis superiores.

4.5 Experimentos realizados

Para o presente trabalho foram realizados seis experimentos. Para cada um dos meses de janeiro e julho de 2009, os experimentos compuseram-se por diferentes rodadas denominadas:

- “Controle”, apenas com a assimilação dos dados convencionais empregados no sistema GPSAS do CPTEC;
- “Exp1b”, experimento assimilando os dados convencionais e os perfis de altura geopotencial provenientes da RO GNSS; e
- “Exp1c”, onde, além dos perfis de altura geopotencial, também foram assimilados os perfis de razão de mistura.

Todos os perfis 1DVar de altura geopotencial e umidade empregados são provenientes de rádio ocultação GNSS e fornecidos pelo COSMIC.

Em todos os experimentos foram geradas previsões para até 5 dias, com janelas de assimilação de ± 3 horas, em torno do *first guess* gerado diariamente nos horários sinóticos: 00Z, 06Z, 12Z e 18Z.

Para avaliar o impacto da assimilação dos dados RO GNSS no modelo, as previsões de ambos os experimentos, “Controle” e “Exp”, foram comparadas com a própria análise do modelo. A máquina utilizada na realização dos experimentos foi o supercomputador NEC SX6 do CPTEC.

4.6 Análise empregada na avaliação das previsões

Conforme verificado nas seções 4.3 e 4.4, considerando o sistema de assimilação de dados PSAS do CPTEC, a quantidade de dados de altitude disponíveis para assimilação sobre o hemisfério sul é muito pequena, sendo bem inferior àquela disponível para assimilação sobre o hemisfério norte. Desconsiderando os perfis RO GNSS, os poucos dados em forma de perfis verticais, tais como radiossondas e dados de satélites disponíveis para assimilação, chegam a atingir valores inferiores a 400 perfis por mês, o equivalente a aproximadamente 10 a 12 perfis diários, entre as latitudes de 50°S e 90°S. Esses números passam, respectivamente, para um valor de 70 e 100 perfis diários de radiossondagens e dados de satélite, entre as latitudes de 20°S e 50°S. Tais constatações podem ter implicações na avaliação das previsões do experimento de controle sobre o hemisfério sul, e principalmente sobre as altas latitudes desse hemisfério, se considerado como referência uma análise gerada com uma base pobre de dados. Em uma região onde a quantidade de dados disponíveis para assimilação é ínfima, pressupõe-se que a análise gerada será muito semelhante ao *first guess*, tornando as previsões com qualidade relativamente inferiores, pois não existe correção do *first guess* com a inclusão de observações. A Figura 4.7(a), abaixo, ilustra os valores de RMS para uma previsão de 12 horas da variável altura geopotencial em diversos níveis de pressão, para o experimento de controle do mês de janeiro de 2009, tendo como referência a análise do próprio experimento de controle,

onde foram contabilizados apenas 10 a 12 perfis verticais diários, assimilados entre as latitudes de 50°S e 90°S.

Na Figura 4.7(b) estão os valores de RMS para a mesma previsão do experimento controle, porém utilizando como referência a análise gerada com a adição dos perfis RO GNSS, perfazendo agora um total de aproximadamente 300 perfis verticais entre 50°S e 90°S.

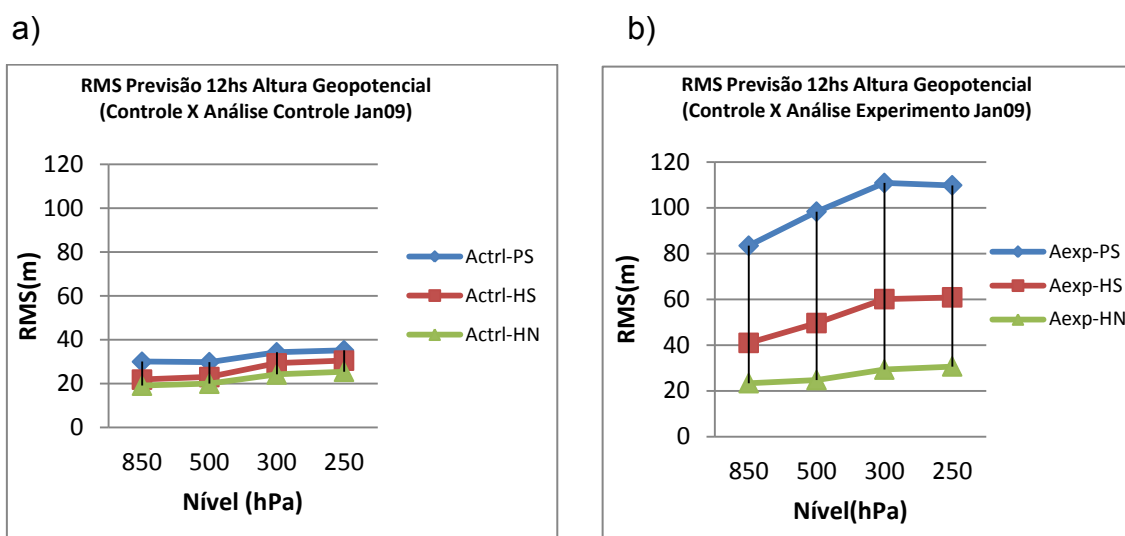


Figura 4.7 - Valores de RMS para 12hs de previsão da variável altura geopotencial obtidos com o experimento de controle para o mês de janeiro de 2009, onde HS designa hemisfério sul, HN hemisfério norte e PS latitudes entre 50°S e 90°S a) Análise do controle (Actrl) utilizada como referência. b) Análise do experimento (RO GNSS) utilizada como referência.

Analisando as figuras é possível perceber o impacto proporcional que a adição de dados RO GNSS teve sobre a análise em diferentes latitudes. Considerando que em ambos os gráficos a previsão é a mesma, na Figura 4.7 b), a análise foi pouco modificada no hemisfério norte e fortemente modificada entre as latitudes de 50°S e 90°S – (PS). Se considerarmos como melhor análise aquela gerada com maior número de dados, podemos afirmar que as diferenças entre os valores de RMS, das previsões para o polo sul, hemisfério norte e hemisfério sul, são maiores, como mostra a Figura 4.7b, e não tão

semelhantes, conforme ilustrado na Figura 4.7a). Tal consideração estaria em conformidade com a diferença entre a quantidade de dados disponíveis para assimilação nas diferentes regiões. Leroy (1997) encontrou maiores diferenças, entre as análises de altura geopotencial operacionais do ECMWF e as computadas com dados de RO GPS, sobre regiões onde os dados eram mais esparsos. Analogamente, Rocken (1997) computou maiores diferenças entre perfis de refratividade RO GPS e análises de perfis de temperatura de um modelo de previsão numérica global sobre regiões com menor densidade de dados. Considerando que possíveis erros nos dados de refratividade obtidos através da RO GPS eram homogêneos sobre todas as regiões, concluiu que a diferença encontrada, estava relacionada à qualidade das análises do modelo de previsão, que apresentavam maiores erros sobre as regiões onde os dados eram mais esparsos. Assim sendo, no presente trabalho, a análise gerada com a inclusão dos dados RO GNSS foi escolhida para ser empregada na avaliação das previsões de ambos os experimentos, controle e teste. Andreoli et al. (2008) adota estratégia semelhante na escolha da análise utilizada como referência.

5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS RO GNSS

Neste capítulo são mostrados os resultados dos experimentos realizados com o intuito de verificar o impacto da assimilação de dados RO GNSS no GPSAS, em operação no CPTEC. O trabalho foi dividido em duas etapas principais. O primeiro experimento consistiu em assimilar os perfis RO GNSS de altura geopotencial (Exp1b). Em um segundo experimento, foram assimilados os perfis de altura geopotencial e umidade simultaneamente (Exp1c). Em ambos foram realizadas assimilações para os meses de janeiro e julho de 2009. As previsões para até cinco dias do modelo global do CPTEC, GPSAS T213L42, foram avaliadas antes e após a assimilação dos dados RO GNSS, em cada um dos casos acima citados. As análises dos resultados foram divididas por regiões, abrangendo todo o globo, hemisfério norte (HN), hemisfério sul (HS) e América do Sul (AS). As variáveis analisadas foram: vapor d'água integrado, vento zonal, vento meridional, umidade relativa e altura geopotencial, nos níveis de 850 a 250hPa. As seções 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, os resultados dos experimentos Exp1b e Exp1c. Nas seções 5.3, 5.4 e 5.5 são realizadas análises do impacto da assimilação dos dados RO GNSS sobre o Hemisfério Norte, Hemisfério Sul e América do Sul, separadamente. Também neste capítulo são feitas as análises dos valores de OMF e OMA, antes e depois da inserção dos perfis RO GNSS no sistema de assimilação. Observações com relação à quantidade e distribuição dos dados disponíveis para assimilação, também são apresentadas neste capítulo.

5.1 Resultados dos experimentos de assimilação de perfis de altura geopotencial RO GNSS

A Figura 5.1, abaixo, apresenta os valores de RMS e correlação de anomalia, referente às previsões para todo o globo, no mês de janeiro de 2009. A legenda Exp1b designa os experimentos onde foram assimilados os perfis de rádio ocultação GNSS de altura geopotencial, além dos dados convencionais assimilados operacionalmente no experimento de Controle.

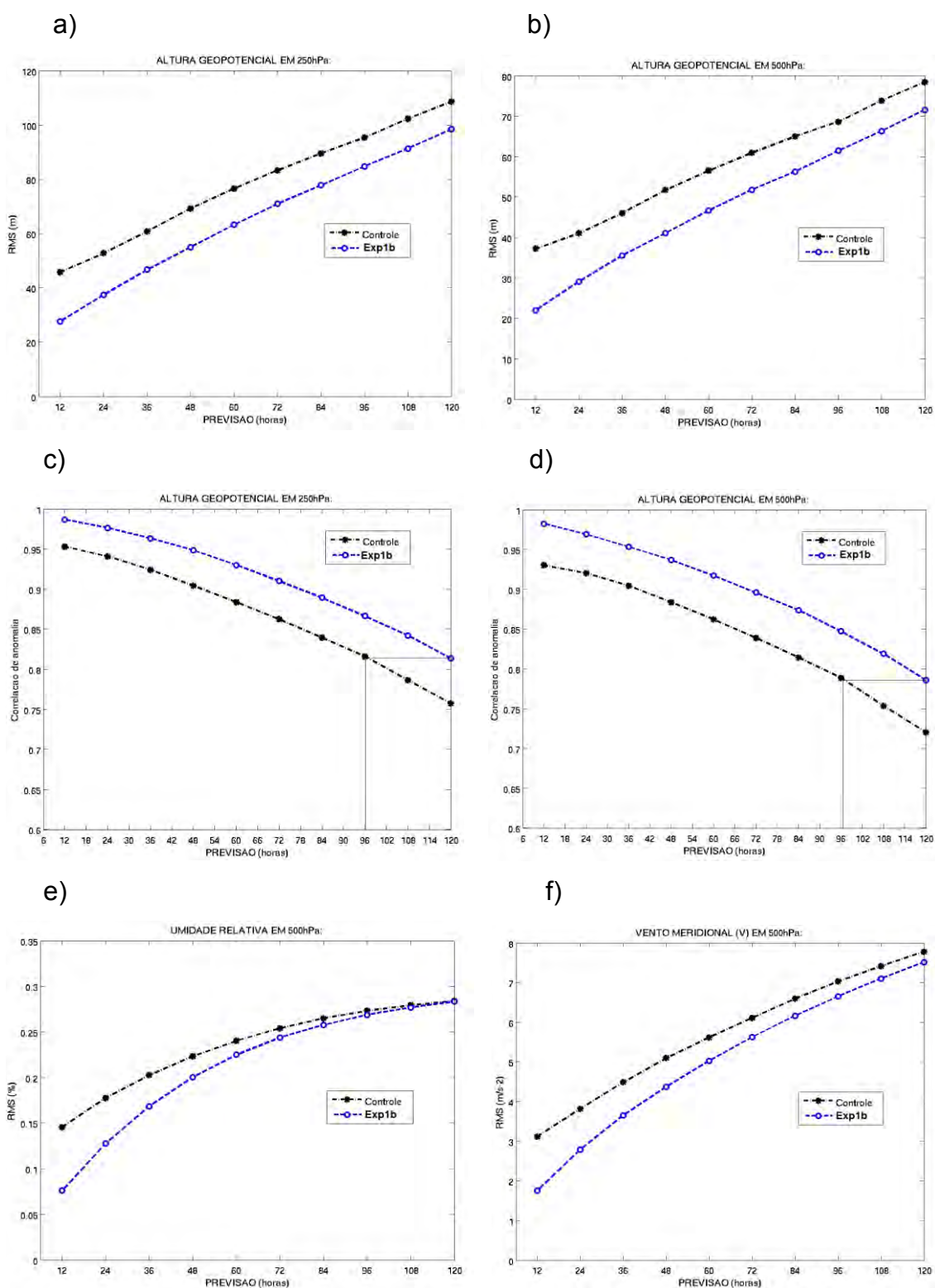


Figura 5.1– Experimentos de Controle e Assimilação de perfis RO GNSS de altura geopotencial – Exp1b, com previsões globais para janeiro de 2009. a) RMS altura Geopotencial em 250hPa. b) RMS altura geopotencial em 500hPa. c) CA para altura geopotencial em 250hPa.; d) CA altura geopotencial em 500hpa; e) RMS UR em 500hPa; f) RMS vento meridional em 500hPa.

Observou-se uma melhora no RMS da variável altura geopotencial em todos os níveis, durante todo o período de previsão. Na análise da correlação de anomalia para variável altura geopotencial em 500hpa, o mesmo desempenho alcançado pelo controle para uma previsão de 96 horas, com o exp1b, se estendeu para uma previsão de 120 horas, gerando um ganho de 24 horas (fig. 5.1(d)). A assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial também produziu resultados positivos na previsão do vento zonal, vento meridional e umidade relativa fig. 5.1(e) e 5.1(f).

O mesmo experimento, para o mês de julho de 2009, apresentou resultados semelhantes. Os principais valores de RMS e CA relativos aos experimentos de controle e teste para previsões sobre o globo, no mês de julho, estão apresentados na Figura 5.2, a seguir. A correlação de anomalia apresentou ganhos em todo período analisado, aumentando a validade da previsão em 22horas, ao se considerar o quinto dia de previsão da altura geopotencial em 500hPa (Fig. 5.2f).

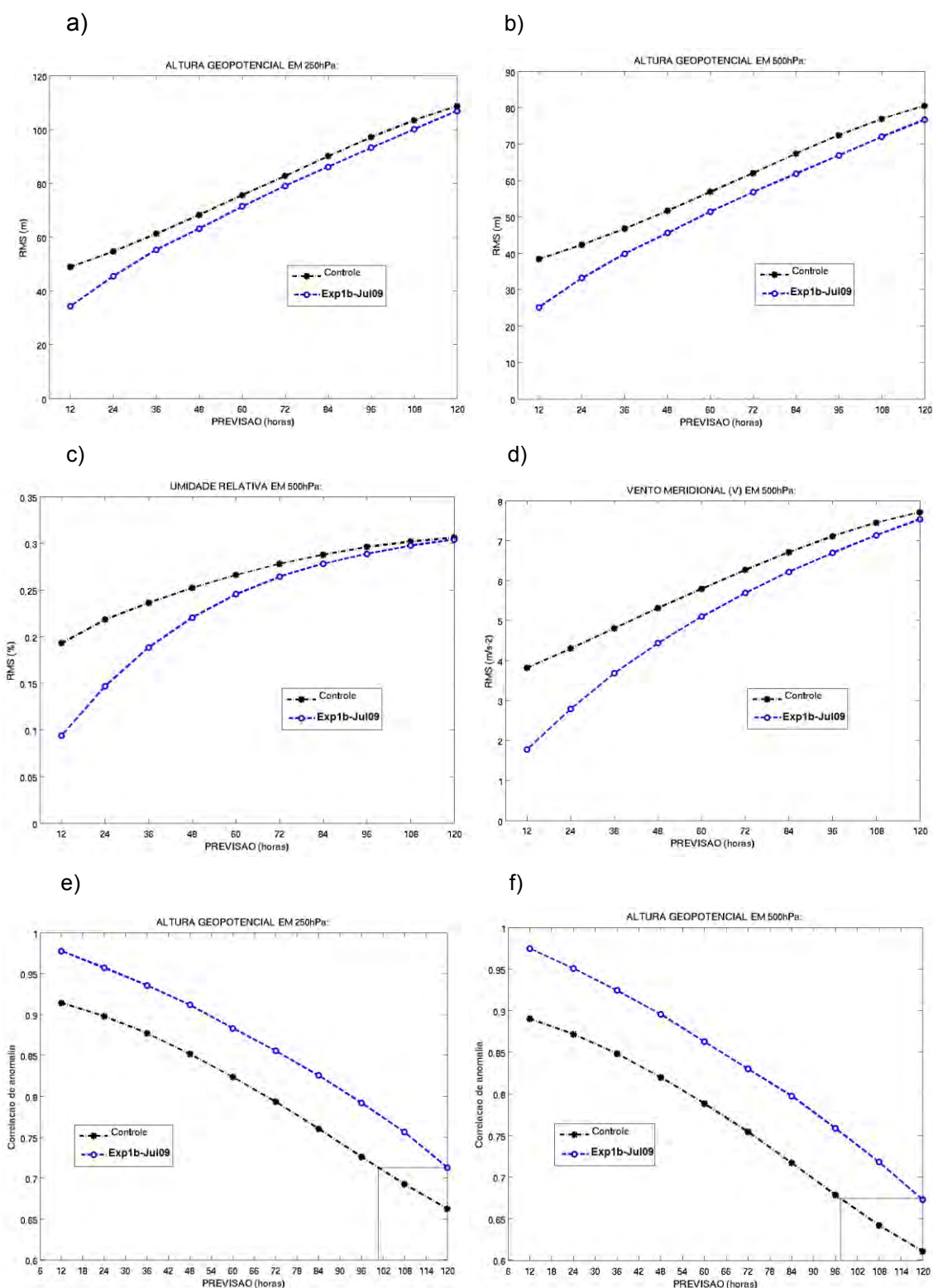


Figura 5.2 - Experimentos de Controle e teste (contendo assimilação de perfis verticais de altura geopotencial RO GNSS) com previsões globais para o mês de julho de 2009. a) RMS altura geopotencial em 250hPa. b) RMS altura geopotencial em 500hPa. c) RMS UR em 500hPa; d) RMS vento meridional em 500hPa; e) CA para altura geopotencial em 250hPa f) CA em 500hPa.

A Figura 5.3 apresenta o viés dos campos de vento zonal e altura geopotencial, em 500 e 850hPa, para os experimentos controle e teste, obtidos nos meses de julho e janeiro de 2009.

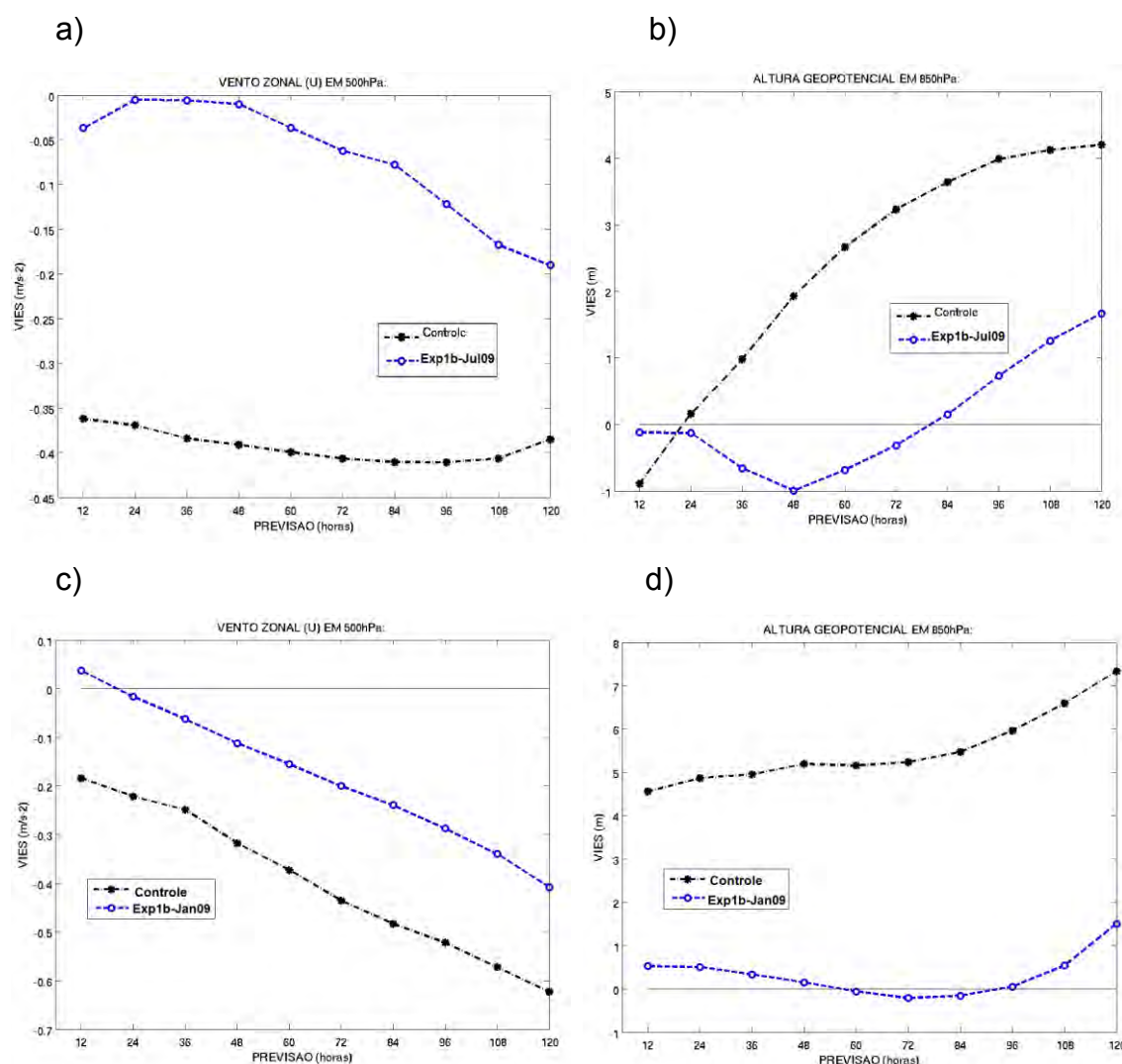


Figura 5.3 – Viés referente aos experimentos controle e teste (Assimilação dos perfis de Altura Geopotencial RO GNSS). a) Viés Vento zonal 500hPa (jul/09); b) Viés Altura geopotencial 850hPa (jul/09); c) Viés Vento zonal 500hPa (jan/09); d) Viés Altura geopotencial 850hPa (jan/09) ;

Verificou-se uma redução no viés em todo período analisado, nos campos de vento e altura geopotencial. A assimilação de altura geopotencial RO GNSS também produziu redução no viés nos campos de umidade relativa.

5.2 Resultados dos experimentos de assimilação dos perfis de altura geopotencial e umidade RO GNSS

Em adição a assimilação dos perfis de altura geopotencial, um segundo experimento foi realizado assimilando também os perfis de umidade RO GNSS. Os experimentos denominados jan09-Exp1c e jul09-Exp1c apresentam, respectivamente, os resultados da assimilação desses perfis com previsões para todo globo, nos meses de janeiro e julho. Os perfis de umidade foram assimilados nos níveis selecionados entre 850hPa e 400hPa. Alguns dos principais resultados são apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5.

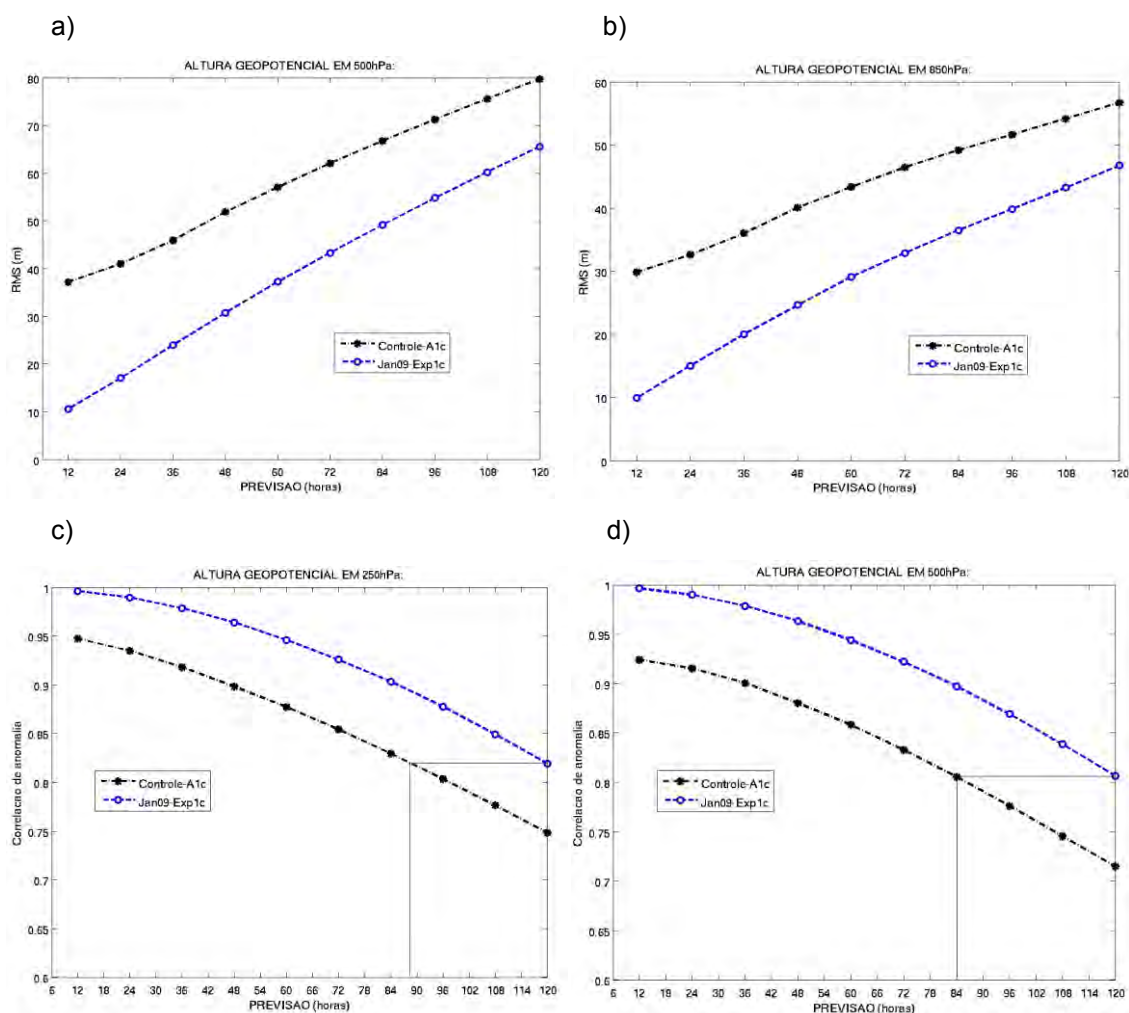


Figura 5.4– Experimentos de controle e teste (Assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade - Jan09-Exp1c) com previsões globais para o mês de janeiro de 2009. a) RMS altura geopotencial em 500hPa; b) RMS altura geopotencial em 850hPa; c) CA altura geopotencial em 250hPa; d) CA altura geopotencial em 500hPa.

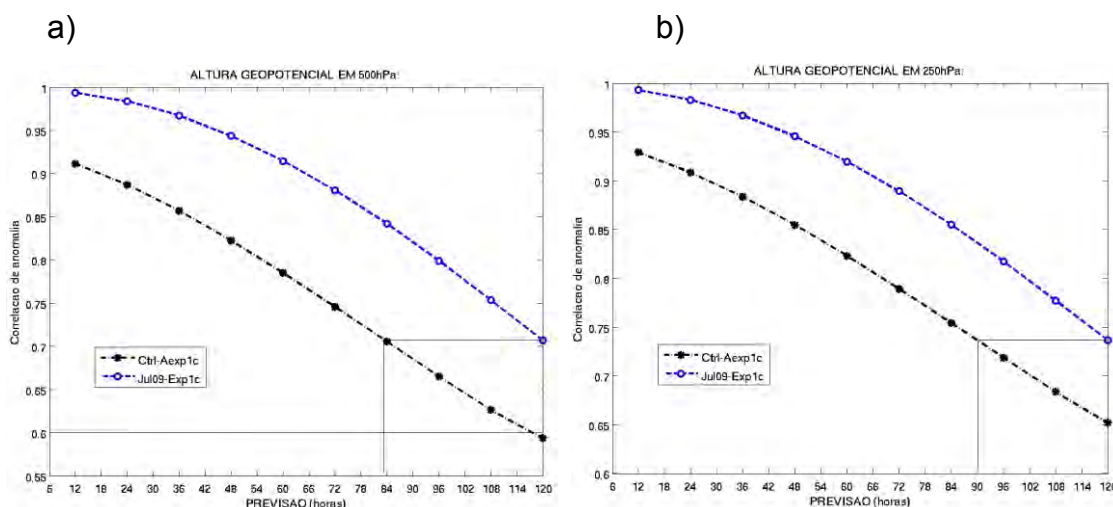


Figura 5.5- Experimentos de controle e teste (Assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade - Jul09-Exp1c) com previsões globais para o mês de julho de 2009; a) CA altura geopotencial em 500hPa; b) CA altura geopotencial em 250hPa.

Observou-se no mês de janeiro uma redução de até 28 metros nos valores de RMS para altura geopotencial em 500hPa, e de até 20 metros em 850hPa, conforme ilustrado nas Figuras 5.4a) e 5.4b). Os ganhos na correlação de anomalia apresentaram-se semelhantes em ambos os meses, foram observados em todo período de previsão, e alcançaram um ganho de 36 horas na previsão do quinto dia (Figuras: 5.4d) e 5.5a)).

A assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade (Exp1c) apresentou resultados melhores em relação ao experimento onde foram assimilados apenas os perfis de altura geopotencial (Exp1b). A Figura 5.6, a seguir, apresenta os ganhos ao se assimilar adicionalmente os perfis de umidade. Os gráficos comparam os valores de CA e RMS, dos dois experimentos, Jul09-Exp1b e Jul09-Exp1c, para o mês de julho.

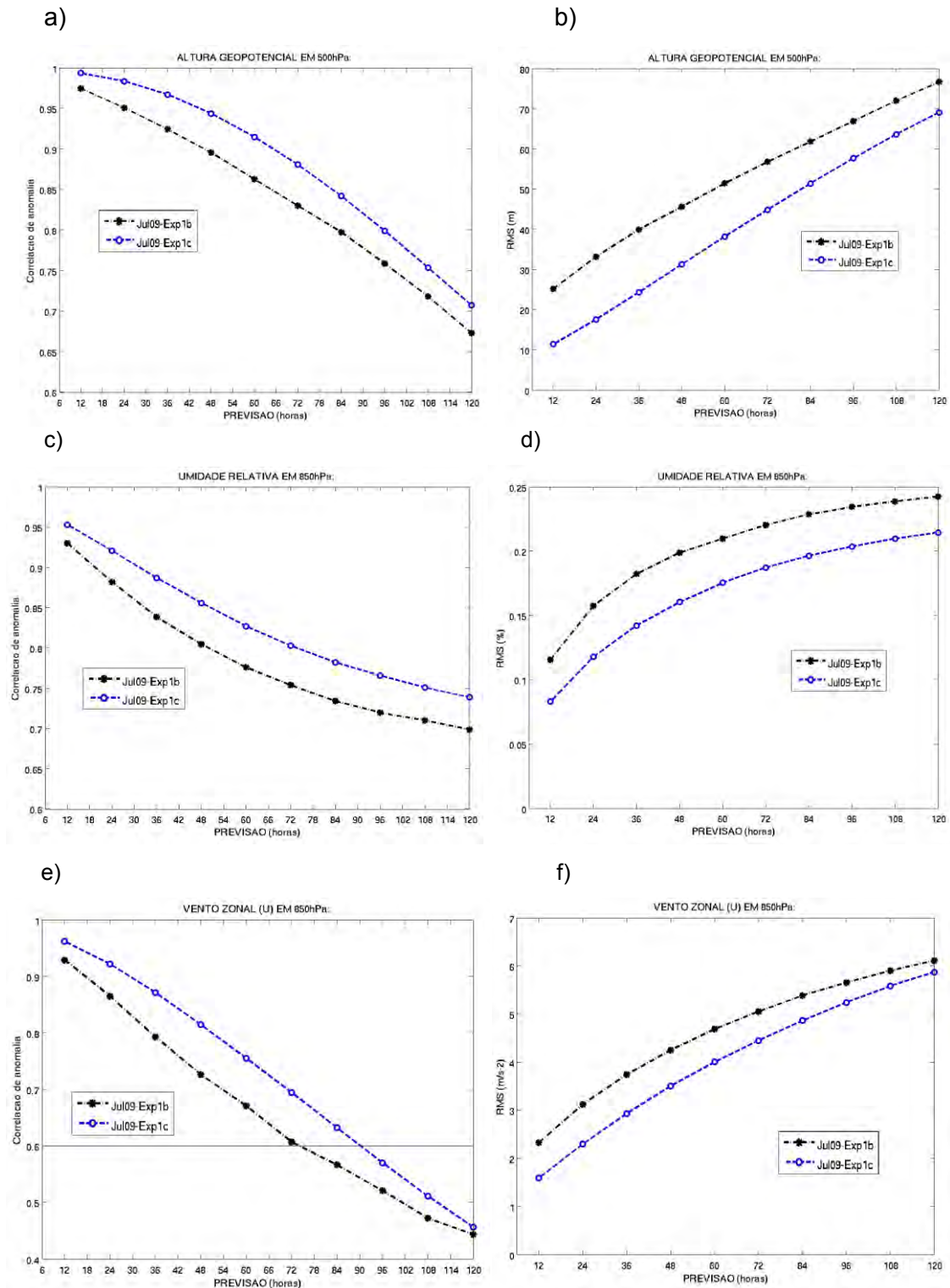


Figura 5.6 - Experimentos contendo a assimilação dos perfis RO GNSS de altura Geopotencial (Jul09-Exp1b) e altura geopotencial e umidade (Jul09-Exp1c), com previsões globais para o mês de julho de 2009. a) CA altura geopotencial em 500hPa; b) RMS altura geopotencial em 500hPa; c) CA umidade relativa em 850hPa; d) RMS umidade relativa em 850hPa; e) CA vento zonal em 850hPa; f) RMS vento zonal em 850hPa.

A adição da umidade proporcionou ganhos adicionais na CA da altura geopotencial em 500hPa, da ordem de 0,05 (fig. 5.6a)). Observou-se também uma redução adicional de 8 a 15 metros nos valores de RMS para o mesmo nível (fig.5.6b).

5.3 Análise dos experimentos para o hemisfério norte

A análise dos experimentos de teste para o hemisfério norte apresentou ganhos em relação ao experimento de controle em ambos os casos, tanto na assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial, isoladamente, como na assimilação dos perfis de altura geopotencial e umidade, juntos. Assim como para as previsões globais, no hemisfério norte, os ganhos também foram superiores ao se assimilar altura geopotencial e umidade. A Figura 5.7 ilustra os valores de correlação de anomalia da variável altura geopotencial em 500hPa e 850hPa, para previsões no hemisfério norte, no mês de janeiro, onde foram assimilados os perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade (Exp1c).

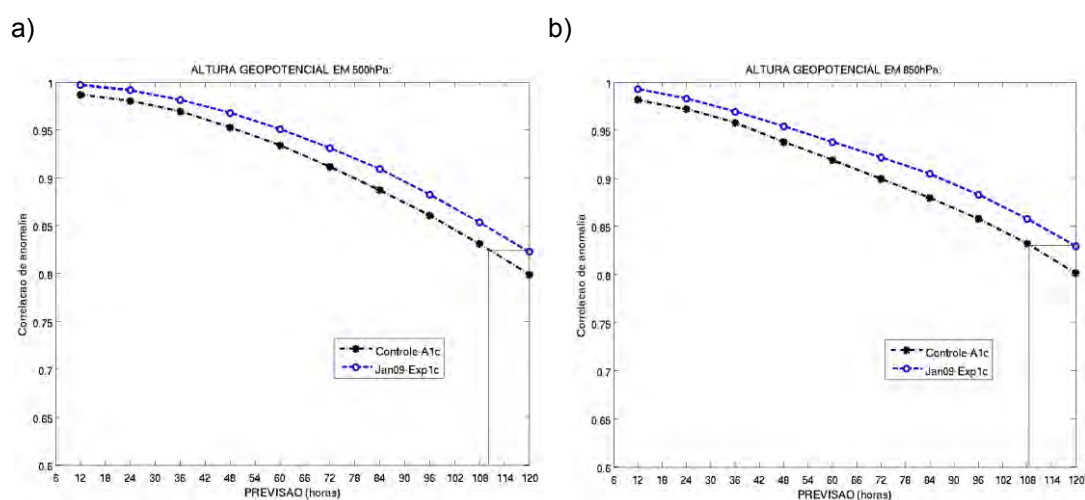


Figura 5.7– Previsões para o HN com experimentos de controle (Controle-A1c) e assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade (Jan09-Exp1c)
a) CA altura geopotencial em 500hPa.;b) CA altura geopotencial 850hPa.

A correlação de anomalia da variável altura geopotencial em 500hPa e 850hPa apresentou ganhos em todo o período, alcançando um ganho de aproximadamente 12 horas no quinto dia (fig. 5.7(b)). Também houve redução do viés do vento zonal, vento meridional, e umidade relativa. Os valores de RMS apresentaram redução de até 10 metros para altura geopotencial em 500hPa.

Em comparação com as previsões para todo o globo (fig. 5.1), as previsões dos experimentos sobre o hemisfério norte apresentaram ganho inferior. Tal fato pode ser atribuído a um menor impacto da assimilação dos perfis RO GNSS sobre um hemisfério com maior quantidade de dados disponíveis.

5.4 Análise dos experimentos para o hemisfério sul

A Figura 5.8 apresenta os valores da correlação de anomalia para o hemisfério sul, nos meses de janeiro e julho de 2009, referente aos experimentos de controle(Ctrl) e assimilação da altura geopotencial e umidade RO GNSS (Exp1c).

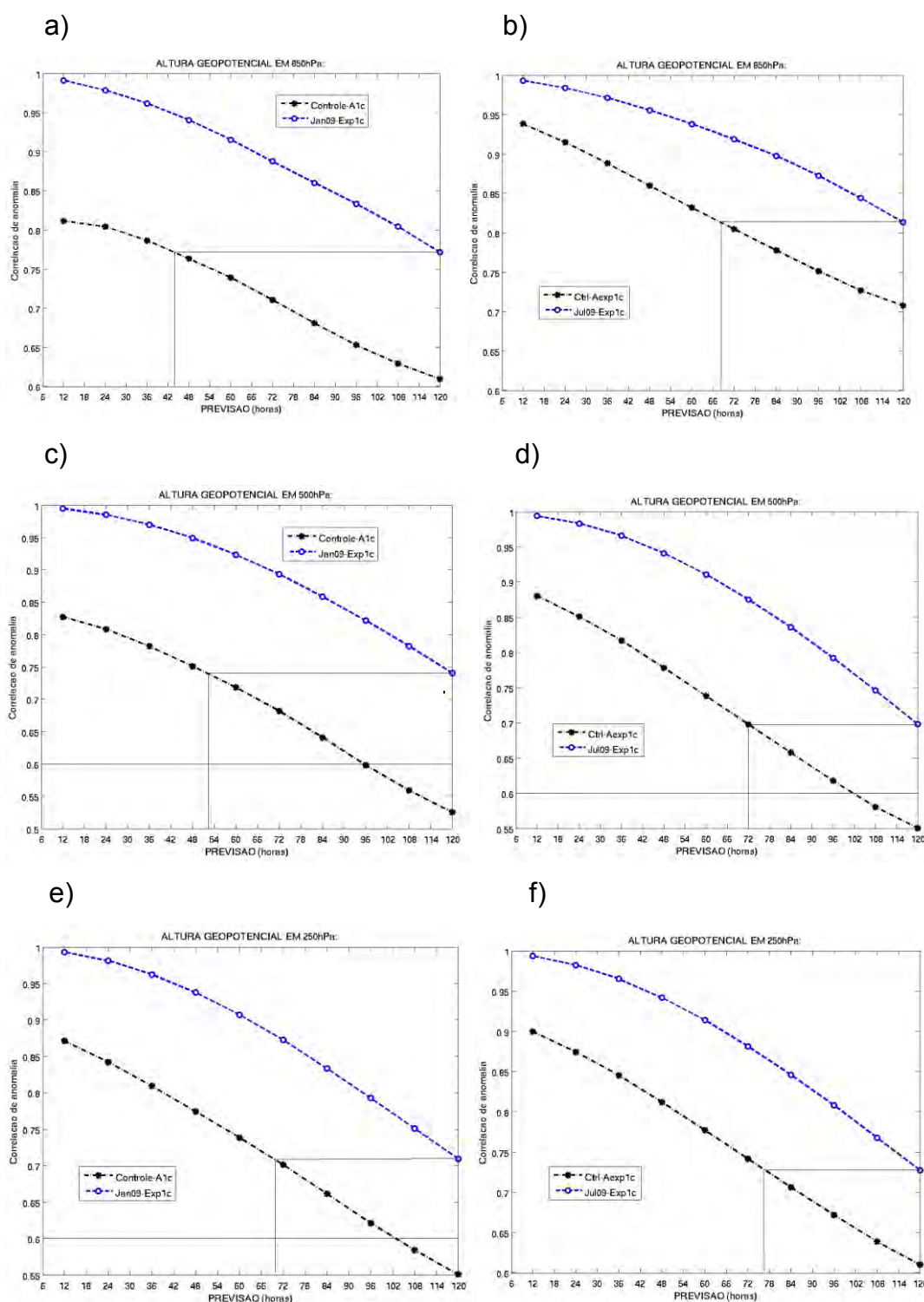


Figura 5.8- Previsões para o HS com os experimentos de controle e assimilação altura geopotencial e umidade RO GNSS (Exp1c), nos meses de janeiro e julho
a) CA altura geopotencial em 850hPa - JAN09.; b) CA altura geopotencial 850hPa-JUL09; c) CA altura geopotencial em 500hPa-JAN09; d) CA altura geopotencial 500hPa-JUL09; e) CA altura geopotencial 250hpa –JAN09; f) CA altura geopotencial 250hpa – JUL09.

Assim como para as previsões globais e previsões para o hemisfério norte, as previsões para o hemisfério sul obtidas com os experimentos de assimilação dos perfis RO GNSS de altura geopotencial e umidade apresentaram um resultado superior em relação ao experimento onde foram assimilados unicamente os perfis de altura geopotencial. Ambos os meses apresentaram resultados positivos. Os ganhos na correlação de anomalia da altura geopotencial em 850, 500 e 250hPa foram maiores no mês de janeiro, conforme observado nas Figuras 5.8a), 5.8c) e 5.8d). Os ganhos na CA para altura geopotencial em 500hPa (fig. 5.8c) e fig. 5.8d)) alcançaram valores de 0.22 e 0.17, no quinto dia de previsão, em janeiro e julho, o equivalente a um ganho de 66 e 48 horas na previsão.

A Figura 5.9, a seguir, ilustra a redução no viés nos campos de altura geopotencial em 500hPa e 850hPa, para o hemisfério sul, referente aos experimentos realizados com a assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade (Exp1c), nos meses de janeiro e julho.

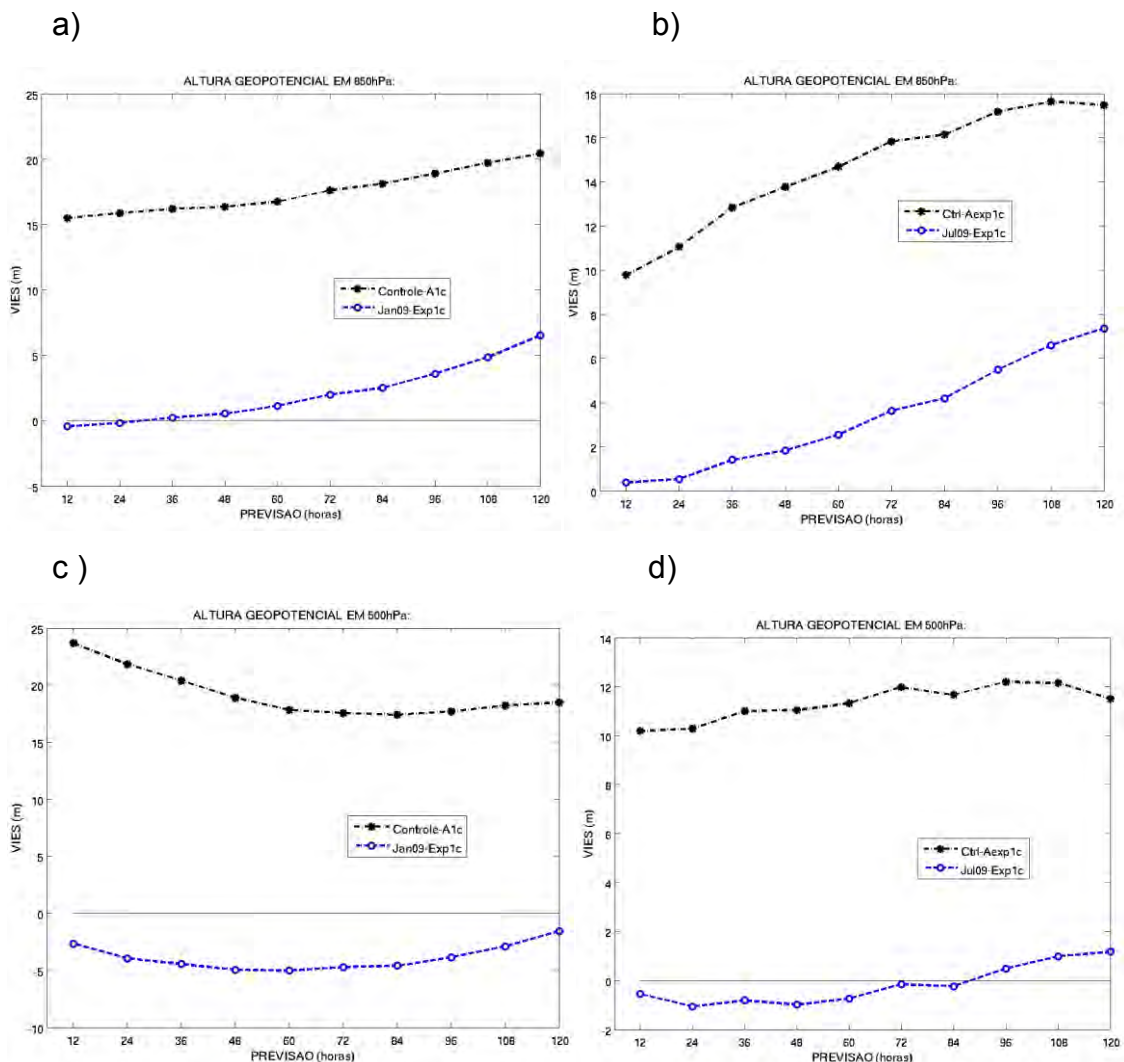


Figura 5.9 – Previsões para o HS com os experimentos de controle (Controle-A1c) e Assimilação RO GNSS de altura geopotencial e umidade nos meses de janeiro (Jan09-Exp1c) e julho (Jul09-Exp1c); a) viés altura geopotencial em 500hPa-JAN09.; b) viés altura geopotencial 850hPa -JAN09; c) viés altura Geopotencial em 500hPa - JUL09 ; d) viés altura geopotencial 850hPa- JUL09.

Os benefícios dos experimentos Exp1c sobre o HS também foram observados nos valores de RMS do vento, umidade relativa e total de água precipitável. Houve uma significativa redução no viés da altura geopotencial, vento e umidade, em todos os níveis analisados. O impacto da assimilação dos perfis RO GNSS se mostrou significativamente maior sobre o hemisfério sul.

5.5 Análise dos experimentos para a América do Sul

A avaliação dos experimentos com a assimilação dos perfis RO GNSS para a América do Sul foi realizada tendo como limites as latitudes 60°S e 10°N, e longitudes de 20°W e 100°W. Nas Figuras 5.10 e 5.11, abaixo, são apresentados os valores da CA e RMS par algumas das variáveis analisadas:

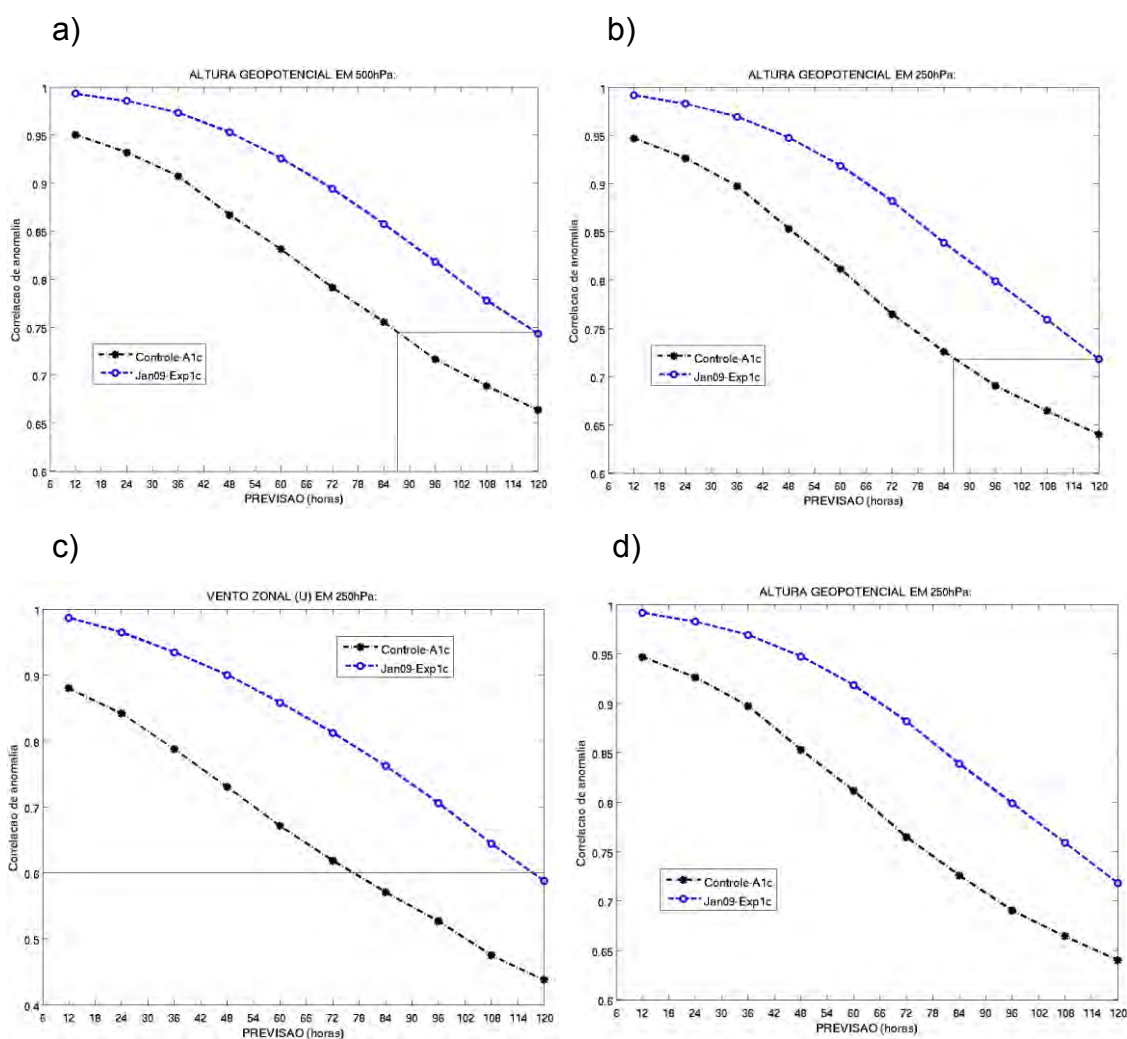


Figura 5.10- Experimentos de controle e assimilação de altura geopotencial e Umidade(Exp1c) para América do Sul, no mês de janeiro; a) CA altura geopotencial em 500hPa ; b) CA altura geopotencial em 250hPa; c) CA vento zonal em 250hPa.; d) CA vento meridional em 250hPa.

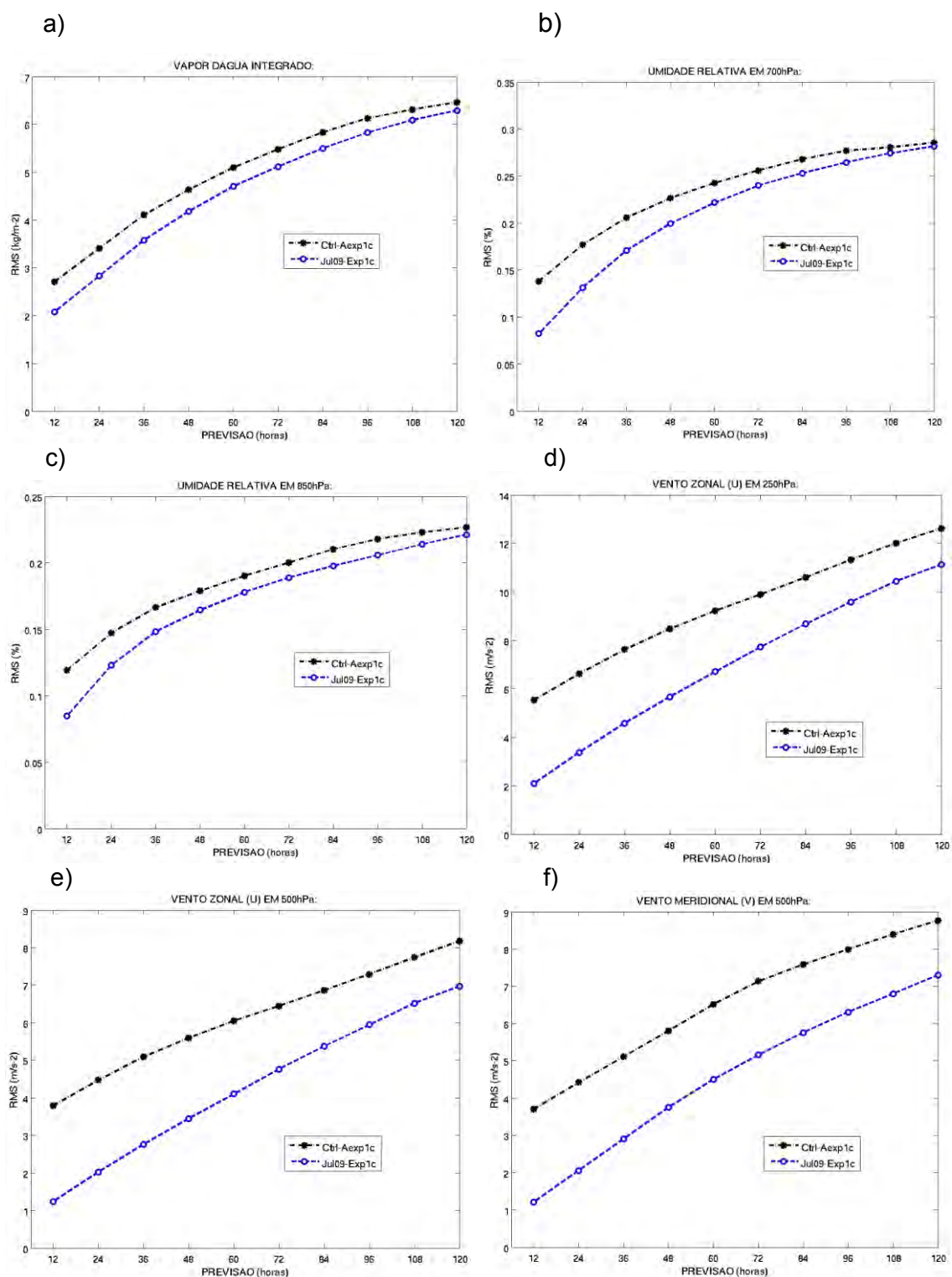


Figura 5.11- Experimentos de controle (Ctrl-Aexp1c) e assimilação de altura geopotencial e umidade(Jul09-Exp1c), no mês de Julho, para a América do Sul; a) RMS Vapor d'água integrado; b) RMS UR 700hPa; c)RMS UR 850hPa; d) RMS vento zonal 250hPa; e) RMS vento zonal 500hPa; f) RMS vento meridional 500hPa.

O impacto da assimilação dos dados de rádio ocultação na América do Sul foi observado nos experimentos de ambos os meses. Os ganhos foram observados em todas as variáveis analisadas e se estenderam a todo período de previsão. No mês de janeiro, os valores da correlação de anomalia para altura geopotencial em 500hPa e 250hPa apresentaram um ganho de 34hs (Figura 5.10, a) e b)). A redução dos valores de RMS foi mais acentuada nas primeiras horas de previsão, como pode ser visto na Figura 5.11.

5.6 Análise dos valores de OMF e OMA

Observação menos “*first guess*” (OMF) e observação menos análise (OMA) descrevem a diferença entre o valor do dado observado e o valor proveniente do “*first guess*” ou análise, para uma determinada variável. Essas informações, no presente trabalho, são empregadas como parâmetros de avaliação dos experimentos de assimilação dos dados RO GNSS em relação aos experimentos de controle. Uma redução nos valores de OMF e OMA traduz-se como uma alteração no “*first guess*” e na análise, respectivamente, de forma a torná-los mais próximos dos campos observados. Para o cálculo dos valores de OMF, a partir das análises dos experimentos de controle e teste, foram desenvolvidos *scripts* descritos em “Operacionalização da Assimilação de Dados GNSS no PSAS” (Souza et al.; 2011). A tabela 5.1, a seguir, apresenta os valores de OMF da altura geopotencial em diferentes níveis de pressão e faixas de latitude. A divisão em faixas de latitude foi adotada buscando uma melhor compreensão do impacto da assimilação e da habilidade de previsão do modelo em diferentes regiões do globo. Os valores apresentados na tabela correspondem aos perfis de altura geopotencial disponíveis e assimilados em todo o globo, tais como dados de radiossondas e satélites, excluindo-se os perfis de rádio ocultação GNSS, bem como os dados rejeitados pelo controle de qualidade. A exclusão dos dados RO GNSS, neste caso, tem como objetivo comparar os valores de OMF do experimento de teste com o experimento de controle, de forma a manter os mesmos tipos de observação em ambos.

Tabela 5.1 – RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, para o mês de janeiro de 2009, para faixas de latitude abrangendo ambos os hemisférios. Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade.

	RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m)								
	DADOS GLOBAIS SEM ROGNSS								
Nível	JAN09-Controle			JAN09-Exp1c			Diferença: (Exp1c-Controle)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	18,43	18,57	19,60	17,03	16,75	17,85	-1,4	-1,82	-1,75
700	17,75	17,73	21,2	16,86	15,68	17,73	-0,89	-2,05	-3,47
500	21,79	21,41	26,25	19,45	16,17	19,52	-2,34	-5,24	-6,73
400	27,61	26,68	30,33	23,02	19,22	22,2	-4,59	-7,46	-8,13
300	35,58	32,25	34,35	29,84	22,77	24,36	-5,74	-9,48	-9,99
250	38,56	34,18	34,75	32,12	23,76	23,91	-6,44	-10,42	-10,84
200	42,58	36,36	34,67	34,12	24,86	22,84	-8,46	-11,5	-11,83
150	43,85	38,72	35,48	33,3	23,13	22,39	-10,55	-15,59	-13,09
100	48,14	43,02	40,1	30,95	24,78	25,57	-17,19	-18,24	-14,53
70	49,4	44,38	49,39	34,94	26,93	30,85	-14,46	-17,45	-18,54
50	50,19	43,05	55,21	39,91	29,06	36,54	-10,28	-13,99	-18,67
30	53,28	47,09	67,86	43,43	35,32	50,63	-9,85	-11,77	-17,23
20	63,36	50,47	85,08	53,56	43,85	71,44	-9,8	-6,62	-13,64
10	68,41	84,93	134,08	66,98	85,48	135,01	-1,43	0,55	0,93
5	142,6	248,68	297,29	168,94	217,23	327,1	26,34	-31,45	29,81
3	66,97	324,97	458,35	62,32	234,22	444,92	-4,65	-90,75	-13,43
2	112,25	417,38	695,19	92,37	259,24	551,78	-19,88	-158,14	-143,41

Analisando a diferença (Exp1c - Controle) na tabela 5.1, é possível observar uma redução nos valores de OMF do experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS, em relação ao controle, em praticamente todos os níveis, e em todas as faixas de latitude. Essa redução reflete o impacto positivo da assimilação dos perfis de rádio ocultação sobre o *first guess*. Observa-se também, de forma geral, valores mais altos de OMF nas latitudes altas (50° a 90°) , sobretudo nos altos níveis, em ambos os experimentos, indicando um maior afastamento do first guess em relação às observações. Tal fato está associado à redução da quantidade de dados disponíveis para assimilação

sobre a região, conforme descrito na seção 4.4. Valores similares foram obtidos para o mês de julho e podem ser visualizados na tabela 5.2 , abaixo.

Tabela 5.2 – RMS dos valores de OMF para altura geopotencial no mês de julho de 2009. Dados globais com a exclusão dos perfis RO GNSS para os experimentos de controle e experimento de assimilação de altura geopotencial e umidade RO GNSS (Exp1c).

	RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m) - DADOS GLOBAIS SEM ROGNSS								
Nível	JUL09-Controle			JUL09-Exp1c			Diferença (Exp1c-Controle)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	16,33	15,24	14,27	16,05	14,69	14	-0,06	-0,72	-6,35
700	16,63	15,7	18,08	16,46	15,38	17,21	-0,07	-0,87	-9,28
500	19,83	17,39	23,74	19,84	17,01	21,78	0,01	-0,38	-1,96
400	21,82	20,35	28,83	21,98	19,96	26,58	0,16	-0,39	-2,25
300	28,01	26,16	35,39	28,26	25,86	33,15	0,25	-0,3	-2,24
250	29,13	28,87	35,9	29,74	28,64	33,34	0,61	-0,23	-2,56
200	30,49	31	32,55	31,26	31,06	30,44	0,77	0,06	-2,11
150	29,85	31,79	31,26	30,44	32,12	29,8	0,59	0,33	-1,46
100	34,57	30,88	32,85	32,79	31,55	31,79	-1,78	0,67	-1,06
70	38,43	26,95	33,28	37,57	27,28	33,99	-0,86	0,33	0,71
50	40,07	28,39	37,02	38,09	28,13	36,79	-1,98	-0,26	-0,23
30	49,03	32,61	42,11	43,95	31,84	40,78	-5,08	-0,77	-1,33
20	56,63	38,44	47,32	50,16	37,08	43,95	-6,47	-1,36	-3,37
10	92,02	62,44	72,77	84,81	60,37	62,07	-7,21	-2,07	-10,7
5	179,61	190,8	250,98	172,38	181,12	190,24	-7,23	-9,68	-60,74
3	93,72	171,6	319,58	86,57	137,46	290,07	-7,15	-34,14	-29,51
2	108,62	181,74	526,79	99,53	149,71	579,19	-9,09	-32,03	52,4

Tabela 5.3 - RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, para o mês de Janeiro de 2009, para faixas de latitude abrangendo o hemisfério sul. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade.

RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m) DADOS DO HEMISFÉRIO SUL SEM ROGNSS									
Nível	JAN09-Controle			JAN09-Exp1c			Diferença: (Exp1c-Controle)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	17,71	17,04	24,16	16,09	14,87	15,11	-1,62	-2,17	-9,5
700	18,13	18,46	30,79	17,04	15,07	18,62	-0,07	-3,39	-12,17
500	22,48	23,49	44,4	18,75	16,4	23,52	-3,73	-7,09	-20,88
400	28,38	29,17	57,26	22,37	18,86	28,84	-6,01	-10,31	-28,42
300	37,25	37,33	71,43	29,5	24,84	32,15	-7,75	-12,49	-39,28
250	40,46	40,31	73,17	31,28	26,9	30,19	-9,18	-13,41	-42,98
200	44,46	42,82	69,54	32,81	28,26	29,57	-11,65	-14,56	-39,97
150	46,58	43,89	65,9	30,54	26,57	19,34	-16,04	-17,32	-46,56
100	49,43	49,07	73,6	31,73	26,06	25,71	-17,7	-23,01	-47,89
70	53,24	50,38	73,36	37,52	28,13	24,5	-15,72	-22,25	-48,86
50	55,95	47,04	77,3	41,33	27,9	24,12	-14,62	-19,14	-53,18
30	56,46	47,54	75,33	47,72	32,91	29,62	-8,74	-14,63	-45,71
20	79,72	46,2	90,7	65,78	39,88	32,33	-13,94	-6,32	-58,37
10	66,68	51,96	80,85	53,94	54,09	45,07	-12,74	2,13	-35,78
5	153,4	185,22	96,7	183,39	196,64	112,57	29,99	11,42	15,87
3	66,95	77,7	136,92	55,93	53,8	110,26	-11,02	-23,9	-26,66
2	117,65	128,48	214,73	91,53	89,88	177,22	-26,12	-38,6	-37,51

A tabela 5.3, acima, apresenta os mesmos parâmetros, porém apenas com os dados para o hemisfério sul (HS). Neste caso, é interessante observar o maior impacto da assimilação dos perfis RO GNSS sobre as altas latitudes do hemisfério sul (Diferença: Exp1c-Ctrl ; 50°S-90°S). Além de reduzir os valores de OMF, em todas as faixas de latitude, o experimento Jan09-Exp1c, em relação ao Jan09-Controle, apresenta uma forte redução na variação latitudinal dos valores de OMF, especialmente na transição para a faixa entre 50° e 90° sul.

A tabela 5.4, a seguir, apresenta uma comparação, entre os experimentos de controle e teste, dos valores de OMF para observações de altura geopotencial provenientes de radiossondagens no hemisfério sul. A análise de OMF,

considerando unicamente as observações de radiossondas, por serem estas uma observação *in situ*, constitui-se como boa referência na avaliação do impacto da assimilação dos dados de rádio ocultação sobre a previsão de curto prazo (*first guess*). O valor médio registrado do número de observações entre os níveis de 850hPa e 100hPa foi de aproximadamente 3200, 1700 e 330, respectivamente, entre as faixas de latitude de 0°-20°S, 20°S-50°S e 50°S-90°S. Em 10hPa esses valores foram reduzidos ao número de 541, 118 e 125 observações.

Tabela 5.4 - RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, proveniente de radiossondagens no HS, para o mês de janeiro de 2009. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de altura geopotencial e umidade

	RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m) DADOS DE RADIOSONDAS NO HEMISFÉRIO SUL								
Nível	JAN09-Controle			JAN09-Exp1c			Diferença: (Exp1c-Controle)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	13,39	16	24,37	11,71	12,85	15,21	-0,88	-3,15	-9,16
700	15,5	17,75	30,89	14,17	14,39	18,52	-1,33	-3,36	-12,37
500	22,81	23,17	44,56	18,51	15,72	23,62	-4,3	-7,45	-20,94
400	29,02	29,13	57,43	22,26	18,34	28,92	-6,76	-10,79	-28,51
300	38,19	37,41	71,62	29,77	24,56	32,04	-8,42	-12,85	-39,58
250	41,58	40,34	73,1	31,68	26,6	29,85	-9,9	-13,74	-43,25
200	45,82	42,81	69,36	33,34	28,12	29,09	-12,48	-14,69	-40,27
150	48,17	43,99	67,61	31,28	26,87	25,47	-16,89	-17,12	-42,14
100	50,61	49,25	73,37	29,47	25,6	24,89	-21,14	-23,65	-48,48
70	53,43	50,54	73,3	33,18	27,12	23,95	-20,25	-23,42	-49,35
50	55,95	47,49	77,35	35,76	28,09	26,48	-20,19	-19,4	-50,87
30	55,82	47,71	75,43	40,47	31,96	29,46	-15,35	-15,75	-45,97
20	79,47	44,75	92,09	64,97	38,47	37	-14,5	-6,28	-55,09
10	75,45	53,96	81,35	71,88	62,6	45,63	-3,57	8,64	-35,72
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Assim como para os dados provenientes de satélites, as observações de radiossondas apresentaram uma significativa redução nos valores de OMF

após a assimilação dos perfis de umidade e altura geopotencial RO GNSS (Diferença: Exp1c – Controle) sobretudo entre as latitudes de 50°S e 90°S.

Resultados semelhantes foram encontrados com os experimentos de julho de 2009. A tabela 5.5, a seguir, contém os valores de OMF das observações de radiossondas, no mês de julho.

Tabela 5.5 – RMS dos valores de OMF para altura geopotencial obtida por radiossondas no mês de julho de 2009, com o experimento de controle e experimento de assimilação de altura geopotencial e umidade RO GNSS (Exp1c).

RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m) - DADOS RADIOSONDA-HS									
Nível	JUL09-Controle			JUL09-Exp1c			Diferença (Exp1c-Controle)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	10,51	12,95	33,1	10,51	11,22	24,65	0	-0,88	-3,15
700	15,68	15,46	42,92	15,93	13,86	30,59	0,25	-1,6	-12,33
500	21,33	23,37	58,04	21,63	18,76	40,65	0,3	-4,61	-17,39
400	24,53	28,68	71,75	24,56	21,55	49,76	0,03	-7,13	-21,99
300	29,68	34,74	77,72	29,68	25,54	51,38	0	-9,2	-26,34
250	29,82	36,11	78,66	29,89	27,03	46,27	0,07	-9,08	-32,39
200	29,98	36,98	74,04	30,47	27,18	43,84	0,49	-9,8	-30,2
150	26,91	36,28	67,57	27,32	26,19	36,13	0,41	-10,09	-31,44
100	31,28	35,11	67,92	29,26	28,67	34,42	-2,02	-6,44	-33,5
70	38,34	32,89	68,74	35,96	28,74	36,69	-2,38	-4,15	-32,05
50	41,69	33,26	76,64	38,18	31,99	44,97	-3,51	-1,27	-31,67
30	47,02	37,27	86,88	41,83	37,02	59,52	-5,19	-0,25	-27,36
20	56,54	48,13	121,89	49,02	49,55	93,05	-7,52	1,42	-28,84
10	117,93	132,12	191,18	103,57	94,23	96,08	-14,36	-37,89	-95,1
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.6 - RMS dos valores de OMF da variável altura geopotencial, proveniente de perfis RO GNSS no HS e HN. JAN09-Exp1c designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e umidade.

	RMS DOS VALORES DE OMF PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m) - DADOS ROGNSS								
Nível	JUL09-Exp1c-HS			JUL09-Exp1c-HN			Diferença: (HN-HS)		
(hPa)	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°	0° - 20°	20° - 50°	50° - 90°
850	25,91	31,91	40,29	22,26	23,4	23,61	-0,06	-0,72	-6,35
700	18,43	25,78	40,81	18,85	21,88	22,59	-0,07	-0,87	-9,28
500	13,67	25,02	45,75	14,87	18	20,54	1,2	-7,02	-25,21
400	13,43	28,46	50,58	14,23	16,52	22,56	0,8	-11,94	-28,02
300	14,68	32,27	53,66	14,63	17,34	25,76	-0,05	-14,93	-27,9
250	14,98	32,24	50,87	14,94	18,06	23,47	-0,04	-14,18	-27,4
200	15,92	29,37	42,9	16,09	17,92	18,35	0,17	-11,45	-24,55
150	18,39	27,35	35,05	19,17	17,21	15,83	0,78	-10,14	-19,22
100	24,85	27,98	36,07	26,16	18,57	17,28	1,31	-9,41	-18,79
70	28,21	29,1	40,05	28,17	24,31	21,07	-0,04	-4,79	-18,98
50	37,37	37,4	52,49	38,3	32,12	26,67	0,93	-5,28	-25,82
30	46,95	45,22	66,1	49,57	41,98	37,57	2,62	-3,24	-28,53
20	66,64	67,41	96,86	71,28	58,39	51,63	4,64	-9,02	-45,23
10	78,44	86,5	105,51	79,49	72,96	68,9	1,05	-13,54	-36,61
5	199,25	241,82	310,53	215,26	204,87	210,47	16,01	-36,95	-100,06
3	129,08	414,11	544,62	122,96	162,4	-	-6,12	-251,71	-

A tabela 5.6, acima, apresenta os valores de OMF exclusivamente para observações RO GNSS de altura geopotencial. Observa-se perfis RO GNSS mais semelhantes ao *first guess* sobre o hemisfério norte. Tal fato pode estar associado a uma melhor previsão de curto prazo em função de uma maior densidade de dados convencionais utilizados na elaboração da análise sobre aquele hemisfério.

Os valores de OMF e OMA para alguns dos experimentos realizados, considerando todas as observações assimiladas podem ser visualizados na tabela 5.7.

Tabela 5.7- RMS dos valores de OMF e OMA da variável altura geopotencial, proveniente de dados globais. Exp1b designa o experimento onde foram assimilados os dados RO GNSS de Altura geopotencial e Exp1c altura geopotencial e umidade.

RMS DOS VALORES DE OMF E OMA PARA ALTURA GEOPOTENCIAL(m)						
DADOS GLOBAIS						
Nível	OMF			OMA		
(hPa)	Jul-Ctrl	Jul-Exp1b	Jan-Exp1c	Jul-Ctrl	Jul-Exp1b	Jan-Exp1c
850	33,1	37,5	26,9	13,1	24,9	25,4
700	36,6	36,1	24,9	19,9	23,5	22,3
500	32,1	37,6	22,7	24,5	24,4	17,5
400	38,2	39,3	24,6	27,3	25,1	18,3
300	44,6	42,1	27,8	30,7	25,9	20,2
250	44,3	42,5	26,4	30,4	25,4	19,5
200	40,8	43,4	23,3	27,6	24,4	17,7
150	41,8	43,8	21,5	29,4	23,2	16,9
100	51,7	44,6	21,5	35,1	22,6	17,9
70	63,8	44,4	23,1	40,8	22,3	19,1
50	74,6	45,6	28,1	46,3	23,3	24,1
30	82,7	49,9	38,5	46,2	27,7	33,9
20	93,3	75,7	56,4	53,1	67,7	48,2
10	107,3	68,3	94,1	72,1	59,3	82,6
5	240,7	208,3	256,7	224,5	208	250,5

6. COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A Rádio Ocultação GNSS tem surgido como uma técnica inovadora e altamente promissora em face à qualidade dos dados por ela obtidos, ao seu baixo custo e a distribuição global das observações. A possibilidade de se obter perfis verticais de temperatura, pressão e umidade, com distribuição global abrangendo oceanos e regiões remotas, vem diretamente ao encontro das necessidades dos Centros de previsão numérica de tempo, na busca por melhores resultados. Tais centros tem aplicado com sucesso a assimilação desses dados em seus modelos de PNT. Seguindo metas semelhantes, o presente trabalho investigou o impacto da assimilação de perfis RO GNSS no sistema global de assimilação de dados PSAS, em operação no CPTEC-INPE. Os dados RO GNSS de 2009 provenientes do COSMIC foram selecionados em função de uma maior qualidade e quantidade de perfis. Para se adequar aos PSAS, foram assimilados perfis de altura geopotencial e razão de mistura nos mesmos níveis do modelo. Foram realizados três experimentos para cada um dos meses de janeiro e julho de 2009, caracterizados pela assimilação de altura geopotencial (Exp1b), assimilação de altura geopotencial e umidade (Exp1c), e assimilação dos dados convencionais como experimento de controle. As análises dos resultados foram divididas por regiões, abrangendo todo o globo, hemisfério norte (HN), hemisfério sul (HS) e América do Sul (AS). As variáveis analisadas foram: vapor d'água integrado, vento zonal, vento meridional, umidade relativa e altura geopotencial, nos níveis de 850 a 250hPa. As principais conclusões, comentários e perspectivas futuras estão descritos neste capítulo.

6.1 Conclusões

A análise das previsões sobre o globo, em ambos os experimentos, apresentou ganhos em todos os níveis de pressão e em todas as variáveis analisadas. Houve redução do viés e dos valores de RMS. Os ganhos na correlação de anomalia, para a variável altura geopotencial em 500hPa, no mês de janeiro, com os experimentos Exp1b e Exp1c, se estenderam a todo período de

previsão, proporcionando um aumento na validade das previsões de 24 e 36 horas, respectivamente.

A assimilação dos perfis RO GNSS de umidade e altura geopotencial simultaneamente (Exp1c) produziu resultados melhores do que aqueles obtidos no experimento de assimilação apenas da altura geopotencial (Exp1b). Comparativamente, o experimento (Exp1c) aumentou a validade da previsão em 12 horas, no mês de janeiro, ao se avaliar a correlação de anomalia da variável altura geopotencial em 500hPa. Para o mês de julho, esse aumento foi de 14 horas. Observou-se também uma redução adicional de 10 a 20 metros nos valores de RMS para o mesmo nível. Os benefícios de se assimilar altura geopotencial e umidade juntos são observados independente do recorte analisado, sendo sensíveis tanto no globo todo, como nas demais regiões analisadas: HN, HS e AS.

Sobre o hemisfério norte, a correlação de anomalia da variável altura geopotencial em 500hPa alcançou um ganho de 12 horas no quinto dia. Em comparação com as previsões para todo o globo, as previsões dos experimentos sobre o hemisfério norte apresentaram menor ganho. Tal fato pode ser atribuído a um menor impacto da assimilação dos perfis RO GNSS sobre esse hemisfério, dada a melhor distribuição da quantidade de dados convencionais em superfície e altitude disponíveis nessa região.

O impacto da assimilação dos dados RO GNSS mostrou-se significativamente maior sobre o hemisfério sul. Os ganhos na correlação de anomalia alcançaram valores de 0.17 a 0.22 para altura geopotencial em 500hPa, nos meses de julho e janeiro, o equivalente a um ganho de 48 e 66 horas na previsão. Ainda sobre o hemisfério sul, observou-se uma redução de até 45 metros nos valores de RMS da altura geopotencial em 500 hPa. Os benefícios da assimilação dos perfis RO GNSS também se estenderam aos campos de vento e umidade.

Sobre a América do Sul, a análise do impacto da assimilação dos perfis RO GNSS mostrou ganhos maiores do que as análises sobre o hemisfério norte, e resultados menos expressivos do que as análises sobre o hemisfério sul. Similar ao que acontece no hemisfério norte, onde há uma maior densidade de dados, na América do Sul, o impacto esperado também não deveria ser superior ao hemisfério sul, composto em sua maior parte por oceanos. Os valores de correlação de anomalia para altura geopotencial em 500hPa sobre a América do Sul tiveram acréscimos de 0.15 e 0.10, em julho e janeiro, respectivamente, proporcionando ganhos de 24hs e 33hs na previsão.

Os maiores benefícios da assimilação de dados RO GNSS foram percebidos sobre regiões com maior escassez de dados. Sobre o hemisfério sul, por exemplo, entre as latitudes de 50°S e 90°S, uma análise da quantidade de perfis verticais assimilados mostrou que os dados RO GNSS aumentaram em até dez vezes a quantidade de perfis verticais disponíveis para assimilação.

A redução dos valores de OMF, após a inclusão da assimilação dos perfis RO GNSS, aponta o impacto positivo desses dados na elaboração de uma melhor previsão de curto prazo (*first guess*) e melhor análise. A análise comparativa dos valores de OMF, realizada separadamente para as observações de radiossonda, medidas *in situ*, mostrou que a assimilação dos perfis RO GNSS produziu uma aproximação do *first guess* com o campo das observações das radiossondas. Ao se considerar o conjunto das diferentes observações distribuídas sobre o globo, constatou-se uma redução nos valores de OMF após a assimilação dos perfis RO GNSS. As reduções abrangeram diferentes faixas de latitude e foram mais significativas nas altas latitudes do hemisfério sul, mostrando a capacidade da assimilação dos perfis RO GNSS de corrigir o negativo impacto provocado pela deficiência de dados sobre a região.

Os dados de rádio ocultação GNSS se mostraram representativos em quantidade, distribuição espacial e temporal, possibilitando ganhos significativos nas previsões do GPSAS sobre todo o globo.

6.2 Perspectivas futuras

Os atuais avanços e as projeções, em relação à quantidade e qualidade de perfis atmosféricos distribuídos ao redor do globo, revelam um futuro promissor para a rádio ocultação GNSS e seu impacto nos modelos numéricos de previsão de tempo.

O GALILEO, GNSS Europeu em desenvolvimento, caracteriza-se como um sistema independente sob o controle civil e interoperável com o GPS e o GLONASS. O Compass ou Beidou-2, GNSS chinês em desenvolvimento, usa uma estrutura de sinal similar aos outros sistemas GNSS e compartilha frequências próximas aos conhecidos GPS, GALILEO e GLONASS. A adição de sistemas transmitindo na mesma banda de frequência empolga os usuários do sistema GNSS e tem um enorme potencial para introduzir uma rica e densa rede de dados globalmente distribuídos, com benefícios ainda maiores para a previsão numérica de tempo.

Adicionalmente, o desenvolvimento de novas técnicas de rádio ocultação tem trazido grandes avanços na obtenção de perfis atmosféricos. Estudos tem demonstrado o sucesso do emprego da rádio ocultação entre satélites LEO na obtenção de perfis de umidade (Lohmann et al., 2003). A obtenção direta dessa variável por meio da RO GNSS requer uma informação *a priori* do estado da atmosfera a fim de se distinguir as contribuições do vapor d'água e da temperatura na alteração do sinal. Com o intuito de se evitar a utilização de uma informação externa, como a de modelos de PNT comumente empregadas, um sistema mais sofisticado tem sido proposto onde a sondagem é realizada com a adição da rádio ocultação LEO-LEO (Kursinski et al., 2002; Eriksson et al., 2003). Em conjunto com a rádio ocultação GNSS, uma frequência próxima a linha de absorção do vapor d'água, aplicada no sinal entre os satélites LEO, permite a obtenção da contribuição da umidade. Essa nova técnica vem ao encontro da crescente evolução da obtenção de dados por rádio ocultação e

tem o potencial de proporcionar sondagens na baixa troposfera com alta acurácia para os perfis de pressão temperatura e umidade.

Considerando a futura operacionalização do LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter) como o novo sistema de assimilação de dados do CPTEC-INPE, outras alternativas de assimilação dos perfis RO GNSS, tais como a assimilação direta dos dados de refratividade e ângulo de curvatura, tornam-se possíveis. Uma das principais vantagens do LETKF em relação ao PSAS, sistema atualmente empregado, consiste na possibilidade de se assimilar diferentes tipos de observações por meio do emprego de um operador específico. O operador tem a função de converter as variáveis prognósticas do modelo de previsão nas variáveis observadas, permitindo assim a assimilação direta de diferentes observações. O projeto europeu, GRAS-SAF (*GNSS Receiver for Atmospheric Sounding - Satellite Application Facility*), disponibiliza um software denominado ROPP que apresenta rotinas com algoritmos que podem ser adaptados aos sistemas de assimilação dos modelos de previsão. Um operador “*Forward Model*”, componente do ROPP, computa perfis de refratividade das variáveis de estado, P, T e q, do “*background*”, permitindo a comparação com as observações de refratividade da rádio ocultação. O mesmo procedimento pode ser aplicado para com as observações do ângulo de curvatura. O desenvolvimento desse operador para o LETKF, utilizando o ROPP, encontra-se em desenvolvimento no CPTEC, o qual permitirá que tanto refratividades como ângulo de ocultação sejam utilizados (Sapucci et al. 2010).

A assimilação da refratividade, bem como do ângulo de curvatura, apresenta-se como uma alternativa superior a assimilação dos valores de temperatura e umidade, não necessitando de fonte externa de dados. Com intuito de se evitar erros em função da assunção de simetria esférica nos baixos níveis, tem-se a opção de se assimilar os perfis de refratividade acima de quatro ou cinco quilômetros, a exemplo da estratégia adotada pelo NCEP (Cucurull et al., 2006). Ou, ainda, utilizar-se do controle de qualidade descrito por Poli et al. (2009),

empregado no presente trabalho, onde gradientes anômalos são identificados possibilitando a exclusão dos dados de refratividade tidos como suspeitos. Considerando as diferenças em relação à quantidade de dados disponíveis para o hemisfério norte e hemisfério sul, parece razoável, uma vez que se tenha maior interesse nas previsões sobre o HS, optar pela assimilação dos dados nos baixos níveis com o emprego do controle de qualidade. Herdies et al.(2007) descreve a importância dos dados não convencionais na melhora da performance das previsões para o HS geradas como GPSAS.

Uma segunda estratégia razoável, (Kuo et al.,2000), está em assimilar ângulos de curvatura nos baixos níveis (até 10 km) e assimilar dados de refratividade nos altos níveis (acima de 10 km), devido as seguintes considerações: a) Sobre regiões com gradiente horizontal de refratividade significativo (em geral na baixa troposfera), a suposição de simetria esférica local não é válida. De maneira que tratar a refratividade GPS como sendo a refratividade local pode levar a erros significativos. b) A assimilação do ângulo de curvatura apresenta um custo computacional de uma ordem de magnitude acima da assimilação da refratividade, contudo não é afetada por eventual existência de gradientes horizontais de refratividade. c) Nas regiões próximas ao topo do modelo, os dados de ângulo de curvatura não fornecem informações úteis sobre a refratividade atmosférica para o modelo. d) Entre 10 e 30 km, tratar a refratividade GPS com sendo a refratividade local não introduz erros significativos.

Todas essas considerações corroboram para o futuro promissor da rádio ocultação GNSS e seu grande impacto nos modelos numéricos de previsão de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBER, C.; WARE, R. H.; ROCKEN, C.; BRAUN, J. J. Obtaining single path delays from GPS double differences. **Geophysical Research Letters**, v.27, n.7, p. 2661-2664, 2000.

ANDREOLI, V.; FERREIRA, S.H.; SAPUCCI, L.F.; SOUZA, R.F.; MENDONÇA, R. B.; HERDIES, D. L.; ARAVEQUIA, J.A. Contribuição de diversos sistemas de observação na previsão de tempo no CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia** v.23, n.2, p. 219-238, 2008. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862008000200009>>. Acessado em 18 fev 2012.

ANTHES, R. A.; BERNHARDT, P.A.; CHEN, Y.; CUCURULL, L.; DYMOND, K. F.; ECTOR, D.; HEALY, S. B.; HO, S.-P.; HUNT, D. C.; KUO, Y.-H.; LIU, H. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission early results. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.89, p. 313-333, 2008.

BONATTI, J. P. Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC. In: **Climanálise Especial**. Edição Comemorativa de 10 anos. Cachoeira Paulista, SP: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 1996. cap. 26, p. 198–202.

BONIFACE, K.; DUCROCQ, V.; JAUBERT, G.; YAN, X.; MANSSON, F.; BROUSSEAU, P.; CHÉRY, J.; DOERFLINGER, E.; CHAMPOLLION, C. Impact of high-resolution of data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecast. **Annales Geophysicae**, v.27, p.2739–2753, 2009.

BORN, M.; WOLF, E. **Principles of optics**: electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light, 6. ed. New York: Pergamon Press, 1980.

BUONTEMPO, C.; JUPP, A.; RENNIE, M. Operational NWP assimilation of GPS radio occultation data. **Atmospheric Science Letters**, v. 9: p.129-133, 2008.

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; PRAKKI, S.; NOBRE, C. A.; TROSHNIKOV, I.; CAMARGO JUNIOR, H.; CASTRO, C.; SANCHES, M. B.; SAMPAIO, G. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. **Journal of Climate**, V.15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.

CINTRA, R. S. C. **Implementação do sistema estatístico de assimilação de dados em espaço físico para o modelo global do CPTEC**. 2008. 184 p. (INPE-14223-TDI/1124). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/08.31.13.48>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

COHN, E.; DA SILVA, A.; GUO, J.; SIENKIEWICZ, M.; LAMICH, D. Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. **Monthly Weather Review**, v.126, p.2913–2926, 1998.

CUCURULL, L.; DERBER, C. J.; PURSER, R.J. Assimilation of global positioning system radio occultation observations into NCEP's global data assimilation system. **Monthly Weather Review**, v.135, p.3174-3193, 2006.

CUCURULL, L.; DERBER, C. J. Operational implementation of COSMIC observations into NCEP's global data assimilation system. **Weather and Forecasting**, v. 23, p.702-711, 2008.

CUCURULL, L. Global Positioning System (GPS) Radio Occultation (RO) Data Assimilation. In: Summer Colloquium on Data Assimilation, 2009, Stevenson, Washington. **Proceedings...** Stevenson, WA: JCSDA, 2009.

DEBLONDE, G.; MAHFOUF, J.F.; ANSELMO, D. One-dimensional variational data assimilation of SSM/I observations in many atmospheres at MSC. **Monthly Weather Review**, v.135:1, p.152-172, 2006.

DOVIAK, D.J.; ZRNIC, D. S. **Doppler radar and weather observations**. Orlando: Academic Press, 1984.

ERIKSSON, P., JIMENEZ, C., MURTAGH, D., ELGERED, G., KUHN, T. AND BUEHLER, S. Measurement of tropospheric/stratospheric transmission at 10–35 GHz for H₂O retrieval in low earth orbiting satellite links. **Radio Science**, v.38(4), 8069, 2003.

FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V. R.; KLIORÉ, A. J. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. **Astronomical Journal**, v.76, p.123- 140, 1971.

GLEASON, S.; GEBRE-EGZIABHER, D. **GNSS applications and methods**. Artech House, p.491, 2009. ISBN-13: 978-1-59693-329-3. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=juXAE3SHQroC&printsec=frontcover&dq=GNSS&hl=pt-BR&sa=X&ei=6eQ2T47VCI-ftweZmayZAg&ved=0CEMQ6AE_wA#v=onepage&q=GNSS&f=false>. Acesso em 10 fev 2012.

HAJJ, G. A.; KURSINSKI, E. R.; ROMANS, L. J.; BERTIGER, W. I.; LEROY, S. S.; A technical description of atmospheric sounding by GPS occultations, **Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics**, v.64, p.451-469, 2002.

HEALY, S. Operational assimilations of GPS radio occultation measurements at ECMWF. **ECMWF Newsletter**, n.111, Spring 2007.

HEISKANEN, W. A. & MORITZ, H. **Physical Geodesy**. San Francisco: Freeman, 1967.

HERDIES, D.L.; ARAVÉQUIA, J.A.; FERREIRA, S.H.S.; ANDREOLI, R.V.; SAPUCCI, L.F.; MATTOS, J.G.Z. **A assimilação de dados no CPTEC/INPE**. São José dos Campos: INPE, 2007. (INPE ePrint: [Sid.inpe.br/mtc-m17@80 / 2007/09.03.13.27 v.1 2007-09-04](http://sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/09.03.13.27.v.1.2007-09-04)). Disponível em: <http://assimila.cptec.inpe.br/~rassmla/pubs/pub_r09.pdf >Acesso em 10 fev 2012.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGA, H. ; WASLE,E. **GNSS Global Navigation Satellite Systems**. Springer-Verlay Wien, p.501, 2008. ISBN: 978-3-211-73012-6. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Np7y43HU_m8C&oi=fnd&pg=PR20&dq=GNSS+&ots=FdpHaZNR95&sig=vkC5RiVhcksCo1ua5tlyfZfnxyw#v=onepage&q=GNSS&f=false> Acesso em 10 fev 2012.

HOLZSCHUH, M. L.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. **Avaliação de perfis atmosféricos de rádio-ocultação GPS do Satélite Champ sobre a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2008. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/10.28.12.16). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/10.28.12.16>>. Acesso em: 20 abr. 2010.

KUO,Y.-H.; SOKOLOVSKIY, S.; ANTHES, R.A.; VANDENBERGHE, F. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. **Special Issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science**, v.11(1), p. 157-186, March 2000.

KUO, Y.-H.; ZOU, X.; HUANG, W. The impact of global positioning system data on the prediction of an extra tropical cyclone: An observing system simulation experiment, **Journal of Dynamic Atmosphere and Ocean**, 27(1-4), p.439-470, 1997.

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** , v.271, p.1107-1110, 1996.

KURSINSKI, E.R.; HAJJ, G. A.; SCHOFIELD, J.T.; LINFIELD, R.P.; HARDY, K. R. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, 102, 23429-23465, 1997.

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; LEROY, S. S.; HERMAN, B. The GPS radio occultation technique. **TAO**, v.11, n.1,p. 53-114, 2000.

KURSINSKI, E. R., S. SYNDERGAARD, D. FLITTNER, D. FENG, G. HAJJ, B. HERMAN, D. WARD, AND T. YUNCK, A microwave occultation observing system optimized to characterize atmospheric water, temperature and geopotential via absorption, **JTECH**, in press, 2002a.

KURSINSKI, E. R., D. FLITTNER, B. HERMAN, D. FENG, S. SYNDERGAARD, AND D. WARD. An active microwave limb sounder for profiling water vapor, ozone, temperature, geopotential of pressure surfaces and clouds. In: NASA's Earth System Technology Conference, 2002b, Pasadena, California. **Proceedings...** Pasadena, CA: ESTC, 2002.

LEROY, S. S., Measurement of geopotential heights by GPS radio occultation. **Journal of Geophysical Research**., 102, 6971-6986, 1997.

LIU, Y.-A; WANG, C.; Yeh, T. Impact of surface meteorological measurements on GPS height determination. **Geophysical Research Letters**., 35, L23809, 2008.

LIU, H.; ZOU, X.; SHAO, H.; ANTHES, R.; CHANG, J.; TSENG, J.; WANG, B. Impact of 837 GPS/MET bending angles on assimilation and forecasts for the period June 20-30, 1995. **Journal of Geophysical Research**. 106: 31, p.771-786, 2001.

LOHMANN, M.S., A.S. JENSEN, H.-H. BENZON, AND A.S. NIELSEN. Radio occultation retrieval of atmospheric absorption based on FSI. In: Scientific Report 03-20, 2003, Danish Meteorological Institute, Copenhagen. **Proceedings...** Danish Meteorological Institute, Copenhagen: Sci. Rep., 2003.

LORENC, A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. 112:1177–1194, 1986.

MAHONEY, M. J. A Discussion of various measures of altitude. Jet Propulsion Laboratory NASA, 2001. Disponível em: <<http://mtp.jpl.nasa.gov/notes/altitude/altitude.html>> , Acessado em 20 de abril de 2010.

MCDONALD, K.; HEGARTY, C. Post-Modernization GPS Performance Capabilities. In: Institute of Navigation 56th Annual Meeting, 26-28 June 2000, San Diego, California. **Proceedings...** San Diego, CA: ION, 2000.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Developement of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, **Rev. Geophys. Space Phys.**, v.20, p.851-875, 1982.

NUTTER, P. A.; MULLEN, S. L.; BAUMHEFNER, D.P. The impact of initial condition uncertainty on numerical simulations of blocking. **Monthly Weather Review**, v.126, 2482–2502; 1998.

POLI, P.; JOINER, J. **First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies**: Assimilation Experiments of One-dimensional Variational Analyses with GPS/MET Refractivity, p. 515-520, Ed. Springer, New York, 2003.

POLI, P.; MOLL, P.; PUECH, D.; RABIER, F.; HEALY, S. Quality control, error analysis, and impact assessment of FORMOSAT-3/COSMIC in numerical weather prediction. **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, v.20, n.1, p.101-113, 2009.

RABIER, F.; Klinker, E.; Courtier, P.; Hollingsworth, A. Sensitivity of forecast errors to initial conditions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.122, p.121–150, 1996.

RENNIE, M. P. The impact of GPS radio occultation assimilation at the Met Office. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.136 (a), n.646, p. 116-131, 2010.

ROCKEN, C.; ANTHES, R.; EXNER, M.; HUNT, D.; SOKOLOVSKIY, S.; WARE, R.; GORBUNOV, R.; SCHREINER, W.; FENG, D.; HERMAN, B.; KUO, Y.-H.; ZOU, X. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.102(D25), 29849-29866, 1997.

RODGERS, C. D., Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. **Reviews of Geophysics Space Phys.**, v.144, p.609–624, 1976.

RODGERS, C. D., Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.95, 5587–5595, 1990.

RODGERS, C. D. **Inverse Methods for Atmospheric Sounding**: Theory and Practice, Ed. World Scientific. Singapore, 2000.

SHUANGGEN, J.; FENG, G.P; GLEASON, S. Remote sensing using GNSS signals: current status and future directions . **Advances in Space Research**, v.47(10), p.1645-1653, 2011.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ADAMS, D. K.; ROSA, G. P. S.; SCHUBERT, D. V.; VITORELO, I. **Evolução do GNSS Meteorologia no Brasil Beneficiando a Previsão Numérica de Tempo sobre a América do Sul**. São José dos Campos: **INPE**, 2010. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.16.17.36). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/384AGKL>>. Acessado em : 18 fev 2012.

SAPUCCI, L. F.; HERDIES, D. L.; ANDREOLI, R.V.; MATTOS, J. G.; ARAVEQUIA, J. A. Os últimos avanços na previsibilidade nos campos de umidade nos sistema global de assimilação de dados e previsão numérica de tempo do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p295-310, fev 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n3/a02v25n3.pdf>> Acessado em : 18 fev 2012.

SOUZA, D. S. V.; SAPUCCI, L. F.; CERQUEIRA, F. S. **Operacionalização da assimilação de dados GNSS no PSAS**: Parte I. São José dos Campos: INPE, 2011. v. 1, 78 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.30.12.48-NTC). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39E2M5L>>. Acessado em: 13 abril 2011.

TIEDTKE, M. The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. In: ECMWF Workshop on Convection in Large-Scale Models, 1983, Reading, England. **Proceedings...** Reading, England: ECMWF, 1983.

WEE, T.-K.; KUO, Y.-H. Impact of a digital filter as a weak constraint in MM5 4DVAR. **Monthly Weather Review**, v.132, p. 543-559, 2004.

WICKERT, J.; GALAS, R.; SCHMIDT, T.; BEYERLE, G.; REIGBER, C.; FORSTE, C.; RAMTSCHL, M. Atmospheric sounding with CHAMP: GPS ground station data for occultation processing. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.29, p. 267-275, 2004.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; PHILPOT, W. D. Small-scale climate maps: A sensitivity analysis of some common assumptions associated with grid-point interpolation and contouring. **The American Cartographer**, v.12, p. 5-16, 1985a.

VOROB'EV, V. V.; KRASIL'NIKOVA, T. G. Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system. **Physics of the Atmosphere and Ocean**, v.29, p. 602-609, 1994.

ZHEN-JIE, H.; PENG, G.; MIN, L.; CHENG, H. One-dimensional variational retrieval of refractivity profiles by GPS occultation. **Chinese Astronomy and Astrophysics**, v.30, p. 330-341, 2006.

ZOU, X.; VANDENBERGHE, F.; WANG, B.; GORBUNOV, M. E.; KUO, Y.-H.; SOKOLOVSKIY, S.; CHANG, J. C.; SELA, J. G.; ANTHES, A. A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. D18, p. 22301-22318, 1999.

ANEXO A – ESTRUTURA DOS PERFIS COSMIC 1DVAR

Name Template:

PUB/MISSION/level2/wetPrf/YYYY.DDD/wetPrf_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV_nc

DDD	Day of year
GGG	GNSS id (G28 = GPS satellite 28)
HH	Hour
IIII	Mission ID (CHAM, SACC, CO01-06, GPSM, etc)
LLL	LEO number (1-6 for COSMIC)
MISSION	Mission ID (eight characters or less--champ, champtr, sacc, sacctst, etc)
MM	Minute
PUB	Base directory for the pub hierarchy
SSSS	Subtype (an ID which tells the command options used in generating this file)
VVVV	Version (an ID which tells the version of all codes using in generating thie file)
YYYY	Year

■

“An atmospheric occultation profile with moisture information included. Gridded analysis or short-term forecast is used to separate the pressure, temperature and moisture contributions to refractivity. This file is interpolated to 100 meter height levels.”

Global Data

■

1.1.1 **start_time**

- **Description:** Starting time for the occultation
- **Data Type:** double(8)
- **Units:** GPS seconds

1.1.2 **stop_time**

- **Description:** Ending time for the occultation
- **Data Type:** double(8)
- **Units:** GPS seconds

1.1.3 **fileStamp**

- **Description:** The complete ID for this occultation (IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG).
- **Data Type:** char

1.1.4 **lat**

- **Description:** Latitude of perigee point at occultation point
- **Data Type:** double(8)
- **Units:** deg
- **Valid Range:** -90, 90

1.1.5 **lon**

- **Description:** Longitude of perigee point at occultation point
- **Data Type:** double(8)
- **Units:** deg

- **Valid Range:** -180, 180
- 1.1.6 ancMet_type**
- **Description:** Six character CDAAC file type for the gridded data type used in moisture computation
 - **Data Type:** char(6)
- 1.1.7 fiducial_id**
- **Description:** Four character IGS abbreviation for the fiducial station used for double differencing
 - **Data Type:** char(4)
- 1.1.8 bad**
- **Description:** Badness flag. 1 = Profile flunked quality control, 0 = Profile passed QC
 - **Data Type:** int
- 1.1.9 errstr**
- **Description:** Error string. If bad = 1, contains the description of the problem found, else contains the null string
 - **Data Type:** string

Profile Data

■

- 1.1.10 Pres**
- **Description:** pressure level
 - **Data Type:** float
 - **Units:** mb
 - **Valid Range:** 0, 1200
 - **Missing Value:** -999
- 1.1.11 Vp**
- **Description:** H₂O vapor pressure
 - **Data Type:** float
 - **Units:** mb
 - **Valid Range:** 0, 60
 - **Missing Value:** -999
- 1.1.12 Temp**
- **Description:** temperature
 - **Data Type:** float
 - **Units:** C
 - **Valid Range:** -150, 100
 - **Missing Value:** -999

1.1.13 **MSL_alt**

- **Description:**Mean Sea Level geometric height
- **Data Type:** float
- **Units:** km
- **Valid Range:** -2, 120
- **Missing Value:** -999

1.1.14 **Lon**

- **Description:**longitude, -180 to 180 east
- **Data Type:** float
- **Units:** deg
- **Valid Range:** -180, 180
- **Missing Value:** -999

1.1.15 **Lat**

- **Description:**latitude, -90 to 90 north
- **Data Type:** float
- **Units:** deg
- **Valid Range:** -90, 90
- **Missing Value:** -999

1.1.16 **Ref**

- **Description:**Analyzed refractivity, consistent with Temp, Vp, and Pres
- **Data Type:** float
- **Units:** N
- **Valid Range:** 0, 500
- **Missing Value:** -999

1.1.17 **Ref_obs**

1.1.18 Description:**Observed refractivity, interpolated from the atmPrf file**

- **Data Type:** float
- **Units:** N
- **Valid Range:** 0, 500
- **Missing Value:** -999

