



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.03.10.32-TDI

## ASSIMILAÇÃO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GPS NO MODELO GLOBAL DE PNT DO CPTEC

Ivette Hernández Baños

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelo Dr.  
Luiz Fernando Sapucci, aprovada  
em 20 de fevereiro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NADQ2E>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

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

### **Presidente:**

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

### **Membros:**

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

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

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

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

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

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

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

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.03.10.32-TDI

## ASSIMILAÇÃO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GPS NO MODELO GLOBAL DE PNT DO CPTEC

Ivette Hernández Baños

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelo Dr.  
Luiz Fernando Sapucci, aprovada  
em 20 de fevereiro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NADQ2E>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Baños, Ivette Hernández.  
H43a      Assimilação de perfis de rádio ocultação GPS no modelo global de PNT do CPTEC / Ivette Hernández Baños. – São José dos Campos : INPE, 2017.  
             xxviii + 116 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.03.10.32-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.  
Orientador : Dr. Luiz Fernando Sapucci.

1. Rádio ocultação GPS. 2. Ângulo de curvatura.  
3. Assimilação de dados. 4. Previsão numérica do tempo.  
5. Satélite MetOp-B. I.Título.

CDU 551.509.313

---



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

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

Aluno (a): **Ivette Hernández Baños**

Título: "ASSIMILAÇÃO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GPS NO MODELO GLOBAL DE PNT DO CPTEC".

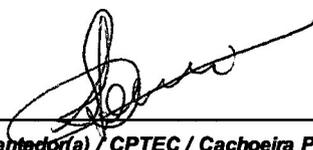
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Meteorologia**

Dr. José Antonio Aravéquia



\_\_\_\_\_  
**Presidente / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP**

Dr. Luiz Fernando Sapucci



\_\_\_\_\_  
**Orientador(a) / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP**

Dr. Cristiano Max Wjasse

\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP**

Dr. Leonardo de Castro de Oliveira



\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / IME / Rio de Janeiro - RJ**

**Este trabalho foi aprovado por:**

**maioria simples**

**unanimidade**

**São José dos Campos, 20 de fevereiro de 2017**



*“Quanto mais aumenta o nosso conhecimento, mais evidente fica  
nossa ignorância”.*

JOHN F. KENNEDY



*A meus pais, avós e irmãos*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cada dia vivido, cada lição aprendida, cada pessoa conhecida e, mais que tudo, por ter-me fortalecido e sustentado durante esses dois anos de estudo no Brasil.

O meu maior agradecimento é para minha família pelo apoio incondicional. Desde pequena ter-la do meu lado foi a benção maior, nada se compara.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilidade de todos os recursos computacionais e os suportes necessários para a realização desta pesquisa.

Ao meu orientador, Dr. Luiz Fernando Sapucci, por ter-me guiado e acompanhado nesse maravilhoso mundo da pesquisa, por ter-me apoiado e incentivado, pela paciência e compreensão, e mais que tudo pela amizade construída durante esse tempo.

Aos integrantes do grupo encarregado da realização das atividades de assimilação de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, por sempre abrirem as portas e ajudar-me em tudo o que precisei, especialmente a Bruna Silveira, Lucas Amarante, Carlos Bastarz, João Gerd, Fábio Diniz e Eduardo Khamis.

Ao professor e Coordenador do Curso, Dr. Dirceu Luis Herdies, pela gentileza, conselhos e o apoio. Aos demais professores do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelos conhecimentos transmitidos.

Aos pesquisadores da Divisão de Modelagem e Desenvolvimento, José Paulo Bonatti e Paulo Yoshio Kubota, pelas produtivas discussões.

Aos meus colegas e amigos da turma do Mestrado e Doutorado que começamos juntos em 2015, pela paciência e acolhimento desde o primeiro momento quando não sabia falar português, por fazer-me sentir como em casa. Foi muito especial conhecer a todos.

A todos os que de uma forma ou outra contribuíram no meu crescimento tanto profissional quanto pessoal.

A todos, o meu mais sincero agradecimento. Obrigada!



## RESUMO

A técnica baseada na rádio ocultação dos sinais do sistema global americano de navegação por satélites (GPS, acrônimo do inglês *Global Positioning System*), permite obtenção de informações valiosas sobre o estado da atmosfera através de perfis verticais obtidos em diferentes níveis de processamento. Estudos sobre o impacto da assimilação desses perfis em modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) tem demonstrado a contribuição dos mesmos na melhoria das condições iniciais e, conseqüentemente, nas previsões geradas. Entre os três níveis de processamento dos dados de rádio ocultação GPS disponíveis atualmente para a assimilação, o CPTEC já tem explorado relativamente bem os perfis recuperados de temperatura, umidade e de refratividade, mas ainda não foram assimilados nesse centro os perfis do ângulo de curvatura, e diversas questões ainda estão em aberto sobre o potencial desses dados a ser explorado para a melhoria da qualidade dos produtos da PNT desse centro. Além disso, a ampliação no número de satélites LEO dedicados para a rádio ocultação é frequente, em especial nos próximos anos com os recursos da iniciativa privada no setor de meteorologia por satélite. Assim, um outro ponto relevante é avaliar o impacto de novos satélites de rádio ocultação na assimilação operacional de dados praticada no centro. Esse é o caso do satélite MetOp-B o qual constitui o principal satélite meteorológico operacional em órbita polar da Europa. Assim sendo o objetivo principal da presente pesquisa é procurar formas de otimizar o impacto dos dados de rádio ocultação GPS no sistema de PNT do CPTEC, através da ampliação da base de dados e uso de dados de ângulo de curvatura ao invés de dados de refratividade. Para atingir esse objetivo diversos experimentos foram realizados utilizando o sistema de assimilação GSI acoplado no Modelo Global do CPTEC, nos quais foram testadas a inclusão adicional dos dados de rádio ocultação do MetOp-B e modificado o tipo de observação utilizada ao testar os perfis do ângulo de curvatura em comparação com os perfis de refratividade. Os resultados indicaram que a inclusão de fontes adicionais de dados, como o satélite MetOp-B, impacta positivamente na qualidade das análises e previsões, revelando que esse tipo de dado ainda está longe de ser redundante e merece ainda ampliação desse sistema de observação. No que se refere ao uso de dados de ângulo de curvatura os resultados indicaram que, mesmo com as limitações do modelo em caracterizar a atmosfera nos altos níveis, benefícios foram alcançados com o uso desse tipo de dado em comparação aos obtidos com a refratividade. O maior ganho foi no aumento significativo do número de dados assimilados, em especial nos altos níveis da atmosfera. Os resultados reportados nessa pesquisa são relevantes para a modelagem do CPTEC, pois dão indicações claras da melhoria nos resultados obtidas com o melhor uso dos dados de rádio ocultação GPS, os quais podem orientar as práticas na assimilação de dados no cotidiano operacional.

Palavras-chave: Rádio ocultação GPS. Ângulo de curvatura. Assimilação de dados. Previsão Numérica de Tempo. Satélite MetOp-B.



# ASSIMILATION OF GPS RADIO OCCULTATION PROFILES INTO THE CPTEC NWP GLOBAL MODEL

## ABSTRACT

The Global Positioning System (GPS) radio occultation (RO) technique allows to obtain valuable information about the state of the atmosphere through vertical profiles obtained in various processing levels. Many studies assessing the impact of assimilating these profiles in Numerical Weather Prediction (NWP) models have demonstrated its contribution improving the initial conditions and thus, the forecasts generated. Between the three available processing levels of GPS RO observations, in the CPTEC have been explored relatively well the retrieved temperature, humidity and refractivity profiles, but still have not been assimilated the bending angle profiles. Following this, there are some open questions about the potential of those data improving the quality of the NWP's products. Also, a continuous increase of the number of low orbit satellites dedicated to GPS RO became frequent, specially in the next years with findings from the private sector in the satellite meteorology area. Therefore, another relevant point is evaluate the impact of adding news satellites for GPS RO in the operational assimilation performed at the CPTEC. The MetOp-B, which is the principal meteorological satellite from Europe is one of these new satellites, that has not yet been explored in the data assimilation performed in the center. In order to answer these questions, the present study aims to search ways to optimize the impact of GPS RO data on the NWP's system of the CPTEC, through the increase of the database used for the assimilation process and the use of bending angle instead refractivity profiles data. To achieve this goal, several numeric experiments were performed using the assimilation system GSI coupled with the Global Model of the CPTEC. In the experiments were tested the additional inclusion of GPS RO from the MetOp-B satellite and was modified the observation type used, that is, bending angles in comparison with refractivity profiles. The results indicated that the inclusion of new data sources, like the MetOp-B satellite, impacts positively in the quality of the analyses and forecasts, revealing that this data type is still far away of be redundant and deserves the increase of this observation system. On the other hand, the results about the use of bending angle showed that even with the model limitations characterizing the higher levels of the atmosphere, benefits were achieved using this data when comparing with the results obtained assimilating refractivity profiles. The highest gain was the significant increase of the assimilated data specially in higher levels of the atmosphere. The results reported here are meaningful for the modelling at the CPTEC and give clear indications about the improvements in the results attained to the best use of GPS RO data, which can guide the daily operational assimilation.

Keywords: GPS radio occultation. Bending angle. Data assimilation. Numerical Weather Forecasting. MetOp-B satellite.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Esquema de uma ocultação do sinal emitido pelo satélite GPS e recebido em um satélite LEO, enfatizando-se as camadas de relevância para a RO-GPS. . . . .	10
2.2 Esquema da geometria de uma ocultação instantânea do sinal emitido pelo satélite GPS e recebido em um satélite LEO, definindo-se as variáveis para a derivação de $\alpha$ e $a$ a partir do excesso no efeito Doppler e as velocidades e posições dos satélites GPS e LEO. . . . .	11
3.1 Distribuição espacial típica das observações convencionais provenientes de: (a) de radiossondas (ADPUPA), balões pilotos (PIBAL) e aeronaves (AIRCFT); (b) superfície continental (ADPSFC) e marítima (SFPSHC) e GPS (GPSIPW); (c) radiâncias dos sensores de micro-ondas, AMSU-A e MHS, e (d) radiâncias dos sensores de infra-vermelho -HIRS/4 e AIRS; (e) perfis de refratividade e (f) ângulos de curvatura disponíveis para serem assimiladas no dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC, no CPTEC/INPE. . . . .	34
3.2 Esquema de uma janela de tempo de um passo do ciclo de assimilação de 6 horas, $\pm 3$ horas entorno dos horários sinóticos. . . . .	39
4.1 Série temporal do acumulado diário de observações de RO-GPS utilizadas no experimento controle (coluna cinza claro), no experimento com MetOp-B subtraindo os dados assimilados desse satélite (coluna preta) e as observações utilizadas do MetOp-B (coluna cinza escuro) no G3D-Var para o mês de agosto de 2014. . . . .	54
4.2 Perfis verticais das diferenças de observações menos as análises (OmA, preto) e observações menos as estimativas iniciais (OmF, cinza) para a refratividade em função dos níveis de pressão, médias entre as análises geradas às 0000 e 1200 UTC, para os satélites da constelação COSMIC, TerraSAR, MetOp-A e MetOp-B (da esquerda para a direita, respectivamente). . . . .	56

4.3	Valores médios de coeficiente de correlação de anomalia (CCA) da altura geopotencial (ZGEO) em 500 hPa sobre o Hemisfério Norte extratropicos (HN), Tropical (EQ) e Hemisfério Sul extratropicos (HS), durante janeiro e agosto de 2014, para o experimento controle (curva com círculos cinzas) e para o experimento adicionando os dados do satélite MetOp-B (curva com cruces pretas). . . . .	58
4.4	Ganho percentual nos valores de RMSE em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para 24, 48, 72, 96 e 120 horas de previsão (da esquerda para a direita, respectivamente), sobre o Hemisfério Norte extratropicos durante janeiro de 2014. . . . .	59
4.5	Idem a Figura 4.4, exceto que para o Hemisfério Sul extratropicos durante agosto de 2014. . . . .	60
4.6	Mudança fracional nos valores de RMSE para as variáveis altura geopotencial em 500 e 850 hPa, pressão ao nível médio do mar e temperatura em 850 hPa, em função do tempo de previsão, na América do Sul durante agosto de 2014. . . . .	61
4.7	Distribuição espacial da diferença nos valores de RMSE das previsões de 36 horas entre o experimento controle e o experimento MTB, para as variáveis altura geopotencial em 500 hPa (ZGEO-500, esquerda) e pressão ao nível médio do mar (PSNM-000, direita), na América do Sul durante agosto de 2014. . . . .	62
4.8	Comportamento das previsões válidas das variáveis temperatura e temperatura virtual em 500 hPa e as componentes zonal e meridional do vento em 250 hPa, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul. . . . .	63
4.9	Série temporal do acumulado diário de observações de RO-GPS utilizadas no experimento assimilando perfis de refratividade (coluna cinza claro) e ângulos de curvatura (coluna cinza escuro) para o mês de agosto de 2014. . . . .	65
4.10	Estatísticas das diferenças fracionais entre (a) as observações de perfis de refratividade em função da altura geométrica e as simuladas pelo modelo e (b) as observações de ângulos de curvatura em função da altura de impacto e as simuladas pelo modelo, para agosto de 2014. . . . .	66
4.11	Estatísticas das diferenças fracionais normalizadas entre (a) as observações de perfis de refratividade em função da altura geométrica e as simuladas pelo modelo e (b) as observações de ângulos de curvatura em função da altura de impacto e as simuladas pelo modelo, para agosto de 2014. . . . .	68

4.12	Estatísticas das funções custo e normas do gradiente para o experimento CNT, REF, BND e um resumo das estatísticas dos três experimentos realizados (de acima para abaixo, respectivamente), para o horário correspondente às 1200 UTC. . . . .	71
4.13	Contribuição de (a) cada tipo de observação (em %) e (b) cada tipo de observação normalizada pelo número de observações utilizadas em cada caso, na redução da função custo na análise gerada para o dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC. . . . .	74
4.14	Histogramas das diferenças entre as observações e as simuladas pelo modelo por intervalos de altura, nos experimentos REF (painéis superiores) e BND (painéis inferiores), referentes à análise gerada para o dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC. . . . .	75
4.15	Tendência absoluta média (a) da pressão em superfície e (b) da umidade no nível de 1000 hPa, em cada experimento, sobre a região global. . . . .	77
4.16	Diferenças do ganho percentual nos valores de RMSE e CCA em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para 24, 48, 72, 96 e 120 horas de previsão (da esquerda para a direita, respectivamente) sobre a região global, durante agosto de 2014. . . . .	79
4.17	Diferenças do ganho percentual nos valores de RMSE e CCA em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para as regiões Hemisfério Norte extratropicais, Equatorial, Hemisfério Sul extratropicais e América do Sul (da esquerda para a direita, respectivamente), durante agosto de 2014. . . . .	81
4.18	Idem a Figura 4.17, exceto que para as previsões de 72 horas. . . . .	82
4.19	Idem a Figura 4.17, exceto que para as previsões de 120 horas. . . . .	83
4.20	Mudança fracional nos valores de RMSE para todas as variáveis avaliadas, na América do Sul durante agosto de 2014. . . . .	85
4.21	Comportamento das previsões válidas para todas as variáveis avaliadas, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul. . . . .	86
4.22	Comportamento das previsões válidas para a variável altura geopotencial em 500 hPa, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul. . . . .	87
4.23	Distribuição espacial da diferença nos valores de RMSE das previsões de 24 horas entre o experimento controle e o experimento BND, para as variáveis temperatura em 250 hPa (TEM-250, esquerda) e altura geopotencial em 250 hPa (ZGEO-250, direita), na América do Sul durante agosto de 2014. . . . .	88

4.24	Comportamento das previsões válidas para todas as variáveis avaliadas, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul. . . . .	92
4.25	Padrões de variabilidade obtidos com a primeira EOF calculada para os campos previstos nos experimentos CNT, REF e BND, às 24, 72 e 120 horas de previsão, respectivamente. . . . .	93

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Valores das constantes do índice de refatividade atmosférica para os dados de RO-GPS. . . . .	19
3.1 Observações assimiladas no desenvolvimento esta pesquisa segundo a sua fonte. . . . .	33
3.2 Observações de radiâncias assimiladas segundo os sensores e satélites que as fornecem. . . . .	33
3.3 Observações de RO-GPS assimiladas segundo os receptores e satélites que as fornecem. . . . .	33
3.4 Configuração do MCGA no G3D-Var utilizada nesta pesquisa. . . . .	42
3.5 Configuração dos experimentos (I). . . . .	43
3.6 Configuração do BAM utilizada nesta pesquisa. . . . .	44
3.7 Configuração dos experimentos (II). . . . .	48
4.1 Resumo da quantidade de observações assimiladas em cada experimento.	69
4.2 Estatísticas do uso das observações antes de iniciar o processo de minimização (1200 UTC 15 de agosto de 2014) em cada experimento. . . . .	72
4.3 Estatísticas do uso das observações após ser realizado o processo de minimização (1200 UTC 15 de agosto de 2014) em cada experimento. . . . .	72
4.4 Valores de fração de variabilidade da precipitação (FVar em %) de todas as EOF calculadas, Previstas e Observadas. . . . .	90
4.5 Valores de CCOR entre as EOF Previstas por cada experimento CNT, REF e BND, respectivamente, e as EOF Observadas para os horários de previsão 24, 48, 72, 96 e 120 horas. . . . .	94



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D/3D/4D-Var	– 1 Dimensão/ 3 Dimensões/4 Dimensões Variacional
ACCESS-G	– Australian Community Climate and Earth-System Simulator
AIRS	– Atmospheric Infrared Sounder
AGPL	– Conteúdo integrado de água precipitável
AMSU-A	– Advanced Microwave Sounding Unit-A
AS	– América do Sul
ATS-6	– Applications Technology Satellite-6
BAM	– Brazilian Global Atmospheric Model
BUFR	– Binary Universal Form for the Representation of Meteorological Data
CA	– Cordilheira dos Andes
CCA	– Coeficiente de Correlação de Anomalia
CCOR	– Coeficiente de Correlação Linear
CDAAC	– COSMIC Data Analysis and Archival Center
CHAMP	– CHallenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application
CICERO	– Community Initiative for Cellular Earth Remote Observation
CNES	– Centre National d'Études Spatiales
COLA	– Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CONAE	– Comissão Nacional de Atividades Espaciais da Argentina
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRTM	– Community Radiative Transfer Model
CSR	– Center for Space Research
CVS	– Concurrent Versions System
DLR	– Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMD	– Divisão de Modelagem e Desenvolvimento
DoD	– Department of Defense
EADS	– European Aeronautic Defence and Space Company
ECMWF	– European Centre for Medium-range Weather Forecasting
EKF	– Extended Kalman Filter
EMBRACE	– Programa Brasileiro de Monitoramento do Clima Espacial
EMC	– Environmental Modeling Center
EnKF	– Ensemble Kalman Filter

EOF	– Empirical Orthogonal Functions
EPS	– EUMETSAT Polar System
EQ	– Região Equatorial
ESA	– European Space Agency
EUA	– Estados Unidos de América
EUMETSAT	– European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FG	– First Guess
FC	– Fractional Change
FORMOSAT-3/COSMIC	– Taiwan’s Formosa Satellite Mission 3/ Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate
FTP	– File Transfer Protocol
G3D-Var	– Global 3D-Var
GFS	– Global Forecasting System
GFZ	– GeoForschungsZentrum
GL	– Região Global
GLONASS	– GLObal NAVigation SatelliteSystem
GNSS	– Global Navigation Satellite System
GOME-2	– Global Ozone Monitoring Experiment -2
GPS	– Global Positioning System
GPS/MET	– Global Positioning System/Meteorology
GPS RO	– GPS Radio Occultation
GRACE-A	– Gravity Recovery And Climate Experiment
GRAS	– GNSS (Global Navigation Satellite System) Receiver for Atmospheric Sounding
GSI	– Gridpoint Statistical Interpolation System
GTS	– Global Telecommunication System
HN	– Hemisfério Norte
HRS/4	– High-Resolution Infrared Radiation Sounders/4
HS	– Hemisfério Sul
HTP	– Hypertext Transfer Protocol
IASI	– Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IFS	– Integrated Forecasting System
IGOR	– Integrated GPS Occultation Receiver
IGS	– International GPS Service
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISRO	– Indian SpaceResearch Organization
JLP	– Jet Propulsion Laboratory
LETKF	– Local Ensemble Transform Kalman Filter
LEO	– Low Earth Orbit
MCGA	– Modelo de Circulação Geral Atmosférico

MetOffice	–	Meteorology Officine of United Kingdom
MetOP -A/-B/-C	–	Meteorological Operational Satellite Program of Europe -A/-B/-C
MHS	–	Microwave Humidity Sounder
MRF	–	Medium Range Forecasting
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NAG	–	The Numeric Algorithms Group
NBAM	–	NCEP’s Bending Angle Method
NCEP	–	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
OI	–	Optimal Interpolation
OmA	–	Observação menos Análise
OmB	–	Observação menos Background
OmF	–	Observação menos o FG ou background
PNT	–	Previsão Numérica de Tempo
PNTC	–	Previsão Numérica de Tempo e Clima
POD	–	Precision Orbit Determination
PreBUFR	–	Prepared BUFR
PSAS	–	Physical-space Statistical Analysis System
PSNM	–	Pressão ao nível médio do mar
QC	–	Quality Control
RMIT	–	Royal Melbourne Institute of Technology
RMSE	–	Root Mean Square Error
RO	–	Rádio Ocultação
RO-GPS	–	Rádio Ocultação por GPS
ROHP	–	Radio-Occultationand Heavy Precipitation
ROM SAF	–	Radio Occultation Meteorology Satellite Applications Facilities
ROPP	–	Radio Occultation Processing Package
SAC-C	–	Satélite de Aplicaciones Científicas-C
SAM	–	Sistema de Avaliação de Modelos
SCANTEC	–	Sistema Comunitário de Avaliação de modelos Numéricos de Tempo e Clima
SCM	–	Successive Correction Method
SCORP	–	SPACE Centre Radio Occultation Processing
SG	–	Second Generation
SMG	–	Sistema de Modelagem Global
SPCON	–	Sistema de Previsão por Conjunto
SR	–	Super-refração
SSI	–	Spectral Statistical Interpolation
SunSat	–	Stellenbosch University Satellite
SVN	–	Subversion

TEMP	–	Temperatura sensível
TerraSAR-X	–	Satélite de Observação da Terra banda X
TRMM	–	Tropical Rainfall Measuring Mission
UCAR	–	University Corporation for Atmospheric Research
URSS	–	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
UTC	–	Coordinated Universal Time
UMES	–	Umidade específica
VTEMP	–	Temperatura virtual
UVEL	–	Componente zonal do vento
VVEL	–	Componente meridional do vento
WMO	–	World Meteorological Organization
WWW	–	World Weather Watch
ZCIT	–	Zona de Convergência Intertropical
ZGEO	–	Altura geopotencial

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	–	parâmetro de impacto
$\alpha_1$	–	ângulo de curvatura referente à frequência $f_1$
$\alpha_2$	–	ângulo de curvatura referente à frequência $f_2$
$B$	–	matriz covariância dos erros do background
$c$	–	velocidade da luz
$^{\circ}\text{C}$	–	grau Celsius
$cm$	–	centímetro
$CO_2$	–	dióxido de carbono
$C_r$	–	critério para determinar a presença de SR
$\hat{e}_T$	–	vetor unitário representando a direção do caminho a ser percorrido pelo sinal desde o transmissor até o receptor
$\hat{e}_R$	–	vetor unitário representando a direção do caminho a ser percorrido pelo sinal desde o receptor até o transmissor
$f_1$	–	frequência de portadora do GPS na banda L1
$f_2$	–	frequência de portadora do GPS na banda L2
$f_d$	–	frequência Doppler
$f_T$	–	frequência transmitida
$FVar$	–	porcentagem da variância total representada por cada EOF
$g$	–	aceleração da gravidade
$h$	–	altura
$H$	–	operador de observações
$hPa$	–	hectopascal
$Hz$	–	hertz
$\infty$	–	infinito
$J$	–	joule
$J$	–	função custo
$J_0$	–	função custo inicial
$J_f$	–	função custo final
$k_1$	–	constante do índice de refração atmosférica 1
$k_2$	–	constante do índice de refração atmosférica 2
$k_3$	–	constante do índice de refração atmosférica 3
$K$	–	grau Kelvin
$KHz$	–	quilohertz
$km$	–	quilômetro
$kg$	–	quilograma
$L$	–	banda de transmissão dos satélites GPS
$\lambda_1$	–	comprimento de onda da banda L1
$\lambda_2$	–	comprimento de onda da banda L2
$\lambda_k$	–	auto-valores
$m$	–	metro

$mb$	– milibar
$n$	– índice de refração
$n_e$	– densidade de elétrons
$n.sec$	– nanosegundo
$N$	– refratividade
$O$	– matriz das observações
$O_o$	– matriz covariância dos erros das observações
$\Phi_T$	– ângulo entre o sinal e o vetor da posição do satélite transmissor
$\Phi_R$	– ângulo entre o sinal e o vetor da posição do satélite receptor
$\pi$	– constante pi
$P_d$	– pressão do ar seco
$P_w$	– pressão do vapor d'água
$r$	– distância desde o centro da Terra ao centro de curvatura da refratividade
$R$	– matriz covariância dos erros das observações
$r_t$	– ponto tangente do raio
$\rho$	– densidade do ar
$\rho_{xy}^t$	– coeficiente de correlação linear entre cada EOF por tempo de previsão (t)
$R_c$	– raio de curvatura da Terra
$R_d$	– constante dos gases para o ar atmosférico seco
$\sigma_{xy}^t$	– matriz de covariância entre cada EOF por tempo de previsão (t)
$\theta$	– ângulo dos vetores entre ambas as posições formadas entre o transmissor e o receptor
$T$	– temperatura absoluta
$v_t$	– velocidade do satélite transmissor
$v_r$	– velocidade do satélite receptor
$v_T^r$	– componente radial da velocidade do satélite transmissor
$v_R^\theta$	– componente azimutal da velocidade do satélite receptor
$x$	– raio refracional
$X_a$	– campo da análise
$X_b$	– campo do background
$Y_o$	– matriz das observações
$Z_d^{-1}$	– fator inverso da compressibilidade do ar seco
$Z_w^{-1}$	– fator inverso da compressibilidade do vapor d'água

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Delimitação do objeto de estudo . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	5
1.3 Estrutura do documento . . . . .	5
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Geometria da RO-GPS e obtenção do ângulo de curvatura . . . . .	9
2.2 Obtenção de perfis de refatividade e atmosféricos . . . . .	16
2.3 Missões espaciais equipadas com receptores GPS . . . . .	19
2.3.1 Dados de RO-GPS usando o satélite MetOp-B . . . . .	21
2.4 Assimilação de dados de RO-GPS em vários centros . . . . .	21
2.4.1 RO-GPS no ECMWF . . . . .	24
2.4.2 RO-GPS no MetOffice . . . . .	25
2.4.3 RO-GPS no NCEP . . . . .	26
2.4.4 RO-GPS na Oficina de Meteorologia da Austrália . . . . .	27
2.4.5 RO-GPS na Argentina . . . . .	28
2.4.6 RO-GPS no CPTEC/INPE . . . . .	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>31</b>
3.1 Materiais . . . . .	31
3.1.1 Dados disponíveis . . . . .	31
3.1.2 Modelo global de PNT do CPTEC . . . . .	35
3.1.3 Sistema de assimilação GSI . . . . .	36
3.1.4 Portal SVN . . . . .	38
3.1.5 Software SCANTEC . . . . .	40
3.2 Metodologia . . . . .	41
3.2.1 Assimilação de perfis de refatividade do MetOp-B com o G3D-Var . . . . .	42
3.2.2 Assimilação de dados de RO-GPS com o GSI/BAM . . . . .	44
3.2.2.1 Assimilação de perfis de refatividade . . . . .	45
3.2.2.2 Assimilação de ângulos de curvatura . . . . .	46
3.2.3 Avaliação dos resultados . . . . .	48
3.2.3.1 Avaliação da qualidade das previsões geradas . . . . .	49

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>53</b>
4.1	Impacto da inclusão dos dados de RO-GPS provenientes do satélite MetOp-B	53
4.2	Impacto da assimilação de dados de ângulos de curvatura ao invés de perfis de refatividade	64
4.2.1	Avaliação das previsões de precipitação usando EOF	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS</b>	<b>95</b>
5.1	Conclusões	95
5.2	Comentários finais	97
5.2.1	Perspectivas futuras	99
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>101</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de estudar as atmosferas de planetas próximos a Terra, desde meados da década de 1960 tem sido explorado o fenômeno pelo qual a luz emitida por um corpo celeste deixa de ser vista em razão da sobreposição de outro corpo (FJELDBO et al., 1971). Este fenômeno é conhecido como ocultação e permite a obtenção de informações da composição da atmosfera desse segundo corpo através do estudo das deformações na luz observadas durante a ocultação. Durante esse processo a luz emitida é distorcida, devido fundamentalmente à presença de um meio, como por exemplo, a estrutura atmosférica do corpo que se sobrepõe ao emissor. A distorção observada é devido ao atraso e curvatura produzidos na propagação da luz, com os quais se pode obter remotamente informações importantes da composição da atmosfera desses corpos celestes. Utilizando essa técnica foram estudadas as propriedades das atmosferas planetárias no sistema solar. Com o advento dos satélites artificiais essa mesma técnica pode ser utilizada, na qual nesse caso ao invés da luz, seriam os sinais eletromagnéticos que são influenciados pela atmosfera do corpo em estudo. Quando o sinal que é transmitido pelo satélite tem comprimento de ondas de rádio a técnica é conhecida como Rádio Ocultação (RO) (JIN et al., 2014).

Devido ao sucesso do uso da RO no estudo das atmosferas de outros planetas (FJELDBO; ESHLEMAN, 1968; ESHLEMAN, 1970), essa abordagem foi aplicada na exploração da própria atmosfera terrestre. No marco do Projeto de Teste Apollo-Soyuz, em 1975, se obteve o primeiro perfil de RO da atmosfera terrestre fazendo uso da missão Apollo e do satélite geostacionário ATS-6 (acrônimo do inglês *Applications Technology Satellite-6*) (RANGASWAMY, 1976). Porém, o alto custo de desenvolver uma infraestrutura adequada para execução da técnica impossibilitou o uso da mesma naqueles anos.

Com o advento do Sistema de Posicionamento Global por satélite (GPS, acrônimo do inglês *Global Positioning System*), foi possível estabelecer o posicionamento geoespacial de um objeto na superfície da Terra mediante o uso de satélites artificiais que orbitam o planeta. Após a disponibilização dos sinais GPS para uso civil em 1983, é retomada a iniciativa de estudar a atmosfera terrestre através da técnica de RO, dessa vez usando como transmissores os satélites GPS (YUNCK et al., 2000). Ware (1992) propôs aproveitar o atraso produzido no sinal entre o GPS e um receptor desse sinal em outro satélite. De acordo com Eyre (1994), nesse mesmo ano foi abordada a possibilidade de que o receptor poderia estar localizado a bordo de um satélite de órbita baixa (LEO, acrônimo do inglês *Low Earth Orbit*). Finalmente, em

1995, com o lançamento da missão de prova de conceito GPS/MET (acrônimo do inglês *Global Positioning System/Meteorology*) (KURSINSKI et al., 1996) foi realmente comprovada a utilidade da técnica para o estudo da atmosfera da Terra bem como que a melhor forma da obtenção da mesma é quando os sinais são transmitidos entre um satélite GPS e recepcionados em um satélite LEO. Devido ao aprimoramento da técnica, seguidamente foram lançados vários satélites LEO equipados com receptores desses sinais cada vez mais sofisticados.

Em geral, um só satélite receptor de RO por GPS pode recuperar aproximadamente 500 perfis de RO cada dia, tanto no modo ascendente como descendente, distribuídos quase uniformemente ao redor do globo. As medidas provenientes da técnica de RO por GPS (doravante RO-GPS), oferecem uma cobertura global completa, sendo independentes da calibração de radiossondas, apresentando alta precisão e resolução vertical relativamente alta se comparada com as radiâncias de satélites a partir de sondagens do nadir (KURSINSKI et al., 1997).

Os dados de RO-GPS possuem especial importância para a Previsão Numérica de Tempo (PNT) em aplicações operacionais, mais especificamente no processo de assimilação de dados, no qual dadas as suas particularidades figuram como uma importante fonte de informações da atmosfera. Entende-se por assimilação de dados o processo mediante o qual é determinado o estado da atmosfera da forma mais precisa possível do ponto de vista do modelo em uso, usando para isso toda a informação disponível (KALNAY, 2003). A qualidade dos dados de RO-GPS, bem como o seu impacto na melhoria das previsões, tem sido amplamente estudado pelos grandes centros operacionais de PNT (*e.g.*, Bevis et al. (1992), Eyre (1994), Cucurull et al. (2007), Aparicio and Deblonde (2008), Cucurull and Derber (2008), Healy (2008), Poli et al. (2009), Rennie (2010), Cucurull et al. (2013), Bonavita (2014)). Vários estudos realizados convergem ao afirmar que a maior contribuição dessas medidas é em reduzir o efeito do viés do modelo no estado da atmosfera analisado, especialmente na alta troposfera e estratosfera, com um maior impacto positivo sobre o Hemisfério Sul (HS) (CUCURULL et al., 2007; BUONTEMPO et al., 2008; BONAVIDA, 2014). Particularmente Bonavita (2014) confirma que isso pode ser atribuído à diferença na quantidade de observações convencionais, sendo maior no Hemisfério Norte (HN) do que no HS. Dada a estreita relação que existe entre a qualidade das previsões e a precisão das condições iniciais (KALNAY, 2003), prefere-se a assimilação de dados em um estado mais bruto, ou seja, menos processados, o que permite a redução da propagação de incertezas nos valores obtidos (APARICIO; DEBLONDE, 2008). Os diferentes estágios de processamento envolvem aproximações e consequentemente

uma diminuição do grau de confiança nos resultados finais, que neste caso seria a condição inicial gerada após o ciclo de assimilação e finalmente a previsão de tempo.

Na RO-GPS os dados com informações da atmosfera são obtidos em vários níveis de processamento. As medidas da fase junto ao conhecimento preciso das posições e velocidades dos satélites GPS e LEO formam o conjunto de dados associados à atmosfera que pode ser considerado mais bruto dentro da RO-GPS. Seguidamente são derivados os ângulos de curvatura referentes às frequências nos sinais GPS, a partir dos quais é possível obter perfis de refratividade em função da altura geométrica. Em um último nível de processamento se encontram os perfis de temperatura e pressão de vapor d'água, que são inferidos a partir dos perfis de refratividade, constituindo os dados mais processados, conseqüentemente, nos que se esperam as maiores incertezas. Vários autores, entre eles Cucurull et al. (2007), afirmam que a assimilação das medidas de fase e posição e velocidades dos satélites GPS e LEO, é o principal desafio que enfrenta a comunidade científica devido à complexidade que exige um operador na assimilação destas observações. Por sua vez, em alguns centros de PNT como o ECMWF (acrônimo do inglês *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e o NCEP (acrônimo do inglês *National Centers for Environmental Prediction*), já foi explorada a assimilação direta de perfis de ângulos de curvatura, demonstrando impactos substanciais na habilidade de previsão dos modelos. Estes dados, quando comparados com os perfis de refratividade, são preferidos para serem assimilados operacionalmente. Ao assimilar dados de ângulos de curvatura é possível dar maior peso a essas observações em altas altitudes (por exemplo acima de 30 km), o que ajuda a aproveitar mais o conteúdo de informação das medidas de RO-GPS contribuindo simultaneamente na redução do processo de latência no modelo de previsão. Embora, Eyre (1994) afirma que a assimilação de perfis de refratividade ou perfis recuperados de temperatura e/ou umidade, é também aceitável quando suficiente atenção for dada à caracterização das covariâncias dos erros.

## 1.1 Delimitação do objeto de estudo

No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), o processo de assimilação dos dados de RO-GPS tem transitado por várias etapas. Primeiramente foram assimilados os perfis atmosféricos de temperatura, pressão e umidade com o sistema de assimilação PSAS (acrônimo do inglês *Physical-space Statistical Analysis System*), operacional no centro até o ano 2013 (SAPUCCI et al., 2014). Posteriormente, com o sistema G3D-Var (método variacional 3D-Var baseado no GSI (acrônimo do inglês *Gridpoint Statis-*

*tical Interpolation System*) acoplado ao Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do CPTEC), foi possível assimilar os perfis de refratividade (AZEVEDO, 2014). Recentemente, em Sapucci et al. (2016), usando o sistema de assimilação LETKF (acrônimo do inglês *Local Ensemble Transform Kalman Filter*) acoplado ao MCGA, foram assimilados perfis de refratividade provenientes da constelação de satélites LEO denominada COSMIC (acrônimo do inglês *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*). Os autores preferiram esses dados por apresentar um operador de observações mais simples, embora a assimilação de perfis de ângulo de curvatura estivesse também implementada nesse sistema. Os resultados encontrados indicam impactos significativamente positivos sobre a América do Sul (AS), em todas as variáveis avaliadas e durante todo o tempo de integração do modelo. Assim, entre os três níveis de processamento dos dados de RO-GPS disponíveis para a assimilação, o CPTEC já tem explorado relativamente bem os perfis recuperados (do inglês *retrievals*) de temperatura, umidade e de refratividade, mas ainda não foram assimilados nesse centro os perfis do ângulo de curvatura, e diversas questões ainda estão em aberto sobre o potencial a ser explorado para a melhoria da qualidade dos produtos da PNT gerados. Além disso, a disponibilidade de dados de novos satélites LEO é frequente, e com os recursos da iniciativa privada no setor de meteorologia por satélite, deverá haver um aumento significativo nos próximos anos. Nesse sentido, uma ampliação significativa se espera quando seja lançada a constelação de 12 satélites COSMIC-2, dentre os quais 6 serão colocados em órbita equatorial e 6 em órbita polar. Uma outra questão é avaliar o impacto da inclusão dos dados de novos satélites na assimilação operacional praticada no centro.

Em uma evolução natural da assimilação de dados provenientes desse sistema de observação, a presente dissertação pretende realizar uma pesquisa em que dados de ângulo de curvatura sejam incluídos na PNT do CPTEC, e avaliar os benefícios a serem obtidos adicionalmente aos já demonstrados com a assimilação de perfis de refratividade. Para isso, precisa-se de uma análise detalhada do desempenho do modelo quando os perfis de refratividade são assimilados, usada como base para avaliar os resultados obtidos ao assimilar ângulos de curvatura. Além disso, a inclusão dos dados provenientes do satélite MetOp-B, ainda não incluídos operacionalmente, deverá ser analisada com o objetivo de avaliar o impacto da adição de novos conjuntos de dados para os resultados operacionais. Esse estudo tem especial importância para avaliar o potencial do CPTEC em explorar a futura ampliação da constelação de satélites LEO dedicados para aplicações operacionais na assimilação de dados de RO-GPS.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é otimizar o impacto dos dados de RO-GPS no sistema de PNT do CPTEC. Essa otimização será realizada através da ampliação da base de dados e a assimilação de ângulo de curvatura ao invés da refratividade. A avaliação dessa otimização se dará ao caracterizar detalhadamente tal impacto com ênfase para a América do Sul. Os objetivos específicos para atingir essa meta são:

- Avaliar o impacto da inclusão dos dados de refratividade do satélite MetOp-B na assimilação de dados global do CPTEC;
  - Avaliar em termos da quantidade de observações disponíveis de RO-GPS dos demais satélites e o comportamento das observações rejeitadas com e sem a inclusão dos dados do MetOp-B;
  - Avaliar o impacto da assimilação dos dados do MetOp-B e caracterizar adequadamente os benefícios da assimilação dos dados de refratividade nas análises e previsões;
- Caracterizar o impacto da assimilação do ângulo de curvatura usando o GSI acoplado no modelo global de PNT em uso no CPTEC, tendo essa tarefa os seguintes subitens:
  - Avaliar as quantidades de dados assimilados em cada tipo de observação de RO-GPS e o impacto na quantidade de interações realizadas na minimização da função custo;
  - Avaliar o impacto da assimilação do ângulo de curvatura na qualidade da análise e das previsões e identificar possíveis limitações na PNT do CPTEC para a potencialização dos benefícios;
  - Avaliar o impacto do ângulo de curvatura na melhoria da representação espacial da variabilidade da precipitação nas previsões geradas pelo modelo global do CPTEC.

## 1.3 Estrutura do documento

Visando atingir os objetivos propostos, no capítulo seguinte será descrita mais profundamente uma revisão da técnica de RO-GPS, bem como uma revisão bibliográfica da assimilação de observações de ângulos de curvatura e refratividade em outros centros. No Capítulo 3 são apresentados os materiais a serem usados na realização

deste estudo enfatizando nos dados e softwares disponíveis. Uma breve descrição das características do modelo global do CPTEC e do sistema de assimilação GSI é também apresentada. Adicionalmente, nesse capítulo é detalhada a metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4, são expostos os resultados obtidos e uma detalhada discussão dos mesmos. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões geradas nesse estudo, bem como uma relação de trabalhos futuros que poderão orientar os próximos passos na continuidade dessa pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A técnica de RO foi introduzida na astronomia no século XVIII para estudar a sincronização do movimento dos corpos celestes (MELBOURNE et al., 1994). Nesse contexto, uma ocultação acontece quando a luz emitida por um corpo celeste deixa de ser vista em razão da sobreposição de outro corpo (FJELDBO et al., 1971). As primeiras ocultações estudadas corresponderam às estelares, em que do ponto de vista de um observador um corpo de interesse passa a frente a uma estrela, ocultando a mesma. A curvatura e mudança na luz recebida na localização do observador podem ser usadas para inferir a estrutura atmosférica do corpo que a ocultou (JIN et al., 2014). O principal processo físico responsável pela distorção da luz da estrela durante a ocultação é a refração diferencial por uma atmosfera planetária ao longo do caminho, devido a existência de um gradiente exponencial de densidade na atmosfera do corpo de interesse. A luz da estrela é refratada por um ângulo cada vez maior à medida que são atingidas as regiões mais profundas da atmosfera. Detalhes sobre esse e outros processos presentes durante uma ocultação estelar podem ser encontrados em Elliot (1979). Com o lançamento do primeiro satélite artificial foi modificado o conceito do posicionamento através da navegação apoiada em sinais de rádio emitidos por satélites artificiais (SILVA; SEGANTINE, 2015). Assim, o fundamento da ocultação foi estendido ao estudo das propriedades físicas das atmosferas planetárias, onde ao invés da radiação emitida por fontes naturais foi usada a transmissão de ondas de rádio a partir de um satélite artificial, sendo chamada de rádio ocultação (RO). A RO foi usada pela primeira vez em 1964 na missão Mariner 4, realizada pela NASA (acrônimo do inglês *National Aeronautics and Space Administration*) dos Estados Unidos de América (EUA) (FJELDBO; ESHLEMAN, 1968; ESHLEMAN, 1970) para explorar a atmosfera e superfície do planeta Marte. Mariner 4 fez a sua maior aproximação a Marte em 15 de julho de 1965, obtendo o primeiro perfil de RO planetário através da intercepção do sinal pela atmosfera de Marte e a recepção do mesmo na Terra. Além dos EUA, a União Soviética (URSS) também lançou várias missões (KOLOSOV et al., 1979) com o mesmo propósito. Com estes aprimoramentos foi introduzida a ideia do uso da RO nas pesquisas da própria atmosfera terrestre, que foi desenvolvida inicialmente no marco da missão Apollo-Soyuz como um esforço conjunto entre EUA-URSS, usando o satélite geostacionário ATS-6 (acrônimo do inglês *Applications Technology Satellite-6*) em julho de 1975, em que se obteve o primeiro perfil de RO da atmosfera terrestre (RANGASWAMY, 1976). Mas o alto custo de implementar uma infraestrutura adequada para a execução da técnica, fez com que nesses anos a RO ainda não fosse muito usada.

Com o advento do GPS e sua posterior disponibilidade para uso civil, a ideia de explorar a técnica de RO tornou-se uma realidade, especialmente quando as observações GPS se converteram em operacionais, o que ocorreu em abril de 1995 após ter sido completado o lançamento de uma constelação de 24 satélites. Tendo em conta que os satélites GPS fornecem medidas mais precisas e contínuas contribuindo grandemente à navegação, posicionamento e sincronização dos objetos sobre a superfície terrestre, servindo como um sistema de referência de tempo, Ware (1992) propôs que as medidas do atraso nos sinais GPS e um receptor destes em outro satélite poderiam ser aproveitadas para o estudo da atmosfera terrestre. De acordo com Eyre (1994), nesse mesmo ano, outros autores abordaram a possibilidade de colocar um receptor desses sinais em um satélite LEO, indicando que uma precisão útil poderia ser alcançada. Essa proposta possibilitaria uma alta resolução espacial cobrindo grandes áreas geográficas. Assim, receptores a bordo destes representariam uma importante fonte adicional de informação de RO-GPS. Todas as hipóteses em questão conseguiram ser comprovadas mediante o lançamento da missão de prova de conceito GPS/MET, em 1995. Com esta foram obtidos perfis de temperatura e vapor d'água derivados das medições realizadas entre o GPS/MET e o receptor dos sinais a bordo do pequeno satélite LEO MicroLab-1, em que foram realizadas centenas de sondagens por dia até o final da missão, em meados de 1997 (JIN et al., 2014). Os perfis de temperatura obtidos foram precisos em aproximadamente 1 grau Kelvin (K) em média, com desvio padrão de 1 a 2 K quando comparados com radiossondas e dados de satélite (KURSINSKI et al., 1996).

A RO-GPS acontece quando um receptor GPS a bordo do satélite LEO, ao receber os sinais de rádio emitidos por um satélite do sistema, é ocultado pela Terra em decorrência de sua trajetória. As transmissões dos sinais são afetadas pelo gradiente da densidade dos elementos que compõem a atmosfera ao longo do caminho, fazendo que as ondas viajem mais lentas do que em um vácuo, percorrendo uma trajetória curva em vez de em linha reta (BEVIS et al., 1992). Nos satélites LEO o que se observa é uma diferença na fase e amplitude dos sinais GPS recebidos, mediante a qual é possível obter o perfil de refatividade atmosférica e seguidamente pode ser inferida a informação do estado termodinâmico da atmosfera (CUCURULL et al., 2013). O lançamento da GPS/MET teve um sucesso sem precedentes, pois foi a base para a criação de um sistema de análise de dados automatizada, a fabricação de uma nova geração de receptores sofisticados para a RO mais (YUNCK et al., 2000), abrindo o caminho para o lançamento de muitas outras missões de satélites visando objetivos similares.

Dada a importância do domínio da técnica de RO, bem como as suas particularidades para o desenvolvimento do estudo, é apresentada na próxima seção uma descrição da geometria que envolve a RO-GPS com ênfase na obtenção do ângulo de curvatura. Posteriormente, a Seção 2.2 é dedicada à obtenção da refatividade e os perfis atmosféricos. Um histórico das missões de satélites LEO equipadas com receptores de sinais GPS após o lançamento da GPS/MET é apresentado na Seção 2.3. Aspirando a inclusão dos dados de RO-GPS do MetOp-B no sistema de assimilação do CPTEC, na Subseção 2.3.1 são apresentadas algumas características deste satélite. Finalmente, as atividades associadas à assimilação da RO-GPS em alguns centros com uma análise panorâmica do que está sendo atualmente assimilado no CPTEC/INPE são apresentadas na Seção 2.4.

## 2.1 Geometria da RO-GPS e obtenção do ângulo de curvatura

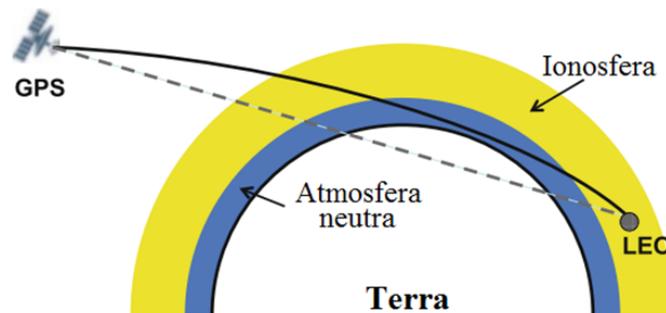
Para atingir um melhor entendimento da técnica de RO por GPS, deve-se ter em conta primeiramente que do ponto de vista da RO a atmosfera terrestre é dividida em duas camadas fundamentais: a atmosfera neutra, que se estende desde a superfície até próximo aos 60 km de altura, na qual os componentes são eletricamente neutros, e a ionosfera, que corresponde à camada superior da atmosfera da Terra ionizada pela radiação solar, estendendo-se desde aproximadamente os 60 km até acima dos 1.000 km. Devido ao fato de cada uma dessas camadas apresentar propriedades diferentes, o caráter dispersivo e não dispersivo da atmosfera ou tratar os sinais como ondas monocromáticas ou não monocromáticas, são exemplo de algumas aproximações usadas para avaliar os efeitos nos sinais de rádio ao atravessar a atmosfera terrestre. Essas e outras particularidades são ressaltadas no texto dessa seção.

Cada satélite GPS transmite continuamente sinais em várias frequências ( $f$ ) na banda L, com comprimentos de ondas ( $\lambda$ ) de aproximadamente 20 cm. Por exemplo a L1 possui  $f_1 = 1,57542$  GHz e  $\lambda_1 \approx 19,0$  cm, entanto que a L2 possui  $f_2 = 1,2276$  GHz e  $\lambda_2 \approx 24,4$  cm. As amplitudes do comprimento de onda de cada banda permite que os sinais GPS atravessem as nuvens e gotículas de chuva sem serem afetados, outorgando-lhe à RO-GPS a vantagem de prover informações da atmosfera sob qualquer condição de tempo. Esses satélites se encontram, em geral, a uma altitude de aproximadamente 20.200 km (JIN et al., 2014) e provêm uma cobertura global com mais de quatro satélites visíveis simultaneamente a qualquer tempo.

Os sinais GPS, ao atravessar a atmosfera terrestre, obedecem às leis de Maxwell de propagação de uma onda em um meio. A atmosfera atua como uma lente a escala

planetária (KURSINSKI et al., 1997), como pode ser observado na Figura 2.1, em que se apresenta um esquema da geometria da ocultação entre os satélites GPS e LEO. Essa geometria muda, dependendo se o sinal está no modo ascendente ou descendente na atmosfera (SAPUCCI et al., 2014). O efeito de lente se deve aos gradientes de refratividade causados pela variação vertical da concentração molecular. Consequentemente, as ondas electromagnéticas geralmente não se propagam ao longo de linhas retas (FUSSEN et al., 2015), produzindo-se uma curvatura nos sinais recebidos. Por outro lado, a variação do índice de refração ao longo do caminho está estreitamente relacionada ao carácter dispersivo (quando o valor da velocidade de propagação das ondas no meio depende da frequência) e não dispersivo (quando a velocidade de propagação das ondas é a mesma para todas as frequências) da ionosfera e a atmosfera neutra, respectivamente. Portanto, em um evento de RO, os sinais (L1 e L2) transmitidos pelo satélite GPS são ligeiramente curvados e atrasados até serem recepcionados no satélite LEO. A resolução horizontal das observações de RO-GPS é de cerca de 300 km ao longo do caminho do raio GPS e cerca de 1,5 km perpendicular ao caminho. Enquanto que a resolução vertical pode variar para aproximadamente 1,5 km na estratosfera e 0,1-0,5 km na troposfera inferior (MELBOURNE et al., 1994).

Figura 2.1 - Esquema de uma ocultação do sinal emitido pelo satélite GPS e recebido em um satélite LEO, enfatizando-se as camadas de relevância para a RO-GPS.

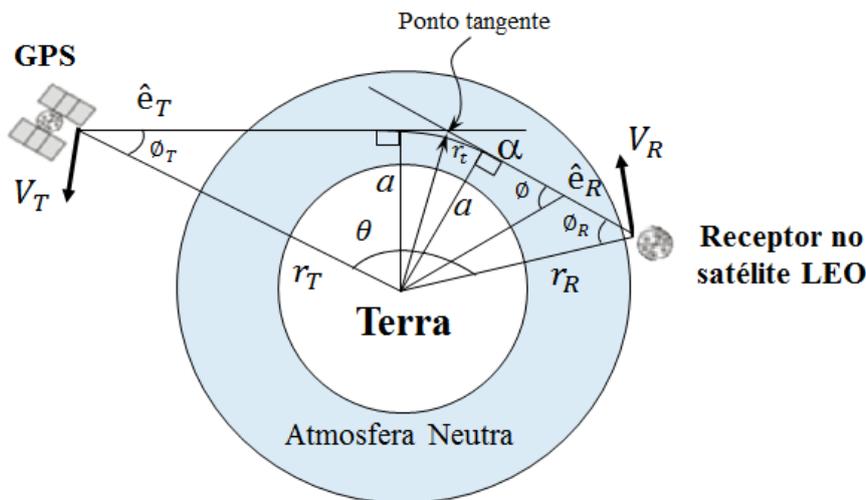


Fonte: Adaptado de Jin et al. (2014).

A técnica de RO-GPS explora o excesso do atraso entre a fase observada e a fase geométrica (também conhecido como efeito Doppler) da correspondente ocultação, para derivar os ângulos de curvatura,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , referentes às frequências  $f_1$  e  $f_2$ , e  $a$ , o parâmetro de impacto, seguindo a geometria da Figura 2.2. Estes são calculados a partir de medidas acuradas das frequências e do ponto tangente do raio  $r_t$ . Assim, o excesso no efeito Doppler é calculado se as posições e as velocidades dos satélites ( $v_t$  e  $v_r$ ) são conhecidas e, por conseguinte, a estrutura vertical do índice de refração

atmosférica pode ser derivada. O processo para este cálculo é também chamado de processo de calibração, o qual consiste em dois passos fundamentais: a Determinação da Órbita Precisa (POD, acrônimo do inglês *Precision-Orbit-Determination*) (RIM; SCHUTZ, 2002) e calcular e isolar a soma dos excessos produzidos no sinal, tanto na ionosfera como na atmosfera neutra. Melbourne et al. (1994) reportou que precisão máxima prevista de um sistema de RO-GPS é de 1 grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou melhor para uma faixa de altura de 5 a 40 km. As principais fontes de erros que devem ser reduzidos e/ou eliminados nesse processo correspondem ao movimento relativo entre os centros de fase das antenas dos satélites GPS e LEO, os erros nos relógios de ambos os satélites, o ruído nas medições, o atraso ionosférico, o excesso no atraso troposférico e a curvatura (SCHREINER et al., 1998).

Figura 2.2 - Esquema da geometria de uma ocultação instantânea do sinal emitido pelo satélite GPS e recebido em um satélite LEO, definindo-se as variáveis para a derivação de  $\alpha$  e  $a$  a partir do excesso no efeito Doppler e as velocidades e posições dos satélites GPS e LEO.



Fonte: Adaptado de Kursinski et al. (1997).

A precisão com que são calculadas as órbitas dos satélites envolvidos na RO reflete na precisão com que serão obtidos os dados derivados da RO-GPS. Assim, o objetivo da POD é obter uma órbita precisa que represente o ambiente dinâmico no qual o movimento ocorre, incluindo todas as forças relevantes que afetam o movimento dos satélites. Para cada ocultação o processo de POD consiste primeiramente na determinação da órbita para os transmissores GPS (de referência e ocultado pelo limbo da terra), onde são processados dados de estações GPS terrestres de referência para

estimar a taxa da compensação dos relógios e as órbitas precisas para os satélites GPS. Posteriormente é executado o processamento de POD para o receptor no satélite LEO onde se obtém a órbita desse satélite e a compensação dos relógios (JIN et al., 2014). Na literatura podem ser encontradas três abordagens principais para atingir o problema da POD: a abordagem cinemática ou geométrica, a abordagem dinâmica e a abordagem dinâmica reduzida. Por exemplo: a cinemática assume a disponibilidade de medidas altamente precisas, uma alta taxa de amostragem de dados e medições simultâneas de pelo menos 4 satélites GPS por período de tempo. Mais detalhes dessa técnica podem ser encontrados em Hobbs and Bohn (2006).

A segunda parte do processo de calibração baseia-se na aplicação de técnicas de diferenciação para eliminar os erros nos relógios dos satélites GPS e LEO. Para isso existem duas técnicas que são convencionalmente usadas: a simples diferenciação e a dupla diferenciação, técnicas que diferem fundamentalmente enquanto ao efeito das flutuações do oscilador do satélite GPS que é removido dos dados da fase recebida no satélite LEO (JIN et al., 2014). Adicionalmente, outra técnica que pode ser empregada é a não-diferenciação, na qual, segundo Xia et al. (2016), usando-se uma estimativa a priori dos erros dos relógios do GPS e LEO é possível reduzir o nível de ruído no excesso da fase na baixa troposfera quando comparado com a estratégia de simples diferenciação. Porém, cada técnica apresenta vantagens e deficiências que são consideradas nesse processo.

Takasu and Kasai (2005) desenvolveram um software para determinar com alta precisão a órbita e relógio dos satélites GPS, usando para isso medidas da fase portadora não diferenciadas de estações em terra. Nesse trabalho, a órbita e relógio dos satélites GPS é estimada pelo Filtro de Kalman estendido (EKF, acrônimo do inglês *Extended Kalman Filter* incluindo modelos de medição; modelos de correção precisa; modelos de órbita de satélite; e um filtro de estimação de parâmetros. Os resultados foram comparados com medidas de órbita final e relógio de 40 estações do Serviço Internacional GPS (IGS, acrônimo do inglês *International GPS Service*), distribuídas em todo o globo. A posição estimada dos satélites GPS com uma precisão de 3D RMSE foi 5,2 cm, e o viés no relógio, 0,14 nsec.

Considerando que os receptores dos sinais GPS não são perfeitos, alguns erros estão presentes nas observações, os quais contribuem para a degradação das mesmas. Os erros nas observações se devem fundamentalmente ao hardware do sistema de medidas e ao processamento, incluindo: o ruído térmico; erros residuais devido a deficiência da correção ionosférica; instabilidade nos relógios do receptor no satélite LEO; e nos

satélites GPS e as estações em terra, entre outros. Por exemplo, no caso do ruído térmico no sinal de RO reconstruído complexo, Sokolovskiy (2001) indica que o erro pode depender da técnica de inversão usada na recuperação da refratividade. Isso é traduzido em um erro com de magnitude até 1-3 unidades de refratividade ( $N$ ). Em Palmer et al. (2000) é oferecida uma análise detalhada da contribuição de cada uma dessas fonte de erros para a matriz de erros das observações do ponto de vista da assimilação desses dados. Entre os métodos que podem ser usados para remover várias das fontes de erros, cita-se o filtro de Fourier ou uma regressão spline em adição ao filtro de Fourier. Esses dois métodos são implementados no sistema em uso no Centro de Análise e Arquivamento de Dados COSMIC (CDAAC, do acrônimo em inglês *COSMIC Data Analysis and Archival Center*) (CDAAC, 2016).

No que se refere à minimização das fontes de erros referentes à contribuição ionosférica, a qual provoca um deslocamento Doppler adicional da ordem de 1-2 Hz no sinal quando o ponto de tangente do raio está em altitudes troposféricas (SOKOLOVSKIY, 2001), em (MELBOURNE et al., 1994) reporta-se que pode ser utilizada uma combinação linear de primeira ordem dos sinais nas duas frequências GPS ( $f_1$  e  $f_2$ ). Tipicamente é usada informação ionosférica a priori combinando-a com informação do ângulo de curvatura para estimar o termo de correção. Devido ao caráter dispersivo da ionosfera, os efeitos refrativos nas fases portadoras são proporcionais ao comprimento de onda das mesmas, dentro da primeira ordem de magnitude (JIN et al., 2014). Considerando que termos de ordem de magnitude maiores são desprezados, erros residuais surgem como uma deficiência da correção ionosférica, os quais se não são corretamente calibrados constituem uma fonte importante de erros no perfil atmosférico recuperado, porém, esse método é o adotado na maioria dos centros de processamento. Embora Healy and Culverwell (2015), propõem uma modificação para essa correção padrão. O objetivo centra-se em minimizar os erros referentes à correção ionosférica com a finalidade de melhorar as climatologias geofísicas de observações de RO-GPS. Com a introdução de um novo termo em função do parâmetro de impacto foram encontrados resultados promissores, pelo qual sugere-se que o mesmo seja considerado nos centros de processamento de dados de RO-GPS.

Durante o processo de calibração espacial, atenção deve ser dada ao cálculo do excesso no efeito Doppler, pois tem um papel fundamental na derivação do ângulo de curvatura nos sinais. O excesso no efeito Doppler por si só pode ser da ordem de 1 KHz (SOKOLOVSKIY, 2001). No processo de recuperação dos dados de RO-GPS, uma hipótese que é usualmente considerada é a hipótese de simetria esférica, na qual se garante que o caminho do raio permanece no plano de ocultação, o qual é

definido como o plano que contém tanto os satélites GPS e LEO, como o origem do sistema de coordenadas. Com essa hipótese, o cálculo tende a ser menos complexo, pois já vez conhecidas com precisão as posições e velocidades dos satélites GPS e LEO, corrigidos os erros nos relógios e os efeitos relativísticos, a frequência Doppler ( $f_d$ ) é dada pela solução da seguinte equação:

$$f_d = \frac{f_T}{c} (\vec{v}_T \bullet \hat{e}_T + \vec{v}_R \bullet \hat{e}_R) = -\frac{f_T}{c} (v_T^r \cos \Phi_T + v_T^\theta \sin \Phi_T + v_R^r \cos \Phi_R + v_R^\theta \sin \Phi_R) \quad (2.1)$$

em que ( $f_T$ ) é a frequência transmitida;  $c$  é a velocidade da luz;  $\hat{e}_T$  e  $\hat{e}_R$  são os vetores unitários representando a direção do caminho a ser percorrido pelo sinal desde o transmissor até o receptor;  $v_T^r$  e  $v_R^r$  representam as componentes radial e azimutal da velocidade dos satélites transmissor e receptor; e  $\Phi_T$  e  $\Phi_R$  correspondem aos ângulos entre o sinal e o vetor da posição de cada satélite (KURSINSKI et al., 1997; ROCKEN; YUNCK, 2006). Através da Lei de Snell é possível estabelecer a seguinte relação:

$$r_T \sin \Phi_T = r_R \sin \Phi_R = a \quad (2.2)$$

em que  $a$  é parâmetro de impacto e  $r$  representa a distância ao centro da Terra de cada satélite transmissor e receptor, respectivamente. Considerando a geometria da Figura 2.2 pode ser calculado o ângulo de curvatura como:

$$\alpha = \Phi_T + \Phi_R + \theta - \pi \quad (2.3)$$

em que  $\theta$  se corresponde com o ângulo dos vetores entre ambas as posições formadas entre o transmissor e o receptor. Por fim, o ângulo de curvatura em função do parâmetro de impacto é obtido a partir da integração das equações anteriores.

Através da Equação 2.4 (KURSINSKI et al., 1997), também chamada de fórmula de Bouguer, é estabelecida a relação entre o índice de refração  $n$  e o ângulo de curvatura em função do parâmetro de impacto ( $\alpha(a)$ ) previamente calculado:

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_t}^{\infty} d\alpha = -2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{d \ln(n)}{dr} \frac{dr}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} \quad (2.4)$$

em que  $r$  é a distância do centro de curvatura e a integral é sobre a porção da atmosfera acima do ponto tangente do raio ( $r_t$ ). Esta equação é essencial no processo de assimilação de dados de ângulos de curvatura, pois é usada como operador de observações, por meio da qual se calculam os ângulos de curvatura modelados, ou seja, os ângulos de curvatura a partir dos dados do modelo de previsão. A equação anterior também pode ser encontrada com uma mudança de variável dada por  $x =$

$nr$ , em que a magnitude  $x$  é o raio refracional e seria o parâmetro de impacto de um raio com um ponto tangente de altura  $r$ . Na Equação 2.4, nota-se que existe uma singularidade no limite inferior do conjunto, isto é, existe um ponto no domínio onde o denominador do integrando pode indefinir a divisão. Em Cucurull et al. (2013) esta singularidade numérica é evitada ao avaliar a integral em uma nova grade  $s$ , espaçada igualmente, em que  $x = \sqrt{a^2 + s^2}$ , de modo que a regra trapezoidal de integração pode ser aplicada com facilidade e precisão. Isso permite, considerar a obliquidade dos perfis de RO-GPS, tendo em conta que na realidade não são verticais, o que tem oferecido melhores resultados (FOELSCHE et al., 2011).

A suposição de simetria esférica facilita que o cálculo do ângulo de curvatura seja mais simples, porém podem ser introduzidos erros substanciais nas medidas derivadas a partir deste, sobretudo na obtenção do índice de refração. A estrutura vertical da refração atmosférica torna-se mais complexa em relação à presença de vapor d'água, criando-se caminhos múltiplos simultâneos entre o transmissor e o receptor, o que é conhecido como efeito de multi-caminho (JIN et al., 2014). Devido a esse efeito, o ângulo de curvatura deve ser obtido em dois intervalos de alturas diferentes, tomando como referência uma altitude de aproximadamente 5 km sobre a superfície terrestre. Acima dessa altura o citado efeito não é significativo, considerando os sinais de rádio como monocromáticos. Porém, na altura da alta estratosfera, o que mais afeta o ângulo de curvatura é o ruído ionosférico residual, convertendo-se na principal fonte de erro nessa região ( $\approx 30-60$  km). Entretanto, abaixo de 5 km não é possível tratar os sinais como monocromáticos, dado que se corresponde com a troposfera baixa, onde a concentração de vapor d'água varia de uma região para outra tanto no espaço como no tempo, resultando em gradientes horizontais significativos do índice de refração. O fato de escolher uma altura muito alta da RO acima da superfície limita a possibilidade de que os dados de RO-GPS impactem diretamente os campos de umidade e temperatura na mais baixa troposfera (CUCURULL et al., 2007) e especial atenção deve ser dada. Em alturas abaixo de 5 km o ângulo de curvatura tem que ser reconstruído usando métodos como a Geometria Óptica, o Rádio Holográfico, o *Back-Propagation* e a Transformada de Fresnel. Esses métodos são explicados mais aprofundadamente entre outros em: Gorbunov (2002), Jensen et al. (2003) e Holzschuh (2007). Além disso, estimativas erradas do ângulo de curvatura e o parâmetro de impacto induzem um viés nos campos de temperatura recuperados em altitudes abaixo de 40 km. Segundo Syndegaard (1998), em altitudes inferiores esse viés aumenta, e em/ou ao redor de latitudes médias, podendo atingir aproximadamente 3 K em 10 km de altitude e 6 K mais perto da superfície. O autor especifica que o sinal do viés dependa da direção do raio na localização do perfil: raios viajando

em direção a altitudes mais altas resulta em viés positivo, e vice versa.

Porém, as limitações e fontes de erros não impedem que desde o ponto de vista da assimilação de dados, os ângulos de curvatura derivados a priori em relação aos perfis de refratividade, sejam a melhor escolha dentre os dados de RO-GPS, pois estes são recuperados antes, portanto são menos processados.

## 2.2 Obtenção de perfis de refratividade e atmosféricos

O sinal de rádio ao passar pela atmosfera é refratado devido à variação do índice de refração ao longo do caminho. Com o uso de informação climatológica e supondo simetria esférica é possível inferir os índices de refratividade nas diferentes camadas em função da altura geométrica (CUCURULL et al., 2007), e posteriormente podem ser obtidos os perfis do conteúdo total de elétrons na ionosfera e da temperatura, pressão e pressão de vapor d'água na atmosfera neutra (KURSINSKI et al., 1997). Utilizando a inversão da transformada de Abel é possível obter a refração em função de  $r_t$  e em termos de  $\alpha(a)$  e  $a$  (FJELDBO et al., 1971), como é mostrado na seguinte equação:

$$n(r_t) = \exp \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right\} \quad (2.5)$$

Nota-se que a refração apresenta uma distribuição exponencial, diminuindo com a altitude em decorrência da diminuição da massa atmosférica com a altura.

Comumente a transformada de Abel é usada para obter a Equação 2.5. Porém, sua utilização só é possível assumindo simetria esférica, ou seja, que o índice de refração muda apenas na direção radial. Na realidade isso está longe de ser verdade, considerando a forma elipsoidal da Terra (diâmetro equatorial levemente maior do que o diâmetro polar) e que a existência de gradientes horizontais das diferentes propriedades da atmosfera (pressão, temperatura, densidade, etc.) geram campos do índice de refração com simetria não esférica (JIN et al., 2014). Por outro lado, as órbitas dos satélites GPS e LEO não são coplanares nem as trajetórias dos sinais envolvidos. Assim, o uso de simetria esférica pode prejudicar o impacto da RO-GPS na assimilação de dados (CUCURULL et al., 2007). Esta é uma questão que ainda não foi resolvida e que limita os resultados, particularmente na baixa troposfera (CUCURULL et al., 2013). Porém, para aplicações operacionais essa suposição é frequentemente considerada (SYNDERGAARD, 2000).

O índice de refração na atmosfera é muito próximo da unidade e é expressado por

meio da refratividade ( $N$ ), a que é definida como  $N = 10^6(n - 1)$ . A refratividade na atmosfera eletricamente neutra pode ser expressada pela da Equação 2.6 (KURSINSKI et al., 2000), em função da temperatura ( $T$ ), em graus K, da pressão do ar seco ( $P$ ) e da pressão do vapor d'água ( $P_w$ ), em milibares (mb), e da contribuição ionosférica da seguinte forma:

$$N = 77,6\left(\frac{P}{T}\right) + 3,73 \times 10^5\left(\frac{P_w}{T^2}\right) - 4,03 \times 10^7\left(\frac{n_e}{f^2}\right) \quad (2.6)$$

A primeira parte do termo direito é denominada de componente seca, a segunda é a componente úmida e a terceira está relacionada com a contribuição da ionosfera, a qual é função da frequência do sinal ( $f$ ) e da densidade de elétrons ( $n_e$ ) (SAPUCCI et al., 2014). Dependendo da altitude algumas destas componentes da equação podem ser desprezadas. Considerando camadas da atmosfera onde o termo correspondente ao vapor d'água possa ser desprezado, por exemplo, na estratosfera e regiões da troposfera com temperaturas menores que 250 K (STEINER et al., 1999), a equação de estado para o ar seco toma a seguinte forma:

$$P = \rho R_d T \quad (2.7)$$

em que  $\rho$  é a densidade do ar e  $R_d$  a constante dos gases para o ar atmosférico seco,  $R_d$  igual a 287,058 J/(kgK), de forma que a equação anterior pode ser expressada como:

$$\rho = 0,3484 \frac{P}{T} \quad (2.8)$$

Substituindo a expressão 2.8 na componente seca da Equação 2.6, obtém-se a densidade do ar em  $kgm^{-3}$  a partir da refratividade. Levando em consideração a atmosfera em equilíbrio hidrostático, a pressão resulta da integração da equação:

$$\frac{dP}{dh} = -\rho g \quad (2.9)$$

em que  $h$  representa a altura e  $g$  a aceleração da gravidade.

Finalmente, substituindo a 2.9 em 2.8 pode-se calcular a temperatura. Nota-se que a obtenção dos perfis atmosféricos de  $P$  e  $T$ , considerando o caso de uma atmosfera seca e em equilíbrio hidrostático, é direto e relativamente simples (CDAAC, 2016). Porém, na baixa troposfera a estrutura da refratividade atmosférica torna-se mais complexa

devido ao efeito de multi-caminho e o termo úmido não pode ser desprezado. Por outro lado, quando o gradiente vertical da refratividade excede um valor de limiar determinado, de forma que o raio de curvatura do sinal é menor que o raio da Terra, ocorrem condições de super-refração (SR). Isso acontece quando o limiar é encontrado da forma  $\frac{dN}{dr} \leq \frac{-10^6}{R_c}$  em que  $R_c$  é o raio de curvatura da Terra, para um valor médio de  $R_c$ ,  $\frac{dN}{dr} \approx -0,157Nm^{-1}$  (KURSINSKI et al., 1997). Esse valor de limiar é amplamente usado para determinar se existem condições de super-refração na atmosfera. A reconstrução da refratividade a partir de dados mais brutos abaixo de camadas com condições de SR resulta em erros negativos na mesma (SOKOLOVSKIY, 2003). Em Jin et al. (2014) são referenciados vários estudos, nos quais se afirma que usando o método Rádio Holográfico se reduz significativamente o viés negativo nos perfis de refratividade de RO-GPS na baixa troposfera causado pela SR. Portanto, a derivação dos perfis atmosféricos, quando não é possível desprezar o termo úmido, torna-se mais complexa e é necessário o uso de informação externa (de modelos de PNT ou climatológica). Mais detalhes sobre a recuperação dos perfis atmosféricos podem ser encontrados Kursinski et al. (1997).

Em alguns estudos, como em Cucurull (2010), prefere-se o emprego de uma equação mais detalhada para a obtenção da refratividade na atmosfera neutra, como seria a Equação 2.10 proposta por Thayer (1974):

$$N = k_1 \left( \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left( \frac{P_w}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left( \frac{P_w}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (2.10)$$

em que  $P_d$  é a pressão do ar seco,  $P_w$  é a pressão do vapor d'água e  $T$  é a temperatura absoluta. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são constantes do índice de refratividade atmosférica, e  $Z_d^{-1}$  e  $Z_w^{-1}$  são considerados os fatores inversos da compressibilidade do ar seco e do vapor d'água, respectivamente, tendo em conta pequenas características a partir do comportamento de um gás ideal. O inverso da compressibilidade para o ar seco,  $Z_d^{-1}$ , é igual a 1,000588, considerando os valores de  $P = 1013,25hPa$  e  $T = 273,15K$ .

Em Cucurull (2010) as constantes do índice de refratividade fornecidas por Rüeger (2002) são usados ao invés dos coeficientes de Bevis et al. (1994), pois os autores explicam que esses são teoricamente mais precisas, embora possam introduzir vieses nos modelos quando usados sem considerar anomalias no comportamento do gás ideal. Em Healy (2009) é apresentado um estudo sobre a sensibilidade do uso desses coeficientes de refratividade no processo de assimilação de dados de RO-GPS, em que foi verificado fundamentalmente a necessidade de incluir os efeitos de um gás

não ideal, pois incertezas nesses coeficientes serão propagadas às aplicações dos mesmos. Os valores dessas constantes fornecidos por cada estudo são apresentadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Valores das constantes do índice de refração atmosférica para os dados de RO-GPS.

	Rüeger (2002)	Bevis et al. (1994)	Unidade
$k_1$	77,6890	77,60	K/mb
$k_2$	3,75463E+5	3,739E+5	$K^2$ /mb
$k_3$	71,2952	70,4	K/mb

A Equação 2.10, assim como a 2.6, são usadas nos sistemas de assimilação de dados como operador de observações, neste caso para obter a refração modelada. Os perfis atmosféricos de temperatura, pressão e pressão de vapor de água foram os primeiros a serem empregados para a PNT, mas na medida que os operadores de observações foram evoluindo, produtos menos processados mostraram melhores resultados na qualidade das previsões.

### 2.3 Missões espaciais equipadas com receptores GPS

Um único evento de ocultação dura aproximadamente 3 minutos (CUCURULL et al., 2007) e é capaz de fornecer cerca de 4.000 medidas por perfil (SAPUCCI et al., 2014). O grande volume de dados de RO-GPS fornecidos pelas missões de satélites LEO, permitiu que essas observações sejam uma das principais dentro da rede de observações baseadas em satélites, em nível de importância para a PNT.

Devido ao sucesso da missão GPS/MET, seguidamente foram lançadas várias missões espaciais de satélites LEO equipadas, entre outros, com receptores dos sinais GPS para RO-GPS. Entre eles cita-se: o Orsted em 1999 da Dinamarca que ainda está em operação; o SunSat (acrônimo do inglês *Stellenbosch University Satellite*) da África do Sul, o qual operou de 1999 até 2001 (EOPORTAL, 2016); o CHAMP (acrônimo do inglês *CHALLENGING Minisatellite Payload*), satélite alemão lançado em 2000 (WICKERT et al., 2001) e esteve em funcionamento até 2010; o SAC-C (acrônimo do espanhol *Satélite de Aplicaciones Científicas-C*), satélite argentino também lançado no ano 2000 e que forneceu informação até o ano 2013. A missão GRACE (acrônimo do inglês *Gravity Recovery and Climate Experiment*), como parte de um esforço colaborativo envolvendo o Centro de Pesquisas Espaciais (CSR, acrônimo

do inglês *Center for Space Research*) da Universidade do Texas, o Laboratório de Propulsão a Jato (JPL, acrônimo do inglês *Jet Propulsion Laboratory*) da NASA, o Centro Aeroespacial Alemão (DLR, acrônimo do alemão *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) e o Centro de Pesquisa em Geociências (GFZ, acrônimo do alemão *GeoForschungsZentrum*), foi lançada em 2002 (HEALY et al., 2007) e atualmente operacional. Da União Europeia, o primeiro do programa de satélites Meteorológicos Operacionais (MetOp) do Sistema Polar da EUMETSAT (EPS, acrônimo do inglês *European Organization for the Exploration of Meteorological Satellites Polar System*), foi o MetOp-A lançado em 2006. O TerraSAR-X foi lançado em 2007 (BEYERLE et al., 2011), como resultado de uma cooperação público-privada entre o DLR e a Companhia Europeia de Aeronáutica, Defesa e Espaço (EADS, acrônimo do inglês *European Aeronautic Defence and Space Company*) da Áustria. Ambos os satélites MetOp-A e TerraSAR-X estão atualmente em operação. A constelação de seis satélites FORMOSAT-3/COSMIC (acrônimo do inglês *Taiwan's Formosa Satellite Mission 3/Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), do consórcio entre Taiwan e os Estados Unidos, lançados em 2006 (ANTHES et al., 2008) dentre os quais cinco encontram-se atualmente em operação. O satélite indiano OceanSat-2, da Organização de Pesquisas Espaciais da Índia (ISRO, acrônimo do inglês *Indian Space Research Organization*), que foi lançado em setembro de 2009. Baseado no projeto da plataforma do SAC-C em junho de 2011 foi lançado o SAC-D/Aquarius como parte de uma missão cooperativa internacional entre a Comissão Nacional de Atividades Espaciais da Argentina (CONAE) e a NASA. O satélite Megha-Tropiques foi lançado em outubro de 2011 como parte de uma missão cooperativa experimental entre a ISRO e o Centro Nacional de Estudos Espaciais da França (CNES, acrônimo do francês *Centre National d'Études Spatiales*). Na atualidade, os satélites OceanSat-2, SAC-D/Aquarius e Megha-Tropiques encontram-se operacionais. O segundo satélite do programa MetOp do EPS, que foi o MetOp-B, lançado em 2012 (T.; RIGHETTI, 2015) e atualmente operacional. Todos esses satélites operaram entre 300-850 km de altitude sobre a superfície terrestre. A qualidade dos dados de cada receptor de medidas de RO tem sido avaliada, ressaltando-se o impacto positivo na previsão e monitoramento do tempo e clima, assim como a sua utilidade para pesquisas da ionosfera (*e.g.*, Kursinski et al. (1996), Poli et al. (2002), Healy and Thépaut (2006), Healy et al. (2007), Aparicio and Deblonde (2008), Buontempo et al. (2008), Anthes et al. (2008), Cucurull and Derber (2008), Rennie (2008), Anthes (2011)).

### 2.3.1 Dados de RO-GPS usando o satélite MetOp-B

O programa de satélites Meteorológicos Operacionais (MetOp) consiste de uma série de satélites meteorológicos LEO, em voo sucessivo desde 2006, e espera-se que o terceiro satélite dessa geração, o MetOp-C, seja lançado em 2018 (EUMETSAT, 2015). Os satélites MetOp são caracterizados por proverem dados para a PNT com uma melhor precisão e resolução espacial (EOPORTAL, 2016). Esse programa pretende continuar em funcionamento até 2020, quando planejam lançar a segunda geração dessa série, conhecidos como MetOp SG (do inglês *Second Generation*).

O satélite MetOp-B foi lançado em setembro de 2012, possuindo uma altitude de 827 km e um período de 101 minutos. O mesmo tem a bordo um conjunto de 11 instrumentos científicos, meteorológicos e climáticos, parte dos quais foram fornecidos pela NOAA, pelo CNES e pela Agência Espacial Europeia (ESA, acrônimo do inglês *European Space Agency*). Entre eles, se encontra uma nova geração de cinco instrumentos europeus que oferecem recursos aprimorados de detecção, citam-se: o GOME-2 (acrônimo do inglês *Global Ozone Monitoring Experiment -2*); o IASI (acrônimo do inglês *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*); o MHS (acrônimo do inglês *Microwave Humidity Sounder*); bem como o instrumento Receptor GNSS de Sondagem Atmosférica (GRAS, acrônimo do inglês *GNSS (acrônimo do inglês *Global Navigation Satellite System*) Receiver for Atmospheric Sounding*) (EUMETSAT, 2012).

O GRAS é um instrumento por meio do qual podem ser obtidos perfis de temperatura na troposfera e estratosfera com uma resolução vertical de 100 m na troposfera e 1,5 km na estratosfera, com precisão de 1 K sobre uma faixa de altitude de 5 a 50 km aproximadamente. Além disso, GRAS tem capacidade de medir a altura da tropopausa com uma precisão vertical melhor do que 1 km. Esse instrumento permite observar mais de 500 ocultações por dia, com distribuição relativamente uniforme sobre todo o globo, o que é particularmente relevante para PNT e o monitoramento do clima (EOPORTAL, 2016). A aplicação operacional mais importante para os dados produzidos pelo GRAS é a sua assimilação em modelos de PNT. A qualidade dos dados de refratividade provenientes do GRAS do MetOp-B mostraram-se coerentes com os dados do GRAS do MetOp-A (SYNDERGAARD, 2014).

## 2.4 Assimilação de dados de RO-GPS em vários centros

Com o desenvolvimento de técnicas avançadas de modelagem em computadores, a melhoria dos instrumentos de medição, o desenvolvimento de novas metodologias

(em especial as baseadas em satélites), e a densificação das redes terrestres de observações, bem como das técnicas de processamento de dados, tem-se alcançado uma melhoria nas previsões de tempo e clima (JIN et al., 2014). Porém, existe um grande esforço por parte dos centros operacionais de PNT em diminuir as incertezas presentes ainda nas respectivas previsões. Segundo Palmer and Hagedorn (2006), as previsões de tempo e clima são necessariamente incertas, existindo três razões fundamentais: incerteza nas observações usadas para definir o estado inicial da atmosfera (condição inicial ou análise dos modelos); incerteza no modelo de previsão usado (característica intrínseca); e incertezas em parâmetros externos (como conteúdo de  $CO_2$  e aerossóis na atmosfera).

Com vistas em prover uma condição inicial que produza a melhor previsão possível a partir de um modelo numérico, surge o processo denominado Assimilação de Dados, o qual combina uma previsão de curto prazo (FG, do acrônimo em inglês *First Guess*) com observações e busca uma solução chamada de análise que apresente um erro mínimo (KALNAY, 2003). A palavra análise é comumente definida como um exame detalhado de cada parte que compõe um todo, buscando compreender tudo aquilo que o caracteriza. Porém, deve esclarecer-se que especificamente no contexto da assimilação de dados o termo análise se refere, como foi mencionado anteriormente, à solução de mínima variância após a combinação estatística entre as observações e o FG. Durante a assimilação de dados, a análise criada deve ser consistente com o método numérico, dinâmica, física e resolução do modelo de previsão. Nesse processo são realizadas uma série de pequenas correções aos campos previstos pelo modelo com base na nova informação a partir das observações. A eficiência do processo é diretamente associada com a quantidade, qualidade e distribuição homogênea dos dados observacionais sobre todo o domínio do modelo.

A análise  $X_a$  (vetor com os estados analisados) para o caso multidimensional é obtida adicionando as inovações aos campos previstos pelo modelo de previsão ponderado pela matriz peso (representada pela razão entre as matrizes de covariância dos erros de observação e a soma das matrizes de covariância dos erros de background e de observação), que é determinada com base nas covariâncias estimadas dos erros estatísticos dos campos previstos pelo modelo e observações. Na equação seguinte se define a obtenção da análise como mencionado anteriormente:

$$X_a = X_b + (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} [Y_o - H(X_b)] \quad (2.11)$$

em que  $X_a$  é o campo da análise,  $X_b$  o campo de background ou first guess, que corresponde com a previsão de curto prazo do modelo,  $Y_o$  a matriz contendo as observações,  $H$  é o operador que realiza a interpolação e transformação das variáveis do modelo para o espaço e tempo das observações através do produto  $HX_b$ . Em Eyre (2008) se abordam as vantagens e desvantagens do tipo de operador a ser usado e em particular de RO-GPS, pois esses podem ser simples quando são assimiladas observações que passaram por vários pré-processamentos, ou complexos, o qual permite a assimilação de observações mais brutas. O resultado do cálculo de  $HX_b$  recebe o nome de observações simuladas ou modeladas. A comparação entre as observações e sua contraparte, as observações modeladas ( $Y_o - HX_b$ ), é conhecido como incremento observacional ou inovação. No processo de assimilação de dados esses incrementos observacionais são convertidos por meio de um processo de ponderação, em incrementos de análises, os que serão adicionados ao campo do background para a obtenção final da análise (EYRE, 2008).

A matriz peso estipula os diferentes pesos das informações contidas no background ( $B$ ) e o mesmo é feito pela matriz ( $R$ ) no que se refere as observações, estes atingem valores tanto maiores quanto menores sejam as incertezas associada a cada uma das informações a que eles se referem. O pesos oscilam entre 0 e 1, e a matriz se reduz a uma do tipo diagonal quando os erros não são correlacionados (independentes entre si). Segundo é reportado em Palmer et al. (2000), os erros de representatividade nas medidas, erros residuais a causa da correção ionosférica e os erros de heterogeneidade horizontal pelo uso da hipóteses de simetria esférica são os que mais contribuem na matriz dos erros das observações. Diferentes esquemas de análises foram desenvolvidos, dentre eles: o Método de Correções Sucessivas (SCM, acrônimo do inglês *Successive Correction Method*); Interpolação Ótima (OI, acrônimo do inglês *Optimal Interpolation*); Método Variacional Tridimensional e Quadridimensional (3DVar e 4DVar, acrônimo do inglês *Three-dimensional/Four-dimensional Variational Data Analysis*, respectivamente); e o EKF e por conjunto (EnKF, acrônimo do inglês *Ensemble Kalman Filter*), os quais baseiam-se em encontrar a análise, porém diferem pela abordagem adotada para combinar o FG e as observações para produzir a análise bem como na forma como é obtida a matriz de pesos. Uma forma de realizar a assimilação de dados é em modo cíclico, e é o usado operacionalmente nos principais centros de previsão de tempo. O ciclo de assimilação de dados é como uma integração longa do modelo de forma que o mesmo fique cada vez mais perto do estado real da atmosfera; tipicamente se usa um ciclo de 6 horas realizado 4 vezes ao dia. Em um ciclo de 6 horas para um modelo de escala global, o FG é tipicamente uma previsão de 6 horas anteriores ao horário da análise. Nesse processo existe uma

ligação total entre os módulos que compõem o sistema de assimilação e o sistema de previsão (KALNAY, 2003).

Vários estudos realizados reportam os benefícios das observações de RO na melhoria das previsões. Esta abordagem foi explorada em Eyre (1994), em que introduz como esses dados poderiam ser usados mais eficientemente no processo de assimilação de dados para a PNT. O autor afirma que a maneira mais promissora de utilizar esses dados é sua assimilação variacional em um modelo de circulação global atmosférica. Essa abordagem tem grandes vantagens em comparação com a reconstrução dos campos atmosféricos globais, dado que é possível assimilar uma quantidade de dados muito maior. Esta vantagem torna a abordagem variacional especialmente valiosa na situação em que apenas um satélite LEO está disponível, e é impossível providenciar uma alta resolução da sondagem da atmosfera (GORBUNOV; KORNBLUEH, 2003).

#### 2.4.1 RO-GPS no ECMWF

No ECMWF vários estudos foram realizados avaliando o impacto das observações de RO-GPS provenientes de diferentes missões de satélites LEO em seu sistema de assimilação e na qualidade das previsões geradas, entre eles: Healy and Eyre (2000), Healy and Thépaut (2006), Healy et al. (2007), Healy (2007), Healy (2008), Cardinali et al. (2011), Cardinali and Healy (2012), (BAUER et al., 2014), Bonavita (2014), entre outros. Em Healy and Eyre (2000) foi realizado um estudo de simulação em que desenvolveram um operador unidimensional (1D) para assimilar perfis de refratividade e recuperar informações de temperatura, vapor d'água e pressão em superfície. Posteriormente, em Healy and Thépaut (2006) se apresentam os primeiros experimentos de impacto da assimilação das medidas de RO da missão CHAMP nas previsões de tempo. Foram assimiladas medidas de ângulo de curvatura usando um operador 1D dentro do sistema variacional 4D-Var, sistema este operacional no centro desde novembro de 1997. Os resultados mostraram melhorias significativas estatisticamente no HS no campo de temperatura quando comparado com medidas de radiossondas.

Em Cardinali et al. (2011) foi apresentado o impacto relativo entre os principais componentes da rede de observações baseadas em satélites usando técnicas de sensibilidade a partir do método do adjunto. Nesse trabalho foi encontrado que o erro nas previsões curto prazo é reduzido em 16% pelas observações de temperatura do sensor de micro-ondas AMSU-A (acrônimo do inglês *Advanced Microwave Sounding Unit-A*), seguido pelos sensores de infra-vermelho IASI e AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) com uma redução de 12% cada um, entretanto as observações de

RO-GPS apontam para 6% de redução do erro nas previsões. Dentre os demais sensores, foi identificado que os dados provenientes de escaterômetros contribuem em 5% da redução, enquanto que o AMSU-B (acrônimo do inglês *Advanced Microwave Sounding Unit-B*), MHS e HIRS (acrônimo do inglês *High-Resolution Infrared Radiation Sounders*) apontam para 2-3%.

Em Bonavita (2014) foi examinado o impacto das observações RO-GPS na habilidade da PNT, através da execução de experimentos de assimilação e de previsão com a versão CY38R1 do ECMWF IFS (acrônimo do inglês *Integrated Forecasting System*) e o sistema de assimilação 4D-Var para gerar as análises. As medidas de RO-GPS foram assimiladas a partir dos ângulos de curvatura utilizando o operador de observação 1D descrito por Healy and Thépaut (2006). O autor verificou que, assimilando dados de RO-GPS pode-se recuperar de 30 a 70% da redução do erro de previsão de temperatura do sistema de observação completo em relação ao sistema de observação convencional quando verificado assumindo a análise operacional do ECMWF como verdadeira. O maior impacto foi encontrado na baixa estratosfera onde se assume que a precisão das medições é maior e os erros de observação são ajustados para valores relativamente menores.

#### 2.4.2 RO-GPS no MetOffice

Por sua vez, no MetOffice (acrônimo do inglês *Meteorological Office*) do Reino Unido, várias pesquisas foram também desenvolvidas com a assimilação de dados de RO-GPS, parte das quais foram realizadas em colaboração com o ECMWF. Entre outros, Eyre (2008) realizou um estudo preliminar em que se verificou que estas observações impactam substancialmente a realização da PNT nos sistemas operacionais. Buontempo et al. (2008) executaram dois experimentos assimilando os dados de RO dos satélites CHAMP e GRACE-A com o sistema 4D-Var. Os resultados mostraram um impacto positivo significativo na alta e baixa troposfera nos campos de temperatura e altura geopotencial, nas alturas geopotenciais na média troposfera e na pressão ao nível médio do mar sobre o HS. Rennie (2010) apresentou um estudo sobre a assimilação de dados de RO-GPS nesse centro, em que destaca que este foi o primeiro em assimilar esses dados de forma operacional. Esse trabalho resume brevemente quais foram as mudanças operacionais desde o ano 2006 até 2008 e ressalta que o maior impacto encontrado foi assimilando ângulos de curvatura.

### 2.4.3 RO-GPS no NCEP

No NCEP EMC (acrônimo do inglês *Environmental Modeling Center*) vários estudos foram empreendidos visando o uso das observações de RO-GPS em um marco operacional. Cucurull et al. (2007) apresentam os resultados preliminares da implementação de duas estratégias diferentes de assimilação. Foram realizados vários experimentos para comparar os benefícios da assimilação de sondagens de ângulo de curvatura e dos perfis de refratividade separadamente. Os resultados mostraram os benefícios que podiam-se alcançar ao assimilar dados de RO-GPS nas análises e previsões de tempo, tanto de ângulo de curvatura como perfis de refratividade. Foi encontrado um impacto positivo sobre os campos de vento, devido à propagação de informações através das correlações dos erros do background. Algumas deficiências foram encontradas para o HN, que fizeram com que continuaram aperfeiçoando os operadores para sua introdução na operação.

Em Cucurull and Derber (2008) apresentam-se alguns resultados usando a constelação de satélites COSMIC para sua futura aplicação dentro do sistema de assimilação de dados globais do NCEP e como uma medida de teste para melhorar o operador de assimilação das observações de ângulo de curvatura no centro. O sistema de assimilação operacional e usado pelos autores para a realização dos experimentos foi o GSI acoplado ao modelo GFS (acrônimo do inglês *Global Forecasting System*).

Finalmente, em maio de 2012, foi substituída a assimilação de refratividades com a implementação de um Método de Ângulo de Curvatura do NCEP (NBAM, do acrônimo em inglês *NCEP's Bending Angle Method*). Uma descrição detalhada e a avaliação deste método, bem como as vantagens que oferece o código empregado sobre a refratividade podem ser encontrada em Cucurull et al. (2013). Nesse sentido, ligeiras melhorias na qualidade da previsão de tempo foram obtidas para todos os níveis e para todas as variáveis do modelo em comparação com a assimilação de refratividade. Foi demonstrado também que o ângulo de curvatura, como um produto anterior à refratividade, é mais robusto para alterações no processamento dos dados fora dos centros de PNT.

Um atrativo adicional destas medidas foi explorado neste centro. Em Cucurull et al. (2014) verificou-se o uso delas para ancorar a correção do viés nas medições de radiância. Isso devido a que as medidas de RO-GPS fornecem informações independentes e auto-calibradas podendo ser assimiladas sem correção de viés, a diferença da maioria das outras observações de satélite que exigem correção do viés para entrarem no modelo de previsão. O resultados mostraram que, em geral, ao assimilar

dados de RO-GPS se produz um uso mais efetivo das radiâncias de satélites e um maior número dessas observações passam pelos controles de qualidade. Adicionalmente, Cucurull and Anthes (2014) confirmam o rol das observações de RO para ancorar observações nos modelos de PNT, ressaltando-se melhorias na correção do viés das radiâncias de satélites. Nesse estudo se enfatiza a complementariedade das observações de RO, micro-ondas e infra-vermelho para incrementar a habilidade de previsão dos modelos e gerar previsões com um viés mínimo.

Nos trabalhos mencionados, uma melhoria nas previsões é coincidentemente encontrada para o HS. Em Bonavita (2014) se confirma que isso pode ser atribuído à diferença na quantidade de observações convencionais, sendo que no HS se conta com aproximadamente 5% do total de observações de radiossondas e reportes de aeronaves disponíveis nos extratropicais do HN.

#### 2.4.4 RO-GPS na Oficina de Meteorologia da Austrália

Como parte da iniciativa australiana, visando os benefícios encontrados para o HS em outros centros de previsão, a Oficina de Meteorologia da Austrália realizou um primeiro experimento avaliando o impacto dos benefícios das observações de RO-GPS nas previsões sobre o HS e em especial sobre a Região Australiana. Detalhes podem ser encontrados em Marshall et al. (2010). Nesse foram assimilados perfis de refratividade provenientes dos satélites COSMIC/FORMOSAT-3, MetOp-A e GRACE, usando um sistema de assimilação variacional 4D-Var no sistema global ACCESS-G (acrônimo do inglês *Australian Community Climate and Earth-System Simulator*), para um tempo de integração de 5 dias. As previsões usando dados de RO mostraram uma melhoria na baixa, média e alta troposfera, indicando seu uso como potencial para as previsões e análises na Região Australiana bem como para as reanálises regionais e estudos climáticos.

O sucesso desse trabalho inspirou a realização de mais pesquisas sobre a RO na Austrália. Tanto assim, que no ano 2013 fora apresentado no Simpósio Internacional de GPS, realizado nesse país, uma nova plataforma australiana de processamento de dados de RO-GPS (ZHANG et al., 2013). A ideia surgiu do fato de que apenas um número limitado de centros de pesquisa tem uma capacidade total de processamento de dados de RO-GPS e portanto os produtos de RO publicamente disponíveis. A plataforma SCORP (acrônimo do inglês *SPACE Centre Radio Occultation Processing*), desenvolvida no Centro de Pesquisa Espacial da Universidade RMIT (acrônimo do inglês *Royal Melbourne Institute of Technology*), é semelhante à UCAR (acrônimo do inglês *University Corporation for Atmospheric Research*), em que o trabalho de

processamento de dados começa a partir das observações GPS brutas recebidas nos satélites LEO. Nessa é incluído um módulo de assimilação de dados 1D-VAR, que recupera os perfis de pressão, temperatura e umidade do perfil de refratividade medido, o conhecimento a priori do estado da atmosfera (perfis de background) e os erros associados. Com isto, o trabalho de análise de dados pode ser realizado em diferentes níveis do produto da RO, sendo de alta importância para múltiplas áreas de pesquisa, tanto para previsões a curto prazo quanto para climatologia.

#### **2.4.5 RO-GPS na Argentina**

Na Argentina pesquisas realizadas na Universidade Austral tem explorado a RO-GPS como uma ferramenta útil tanto para a PNT como para o monitoramento do clima. [Hierro et al. \(2012\)](#) realizaram um estudo dos padrões climáticos sobre a AS com dados de perfis atmosféricos derivados da RO-GPS do COSMIC. Nesse estudo foram reproduzidos os principais sistemas de grande escala atuantes na baixa e média troposfera, na região global bem como sobre a AS. Posteriormente, em [Hierro et al. \(2013\)](#) foi realizada uma análise mais regional sobre os modos de oscilação da umidade sobre a Amazônia baseada nos perfis atmosféricos de RO-GPS do COSMIC. Aplicando diferentes filtros recursivos (espaciais e temporais) foi possível observar os modos de oscilação da umidade específica integrada, reafirmando que essa região apresenta o maior conteúdo de água no HS. Estes resultados destacam as capacidades da técnica de RO, porém dentre os produtos de RO-GPS apenas são usados perfis atmosféricos derivados da refratividade. Além disso, resultados mais aprimorantes poderiam ser encontrados usando algoritmos de assimilação de dados.

#### **2.4.6 RO-GPS no CPTEC/INPE**

No Brasil, o CPTEC/INPE é o centro mais avançado de previsão numérica de tempo e clima da América Latina, fornecendo operacionalmente desde 1995, previsões de tempo de curto e médio prazos e climáticas ([INPE, 2011](#)). No sistema de PNT deste centro o processo de assimilação de dados de RO-GPS transitou por várias etapas. Segundo [Herdies et al. \(2008\)](#), em 1998 iniciaram-se as atividades relacionadas à assimilação de dados, sendo primeiramente regional, usando o modelo Eta e o esquema de assimilação PSAS realizando as análises em modo cíclico, com a primeira versão pré-operacional em 1999. Uma versão global foi desenvolvida no final de 2000, com a primeira versão pré-operacional em 2002. A assimilação de dados em ambas as aplicações: regional e global, ficaram operacionais em 2004. Entre os anos 2004 até o ano 2013 o sistema de assimilação utilizado operacionalmente foi o PSAS acoplado ao MCGA, modelo global operacional no centro. O PSAS difere dos esquemas varia-

cionais no fato que este é formulado diretamente no espaço das observações ao invés do espaço do modelo (COHN et al., 1998). Nesse sistema de assimilação só era possível assimilar dados de RO-GPS após vários níveis de processamento. Em Sapucci et al. (2014) foram realizados experimentos assimilando perfis atmosféricos da altura geopotencial e umidade, obtidos da constelação COSMIC. Foi demonstrado um impacto positivo na qualidade das previsões, aumentando a correlação das anomalias previstas com as anomalias das análises, o que pode estar relacionado à escassez de dados em altos níveis em algumas regiões do modelo global.

Em janeiro de 2013 o G3D-Var substituiu o PSAS como o sistema oficial de análise no CPTEC/INPE. Em um estudo realizado pelo grupo de desenvolvimento em assimilação de dados deste centro, utilizando o G3D-Var como sistema de assimilação, encontrou-se uma melhoria na qualidade das análises com um aumento da capacidade de gerir um maior número de observações rotineiramente. Isso é devido à assimilação de radiâncias dos satélites de maneira direta (quantidade total de observações na ordem de  $10^6$ ), ao invés da assimilação de radiâncias de maneira indireta, utilizando a técnica de recuperação, o que limitava o sistema de assimilação anterior (na ordem de  $10^5$ ). Por outro lado, com o G3D-Var também foi possível assimilar um nível superior de processamento dos dados de RO-GPS, nesse caso de perfis de refratividade dos satélites GRACE-A, TerraSAR-X, MetOP-A e FORMOSAT-3/COSMIC. Com esse trabalho validou-se que o G3D-Var é eficiente em reduzir a propagação das diferenças médias globais, por exemplo menor valor de OmA (Observação menos Análise), quando comparado ao valor de OmB (Observação menos Background).

Em Azevedo (2014) foi identificado, dentre os sistemas de observação como satélites, GPS e radiossondas, quais exercem os maiores impactos nas análises e previsões do CPTEC. Uma diminuição do Erro Quadrático Médio (RMSE, acrônimo do inglês *Root Mean Square Error*) encontrou-se na região do HS para a variável altura geopotencial em 500 hPa, quando são incorporadas as refratividades dentro do sistema de assimilação, muito similar ao resultado com as radiâncias de satélites.

Sapucci et al. (2016) apresentaram um estudo sobre o impacto da assimilação de dados de RO-GPS na melhoria do desempenho do MCGA do CPTEC. Os dados de RO-GPS assimilados foram os provenientes do satélite COSMIC dentro do sistema LETKF acoplado ao MCGA, embora este sistema de assimilação é usado para a realização de pesquisas e não dentro da operação. Os autores apresentam uma breve comparação entre as vantagens e desvantagens do uso de um operador de ob-

servações, de ângulo de curvatura e de perfis de refratividade, preferindo o uso da refratividade por apresentar um operador de observações mais simples. O operador de RO-GPS empregado foi o disponível no Pacote de Processamento de Rádio Ocultação (ROPP, acrônimo do inglês *Radio Occultation Processing Package*) do ROM SAF/EUMETSAT (acrônimo do inglês *Radio Occultation Meteorology Satellite Applications Facilities/EUMETSAT*). Os resultados encontrados indicam um impacto positivo na altura geopotencial em 500 hPa sobre o HS e a AS, além de um significativo impacto positivo sobre a região Tropical. Destaca-se que os resultados sobre a AS foram significativamente positivos em todas as variáveis avaliadas e durante os 5 dias de integração do modelo. Nesse trabalho também são discutidos alguns elementos limitantes no MCGA e que serão usados como ponto de referência para a realização da presente pesquisa.

Recentemente, [Diniz \(2016\)](#) avaliou o impacto fracional das observações no CPTEC. Nesse trabalho foram assimiladas todas as observações convencionais e não convencionais disponíveis no centro em janeiro de 2013, usando o sistema G3D-Var. Um impacto fracional de aproximadamente 27% foi encontrado para as observações de radiossonda. O segundo maior valor foi obtido pelas observações de RO-GPS, de 24% de impacto. A seguir encontrou-se que o AMSU-A contribui em 17% e o IASI em 16% do impacto fracional.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais usados no desenvolvimento desta pesquisa, dentre eles os dados disponíveis e uma breve descrição dos softwares empregados. Seguidamente são apresentadas a metodologia a ser aplicada para a realização dos experimentos numéricos e a avaliação dos resultados obtidos.

#### 3.1 Materiais

Nessa seção são apresentados os softwares disponíveis para o desenvolvimento do presente estudo. Dentro desses, o modelo global de PNT do CPTEC, o sistema de assimilação GSI e o sistema de avaliação de modelos denominado SCANTEC serão abordados e descritos em detalhes. O software SVN também é apresentado, pois ele é responsável pelo ambiente corporativo de desenvolvimento utilizado nessa pesquisa, o qual permite o fluxo eficiente de contribuições no CPTEC.

##### 3.1.1 Dados disponíveis

O Sistema Global de Telecomunicações (GTS, acrônimo do inglês *Global Telecommunication System*) é o sistema internacional de disseminação de informação meteorológica que forma parte do programa de Vigilância Meteorológica Mundial (WWW, acrônimo do inglês *World Weather Watch*), estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, acrônimo do inglês *World Meteorological Organization*), e usado nos Serviços Meteorológicos Nacionais através de todo o mundo. Essa rede segura de comunicações permite o intercâmbio de informação em tempo real, o qual é de grande importância para as previsões e alertas de perigos hidrometeorológicos (EUMETSAT, 2017). O formato padrão aprovado pela WMO em 1988 para a disseminação desses dados é o Formato Universal Binário para a Representação de dados meteorológicos (BUFR, acrônimo do inglês *Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*). No NCEP é realizado um processo onde a maioria das observações são preparadas para a assimilação de dados mediante da aplicação de controles de qualidade. Os arquivos BUFR preparados são conhecidos pelo termo PreBUFR (LI et al., 2011).

O intercâmbio dos dados e produtos entre os membros da WMO pode ser realizado via Protocolo de Transferência de Arquivo (FTP, acrônimo do inglês *File Transfer Protocol*), através de correio eletrônico (eMail) ou via Protocolo de Transferência de Hipertextos (HTP, acrônimo do inglês *Hypertext Transfer Protocol*) (NOAA, 2013). No CPTEC/INPE os dados são rotineiramente recebidos a partir de várias fontes,

atualmente os usados para sua assimilação no CPTEC/INPE são os recebidos via FTP.

A fim de atingir os objetivos propostos, os dados convencionais assimilados contém: observações de ventos zonal e meridional; temperatura; umidade específica; e pressão à superfície, obtidas por meio de radiossondas, dropsondas, estações de superfície continental e marítima, sensores em aeronaves; balões pilotos e perfiladores. As observações advindas de satélites incluíram os dados de radiâncias: do MHS a bordo dos satélites NOAA-18 e -19 e do satélite MetOp-A; do HIRS/4 a bordo dos satélites NOAA-18 e -19 e do satélite MetOp-A; do AIRS a bordo do satélite Aqua; do AMSU-A a bordo dos satélites NOAA-15 e -18 e do satélite MetOp-A; e do IASI a bordo do satélite MetOp-A e -B. Incluíram-se também, os vetores de movimento atmosférico obtidos por imagens de satélites. Os dados de RO-GPS assimilados foram os perfis de refratividade e ângulos de curvatura derivados dos receptores: Receptor GPS de Ocultação Integrado (IGOR, acrônimo do inglês *Integrated GPS Occultation Receiver*), a bordo dos satélites COSMIC (FM1, FM2, FM4, FM5, FM6) e TerraSAR-X; e GRAS, a bordo dos satélites MetOp-A e -B. Na Tabela 3.1 se apresentam as observações assimiladas (indicadas pelo símbolo  $\checkmark$ ) especificando sua fonte e o mnemônico com que se identifica segundo as tabelas do NCEP. Seguidamente na Tabela 3.2 são mostradas as observações de radiâncias, detalhando as informações por sensores e satélites, mediante o símbolo  $\checkmark$ . Por último, na Tabela 3.3 apresentam-se as observações de RO-GPS particularizando suas fontes de procedência, ou seja, receptores de sinais GPS e satélites, indicadas pelo mesmo símbolo que as anteriores.

Na Figura 3.1 é apresentado um exemplo da cobertura espacial dos dados disponíveis para serem assimilados no CPTEC/INPE. As figuras mostram as observações convencionais, de radiâncias e de RO-GPS para o tempo de análise das 1200 UTC do dia 10 de agosto de 2014 (2014081012). Entre elas pode-se observar a desigual distribuição global das observações convencionais e de radiâncias de satélites. Diferente disso e como uma característica própria, os dados de RO-GPS mostram uma distribuição global randômica cobrindo igualmente os oceanos e continentes. Ainda entre os dois produtos de RO-GPS apresentados nas Figuras 3.1(e) e 3.1(f), se observa uma maior quantidade de observações de ângulos de curvatura que de perfis de refratividade. Os resultados após assimilar esses dados são apresentados no próximo capítulo.

Tabela 3.1 - Observações assimiladas no desenvolvimento esta pesquisa segundo a sua fonte.

Fontes	Mnemônico	Observações								
		U	V	T	q	$P_s$	$T_b$	N	$\alpha$	IPW
Radiossondas	ADPUPA	✓	✓	✓	✓	✓				
Dropsondas	ADPUPA	✓	✓	✓	✓	✓				
	SFCSHP	✓	✓	✓	✓	✓				
Estações de superfície continental	ADPSFC					✓				
	SFCSHP	✓	✓	✓	✓	✓				
Sensores em aeronaves	AIRCFT	✓	✓	✓						
Balões pilotos	PIBAL	✓	✓							
Perfiladores	PROFLR	✓	✓							
Vetores de movimento atmosférico	SATWND	✓	✓							
RO-GPS								✓	✓	
IPW-GPS	GPSIPW									✓
Radiâncias							✓			

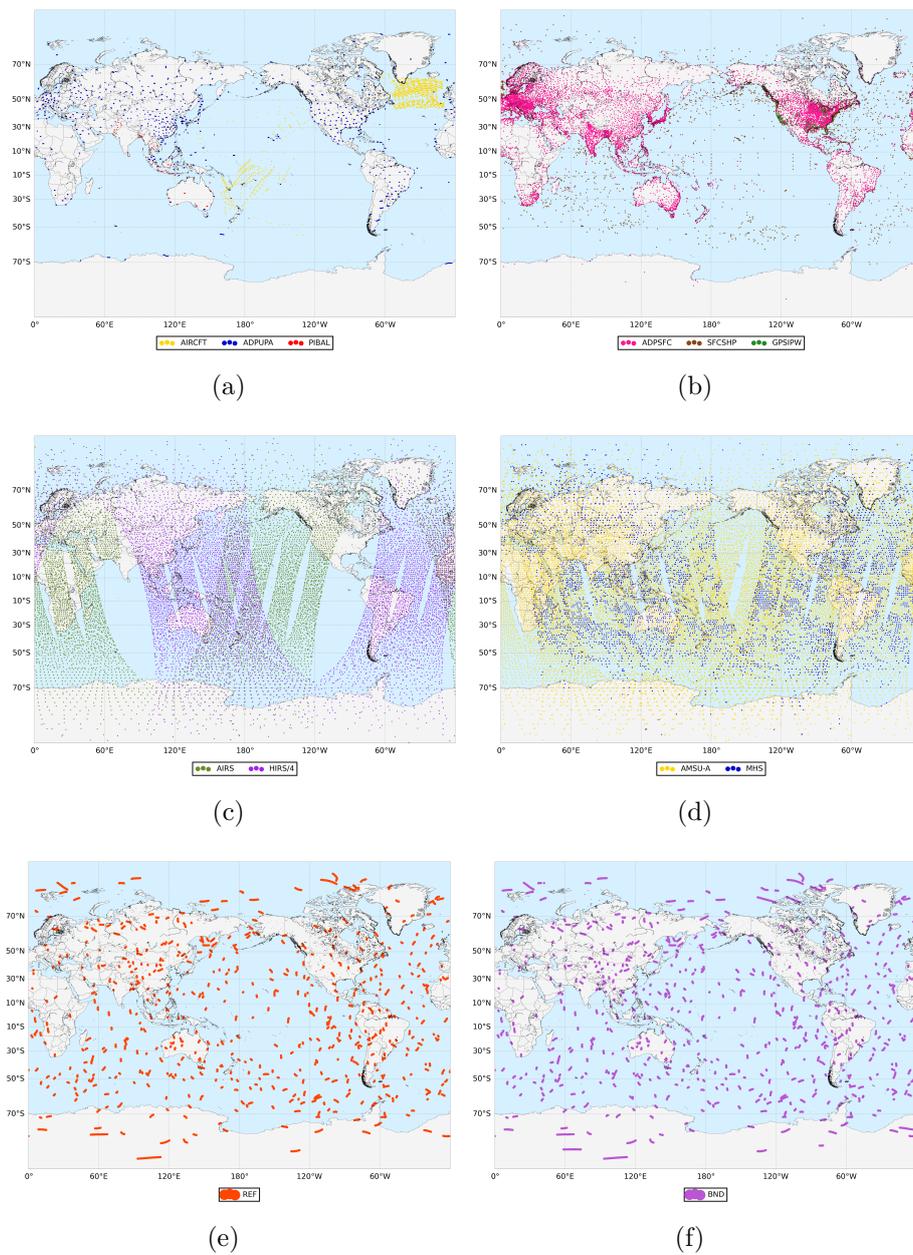
Tabela 3.2 - Observações de radiâncias assimiladas segundo os sensores e satélites que as fornecem.

Sensores	Satélites					
	n15	n18	n19	MetOp-A	MetOp-B	Aqua
MHS		✓	✓	✓	✓	
AMSU-A	✓	✓	✓	✓	✓	
HIRS/4			✓	✓	✓	
IASI				✓	✓	
AIRS						✓

Tabela 3.3 - Observações de RO-GPS assimiladas segundo os receptores e satélites que as fornecem.

Receptores	Satélites						
	FM1	FM2	FM4	FM5	FM6	MetOp-A	MetOp-B
IGOR	✓	✓	✓	✓	✓		
GRAS						✓	✓

Figura 3.1 - Distribuição espacial típica das observações convencionais provenientes de: (a) de radiossondas (ADPUPA), balões pilotos (PIBAL) e aeronaves (AIRCFT); (b) superfície continental (ADPSFC) e marítima (SFPSHC) e GPS (GPSIPW); (c) radiâncias dos sensores de micro-ondas, AMSU-A e MHS, e (d) radiâncias dos sensores de infra-vermelho -HIRS/4 e AIRS; (e) perfis de refatividade e (f) ângulos de curvatura disponíveis para serem assimiladas no dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC, no CPTEC/INPE.



### 3.1.2 Modelo global de PNT do CPTEC

Considerando que um dos focos principais do CPTEC é a previsão numérica de tempo visando o benefício da sociedade, o centro iniciou 2016 com um novo modelo de previsão do tempo, o BAM (acrônimo do inglês do inglês *Brazilian Global Atmospheric Model*) (FIGUEROA et al., 2016), o qual inclui um novo núcleo dinâmico e o estado da arte em esquemas de parametrizações. O núcleo dinâmico incorpora um esquema semi-lagrangiano de dois passos de tempo monotônico, que é realizado na grade do modelo para o transporte tridimensional de umidade, variáveis prognósticas da microfísica e traçadores (GDAD, 2016c). Este modelo é uma versão original adaptado do MCGA, o qual teve como origem a versão 1.7 do modelo global do Centro de Estudos do Oceano-Continente-Atmosfera (COLA, do inglês *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies*) implementado no CPTEC ao iniciar as suas atividades operacionais de PNT global, em novembro de 1994 (ARAVÉQUIA; QUADRO, 2003).

O MCGA, enquanto operacional, era usado tanto para previsão de tempo quanto para previsão de clima experimental, sendo executado para PNT nas resoluções T126L28, T213L42 e T299L64, com previsões de até 7 e 15 dias. Nas especificações das resoluções do modelo, o T designa truncamento triangular nas ondas zonais que representam uma grade horizontal de aproximadamente 100 km, 60 km e 40 km, respectivamente, próximo à linha do Equador, entanto que o L designa o número de níveis na vertical. De acordo com Bonatti (2015), este modelo resolve as equações primitivas representativas das leis físicas que regem os movimentos da atmosfera e as interações com a superfície, usando coordenadas horizontais esféricas e vertical sigma, harmônicos esféricos na horizontal (espectral) e diferenças finitas na vertical e no tempo. A integração no tempo pode ser euleriana semi-implícita ou semi-lagrangeana 3D com filtro de Asselin. As grades onde são representadas as saídas são gaussianas quadráticas ou lineares, completa ou reduzida. Um dos desenvolvimentos dos últimos anos em que se obteve uma melhoria nas previsões foi a geração da condição inicial, a partir da assimilação de dados com o sistema G3D-Var. O G3D-Var era habitualmente implementado sobre T299L64, o que representa uma resolução horizontal com truncamento triangular quadrático de 299 ondas em torno do globo e resolução vertical de 64 níveis com coordenada sigma. Sendo uma grade quadrática, o espaçamento de grade horizontal é em torno de 40 km no Equador (900×450 pontos de grade horizontais). Porém, vários erros foram encontrados no MCGA para resoluções horizontais da ordem  $O(10 - 100)$ , tais como: um excesso na precipitação sobre os oceanos na região tropical; viés úmido sobre a Cordilheira

dos Andes; precipitação espúria perto das montanhas nas altas latitudes; entre outros. Esses erros foram o motivo fundamental para o desenvolvimento de um novo modelo global no CPTEC. Mais detalhes sobre o núcleo dinâmico, os processos de superfície, microfísica de nuvens, esquema de radiação e convecção implementados no BAM podem ser encontrados em [Figuroa et al. \(2016\)](#).

Atualmente existe um esforço da Divisão de Modelagem e Desenvolvimento do CPTEC/INPE (DMD-CPTEC/INPE) de colocar assimilação de dados dentro do novo modelo, em uma versão que, entre outras, permita assimilar produtos menos processados de RO-GPS. Um primeira versão já foi desenvolvida, porém se encontra em fase de avaliação.

### 3.1.3 Sistema de assimilação GSI

O sistema GSI foi inicialmente desenvolvido pela NOAA e o NCEP como um sistema de análise de próxima geração baseado no anterior sistema operacional, o sistema de análise SSI (acrônimo do inglês *Spectral Statistical Interpolation*) ([DTC, 2016](#)). Este é um sistema variacional de assimilação de dados em 3D ou 4D, que no NCEP foi implementado operacionalmente em maio de 2007 acoplado ao modelo de previsão global GFS. Ao assimilar dados de RO-GPS do COSMIC no GSI/GFS, foi encontrada uma redução significativa do RMSE estratosférico e do viés na temperatura para todas as latitudes ([ANTHES et al., 2008](#)). Com o uso desse sistema é possível realizar uma análise atmosférica sobre um domínio específico (global ou regional). A partir da versão 3.3 o GSI suporta um sistema híbrido conjunto-3DVar, além do sistema 3D/4DVar. O sistema G3D-Var é baseado no GSI (versão 3.1) acoplado no MCGA, embora atualmente na DMD-CPTEC/INPE ambas as possibilidades de aplicação vem sendo utilizadas nas atividades com assimilação de dados.

No sistema GSI (3D-Var), a análise  $X_a$  é encontrada pela minimização da função custo ( $J$ ) mostrada na equação seguinte ([DTC, 2016](#)):

$$J = \frac{1}{2}(X - X_b)^T B^{-1}(X - X_b) + \frac{1}{2}(HX - O_o)^T O^{-1}(HX - O_o) + J_c \quad (3.1)$$

em que os termos  $X_b$ ;  $B$ ; e  $H$  possuem o mesmo significado que na Equação 2.11, entanto que  $X$  representa o campo de uma determinada variável;  $O_o$  a matriz de observações, mesmo que  $Y_o$  na Equação 2.11;  $O$  é a matriz covariância dos erros das observações, mesmo que  $R$  na Equação 2.11; e  $J_c$  representa os termos limitantes (por exemplo: dinâmicos e úmidos). A função  $J$  representa a distância ponderada entre um campo  $X$  e o background, e a distância ponderada entre essa análise

e as observações. O mínimo dessa função é encontrado para  $X = X_a$ , a qual é chamada de análise (KALNAY, 2003). O problema da minimização de  $J$  é resolvido por algoritmos numéricos iterativas, dentre eles se encontra o cálculo do gradiente conjugado expressado por:

$$\nabla_x J = 0 \quad (3.2)$$

Na versão 3.3 do GSI são adicionadas outras opções de minimização, além da anterior, tais como a minimização usando a pré-condição da raiz quadrada de B ( $\sqrt{B}$ ) e o gradiente Bi-conjugado. Uma descrição detalhada de cada versão do sistema GSI, a disponibilidade de download e tutoriais para seu uso podem ser encontradas em DTC (2016). Por sua vez, em GDAD (2016a) se apresenta uma documentação bastante completa sobre o processo de assimilação de dados, o GSI e o uso do mesmo no CPTEC, além disso, também podem ser encontradas informações sobre o funcionamento do GSI enquanto aos dados de entrada no sistema, a estrutura do código do GSI e um exemplo das saídas do mesmo.

O vetor com as variáveis de controle de minimização no GSI é composto pelas seguintes variáveis: função de corrente; velocidade potencial, temperatura, pressão em superfície e umidade pseudo-relativa desbalanceadas; razão de mistura do ozônio; e total de água condensada nas nuvens. Após o GSI completar a minimização da função custo, os campos atualizados são levados às variáveis do modelo de previsão como pressão em superfície, temperatura virtual, divergência, vorticidade, umidade específica, ozônio e água líquida de nuvens.

Atualmente no CPTEC, as análises continuam sendo realizadas em modo cíclico, mas antes de começar o ciclo de assimilação, se realiza um “pré-processamento” das condições iniciais da atmosfera fornecidas pelo NCEP, com as quais é gerada a primeira previsão usando o modelo global operacional no centro. O seguinte passo corresponde à execução da *Interface*, na qual é realizado o *Pré-processamento* do background do modelo de previsão do CPTEC para o formato e variáveis de entrada do GSI. Na próxima etapa o GSI é protagonista principal com a realização da *Análise*, onde as informações pré-processadas são utilizadas para gerar a condição inicial para o modelo. Este sistema assimila as observações guardadas em formato BUFR, com as características especificadas pelo NCEP, ou em formato PreBUFR, uma vez que foram processadas por esse centro. O GSI também precisa ler informações específicas a partir de arquivos estatísticos, de configuração, de correção de viés e arquivos contendo os coeficientes para o Modelo Comunitário de Transferência Radiativa (CRTM, acrônimo do inglês *Community Radiative Transfer Model*). Os da-

dos contidos nesses arquivos são parâmetros fixos, dentre eles citam-se: arquivos dos erros do background; dos coeficientes de emissividade da superfície infra-vermelho, de aerossóis, de emissão e espalhamento de nuvens, de transmitância; entre outros. Como cada sistema operacional é diferente, para cada um deles o conjunto de arquivos fixos varia de acordo com o modelo de previsão empregado, como por exemplo, o arquivo com as covariâncias dos erros do background (matriz  $B$ ). Uma vez calculado o estado de menor variância da atmosfera (*Análise*) é realizado novamente um *Pré-processamento* no qual as variáveis de saída do GSI são convertidas para o formato e variáveis de entrada do modelo. Por fim, é realizada a *Previsão*, onde o modelo recebe como condição inicial a análise gerada pela etapa anterior, a qual é integrada por um período de 9 horas com arquivos de saídas a cada hora, resultando nas previsões do modelo (GDAD, 2016b). Com a previsão de 6 horas gerada, o ciclo é reiniciado incluindo novas observações para o horário seguinte. Resumindo, o ciclo de assimilação no CPTEC inclui as etapas *Interface*, *Análise*, *Pré-processamento*, *Previsão* e assim sucessivamente. No caso que se deseje realizar uma integração mais longa do modelo, por exemplo 120 horas, o processo consiste em usar a análise gerada pelo GSI como condição inicial e configurar o modelo para o tempo de previsão de interesse. Na execução do processo de assimilação para um período de integração de 120 horas são usados um total de 240 processadores no supercomputador Cray XT6 do CPTEC/INPE.

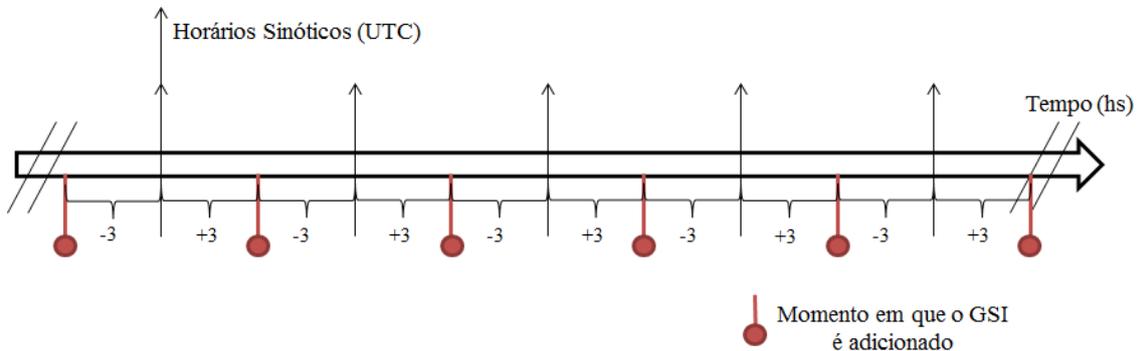
Se os dados de RO-GPS estão disponíveis para adicioná-los ao total de observações dentro da janela de tempo de um passo do ciclo de assimilação, então eles podem ser considerados adicionalmente no segundo termo da função custo. Na Figura 3.2 se apresenta o exemplo de um ciclo de assimilação de 6 horas em que todas as observações disponíveis são assimiladas dentro de um intervalo de  $\pm 3$  horas centradas nos horários em cada passo do ciclo de assimilação.

### 3.1.4 Portal SVN

O SVN (acrônimo do inglês *Subversion*) é um sistema de controle de versões que está disponível para seu uso pela comunidade do CPTEC. Ele está integrado ao sistema Redmine, software mediante o qual é gerenciado o desenvolvimento dos códigos de forma otimizada e compartilhada, com funcionalidades para a sua documentação.

O SVN tem suas origens no CVS (acrônimo do inglês *Concurrent Versions System*), a qual foi uma ferramenta bastante usada para controle de versão por muitos anos. Devido a diversas limitações no CVS, foi desenvolvido o SVN que se tornou “auto-gerenciável” em 31 de Agosto de 2001. Ou seja, os desenvolvedores do SVN pararam

Figura 3.2 - Esquema de uma janela de tempo de um passo do ciclo de assimilação de 6 horas,  $\pm 3$  horas entorno dos horários sinóticos.



Fonte: Adaptado de Sapucci et al. (2010).

de usar o CVS para gerir seu próprio código-fonte, e começaram a usar o SVN no lugar. O SVN mostrou-se superior enquanto: versionamento de diretórios; histórico de versões efetivo; versionamento de metadados; escolha das camadas de rede; manipulação consistente de dados; ramificações e rotulagem eficiente. Uma documentação bem detalhada com exemplos práticos podem ser encontrados em Collins-sussman et al. (2007).

O CPTEC usa ativamente o SVN como portal de Gerenciamento de Projetos e Controle de Versões. No mesmo são apresentados e organizados os projetos mantidos pelo grupo em termos de documentação, gerenciamento de tarefas, códigos e atividades pertinentes. Um dos projetos gerenciados nessa plataforma é o G3D-Var, e uma documentação com as instruções para obtenção, instalação, configuração e utilização do sistema no supercomputador CRAY XE6 do CPTEC/INPE é apresentada (GDAD, 2016b). A partir da informação contida nesse portal foi possível a aprendizagem referente à implementação e interação com o G3D-Var na presente pesquisa. O Sistema de Modelagem Global (SMG) é outro projeto que está sendo desenvolvido e mantido pela DMD-CPTEC/INPE, o qual contempla a modelagem global usando o BAM, o sistema de assimilação de dados GSI e um sistema de perturbação da análise para previsão por conjunto, o SPCON (*Sistema de Previsão por Conjunto*). O SMG foi também usado durante o desenvolvimento desse trabalho contribuindo no aprimoramento do mesmo desde o ponto de vista da documentação e uso do sistema. O Sistema Comunitário de Avaliação de modelos Numéricos de Tempo e Clima (SCANTEC) faz parte do projeto Sistema de Avaliação de Modelos (SAM), outro dos projetos desenvolvido e gerenciado através do uso do SVN na

DMD-CPTEC/INPE. Esse sistema foi usado para a avaliação dos resultados obtidos e será abordado em detalhes na próxima seção.

Nota-se que o SVN foi amplamente utilizado suportando o desenvolvimento da presente pesquisa e com a finalidade de que o trabalho aqui desenvolvido seja incorporado diretamente na versão em uso no grupo de desenvolvedores e posteriormente na assimilação operacional.

### 3.1.5 Software SCANTEC

Com vista a avaliação estatística dos resultados das simulações numéricas produzidas é de muita utilidade o uso de softwares de avaliação. Sapucci et al. (2010) afirma que para que toda a atividade ligada a PNT e Clima (PNTC) obtenha sucesso e constantes aprimoramentos, é fundamental o uso de ferramentas adequadas para a avaliação estatística dos resultados das simulações numéricas realizadas. Em resposta a essa necessidade, no CPTEC desenvolveu-se o software de avaliação denominado SCANTEC. A base conceitual desse software consiste em que a avaliação dos produtos de PNTC precisa de dois fatores fundamentais: o uso correto das observações e suas incertezas e a escolha correta da métrica utilizada para cada tipo de variável analisada.

No SCANTEC incluiu-se um módulo para o cálculo de métricas estatísticas básicas. Entende-se como métricas básicas o Erro Médio (ou Viés) para medida de tendência, o RMSE e Desvio Padrão para medidas de dispersão, e o Coeficiente de Correlação de Anomalia (CCA), o qual é utilizado para avaliar o desempenho dos modelos de PNTC na representação das anomalias das análises baseadas em campos climatológicos. Em sentido geral, estas métricas são constantemente usadas na avaliação de cada resultado obtido nos experimentos numéricos que visam melhorar a qualidade das previsões numéricas.

Na presente dissertação foram calculados para a avaliação dos resultados o Viés, RMSE e o CCA. O CCA é dado pela Equação 3.3 (SAPUCCI et al., 2014):

$$CCA = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [(v_{i,j}^P - v_{i,j}^C)(v_{i,j}^A - v_{i,j}^C)]}{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (v_{i,j}^P - v_{i,j}^C)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (v_{i,j}^A - v_{i,j}^C)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

em que o símbolo  $v$  representa uma variável de estado qualquer, os supra-índices A, P e C representam as análises, as previsões e a climatologia, respectivamente. Os sub-índices  $i$  e  $j$  representam as coordenadas do ponto de grade nas direções latitudinal

e longitudinal, respectivamente, de cada recorte. No SCANTEC o cálculo de todas as métricas é realizado usando a própria análise de cada experimento.

O SCANTEC integra as saídas dos modelos junto às análises (que são usadas como referência para avaliação) e o uso de climatologia para realizar os cálculos de cada métrica. Com o intuito de avaliar o desempenho dos modelos de previsão do CPTEC/INPE, e conseqüentemente, contribuir para seu aprimoramento, muito se tem investido no SCANTEC, principalmente na avaliação da precipitação utilizando EOF. As EOF, sob a forma de auto-valores e auto-vetores, constituem uma ferramenta robusta para sintetizar informações descritas por dados que apresentam um grande número de graus de liberdade, com suas incertezas e variabilidades características. Nesse processo é possível obter nas EOF uma representação da máxima fração da variabilidade contida nos dados originais, reduzindo significativamente o número de graus de liberdade originais, o que resulta em um número reduzido de EOF, facilitando a interpretação das informações (WILKS, 2006). Essa técnica foi usada na presente pesquisa para avaliar os campos de precipitação previstos pelo modelo BAM nos três experimentos realizados usando o mesmo.

### **3.2 Metodologia**

A metodologia a ser desenvolvida baseia-se na execução de vários experimentos numéricos e os procedimentos seguidos para a avaliação dos resultados alcançados. Assim, nessa seção são explicados em detalhes os experimentos realizados com inclusão dos dados de perfis de refratividade do MetOp-B no sistema de assimilação G3D-Var, e seguidamente os experimentos realizados para assimilar dados de ângulo de curvatura e perfis de refratividade no modelo BAM do CPTEC. Para atingir uma melhor compreensão da diferença em assimilar um produto de RO-GPS ou outro, são introduzidas algumas características fundamentais do operador usado em cada caso. Finalmente, se apresenta a metodologia de avaliação a ser aplicada nas previsões geradas.

Deve ser ressaltado que visando a otimização dos dados de RO-GPS no sistema de PNT do CPTEC foram usados os recursos disponíveis no momento da realização da presente pesquisa. Sendo assim, a primeira parte da pesquisa foi realizada usando o sistema G3D-Var e seguidamente na segunda etapa foram integrados o BAM e a versão 3.3 do GSI na estrutura do G3D-Var, a fim de simular o cenário mais realista possível de como será realizada a assimilação de dados operacional no CPTEC.

### 3.2.1 Assimilação de perfis de refratividade do MetOp-B com o G3D-Var

Visando a inclusão de perfis de refratividade do MetOp-B no sistema de assimilação do CPTEC foram configurados dois experimentos numéricos. O G3D-Var foi executado em sua configuração habitual, ou seja, acoplado ao MCGA implementado sobre T299L64. Na Tabela 3.4 se apresentam as opções de parametrizações físicas utilizadas nesses dois experimentos.

Tabela 3.4 - Configuração do MCGA no G3D-Var utilizada nesta pesquisa.

Dinâmica	Euleriana
Tipo de grade	Não reduzida
Radiação de onda longa	CRD (TARASOVA et al., 2007)
Radiação de onda curta	(HARSHVARDHAN et al., 1987)
Convecção profunda	GRE (GRELL; DÉVÉNYI, 2002)
Convecção rasa	TIED (TIEDTKE, 1983)
Esquema de superfície	SSIB (XUE et al., 1991)
Camada limite	(HOLTSLAG; BOVILLE, 1993)
Inicialização	Modos normais diabático

O primeiro experimento realizado correspondeu à assimilação de todos os dados disponíveis para entrar no ciclo de assimilação, diga-se, dados convencionais e não convencionais incluindo dados de perfis de refratividade de RO-GPS provenientes dos satélites da constelação COSMIC, do TerraSAR-X e do MetOp-A. Esse experimento foi realizado tendo em vista reproduzir o cenário mais próximo de como é realizada a assimilação de dados no CPTEC/INPE. Nesse, não são incluídos os dados de refratividade do MetOp-B sendo chamado de controle (identificado com a sigla CTL). O segundo experimento foi idêntico ao experimento controle, com exceção de que foram adicionadas as observações de refratividade provenientes do satélite MetOp-B, o qual doravante será identificado com a sigla MTB. Na Tabela 3.5 são apresentadas as características da configuração desses dois experimentos.

Vale destacar que particularmente a assimilação de perfis de refratividade, diferentemente da assimilação de ângulos de curvatura, não deve estender-se de forma confiável a alturas superiores a 30 km, pois as sondagens de refratividade são fortemente ponderadas com climatologia na alta estratosfera durante o processo de recuperação do dado (CUCURULL, 2010). Apesar dessa altura de 30 km estar bem

Tabela 3.5 - Configuração dos experimentos (I).

GSI (v3.1) + MCGA (T299L64)	
CTL	MTB
Convencionais e Não convencionais (Radiâncias)	Convencionais e Não convencionais (Radiâncias)
RO-GPS (perfis de refratividade dos satélites: COSMIC, TerraSAR-X e MetOp-A)	RO-GPS (perfis de refratividade dos satélites: COSMIC, TerraSAR-X, MetOp-A e <b>MetOp-B</b> )

abaixo da altura limite do modelo MCGA, que nessa configuração é de aproximadamente 56 km, todos os dados de RO-GPS acima de 30 km são rejeitados durante o procedimento de controle de qualidade dos mesmos. Além disso, Cucurull et al. (2007) afirmam que a proporção de perfis de RO-GPS que penetram mais profundamente na baixa troposfera é menor devido a erros causados pelo forte gradiente de vapor d'água presente nessa região, pois é onde se concentra o maior conteúdo de umidade em toda a atmosfera. Por essa razão, para alturas abaixo de 5 km, o sistema de assimilação está configurado para rejeitar as observações em que se comprove que o desvio padrão é uma vez maior ao previsto (CUCURULL, 2010).

As análises foram realizadas em modo cíclico, no qual as previsões de 6 horas do modelo são utilizadas como estimativas iniciais para gerar a próxima análise ao assimilar todos os dados disponíveis em uma janela de 6 horas em torno dos horários sinóticos, quais sejam: 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. Dessa forma a janela de dados do ciclo realizado as 1200 UTC tem início as 0900 UTC e seu término as 1500 UTC, horário onde se inicia a janela de dados do ciclo das 1800 UTC, e assim sucessivamente para todos os dados disponíveis, como recomendado em Sapucci et al. (2014). Por sua vez, respectivas previsões foram realizadas para um intervalo de 120 horas a partir das análises geradas durante o ciclo de assimilação. Esse procedimento foi realizado simulando como era executada a assimilação de dados com o G3D-Var no CPTEC/INPE. Finalmente, por meio do SCANTEC foram calculadas as métricas estatísticas escolhidas.

### 3.2.2 Assimilação de dados de RO-GPS com o GSI/BAM

Na segunda etapa da pesquisa, a estrutura do G3D-Var foi usada como base para a realização dos experimentos numéricos. Foi incluído o BAM ao invés do MCGA e atualizada a versão do GSI em uso, da 3.1 para a 3.3, pois com a anterior não era possível assimilar dados de ângulos de curvatura. Na Tabela 3.6 se apreciam as opções de parametrizações físicas do BAM que se utilizaram nos experimentos executados:

Tabela 3.6 - Configuração do BAM utilizada nesta pesquisa.

Dinâmica	Euleriana
Tipo de grade	Não Reduzida
Radiação de onda longa	CRD (TARASOVA et al., 2007)
Radiação de onda curta	(HARSHVARDHAN et al., 1987)
Convecção profunda	Grell (GRELL; DÉVÉNYI, 2002)
Convecção rasa	Tiedke (TIEDTKE, 1983)
Esquema de superfície	SSIB (XUE et al., 1991)
Camada limite	(HOLTSLAG; BOVILLE, 1993)
Inicialização	Modos normais diabático

Em relação à configuração utilizada do GSI, para a execução da minimização foram realizadas 100 iterações internas dentro de um ciclo externo. Os valores dos parâmetros relacionados com o controle dos pontos de umidade super-saturada ou negativa dentro do sistema (`factq_min` e `fatcq_max`) foram os mesmos que no G3D-Var, 0,005 e 0,905, respectivamente. Para a opção de variável para controlar a umidade (`qoption`) foi escolhida pseudo-umidade relativa (1) ao invés de umidade relativa normalizada (2), que é a usada no anterior sistema. A escolha dessa variável se deveu fundamentalmente aos resultados reportados em Campos et al. (2016), onde a pseudo-umidade relativa foi testada e comparada com a umidade relativa normalizada. Os resultados indicaram que a escolha da variável modifica significativamente o impacto dos dados, conseqüentemente sugeriram que estudos adicionais devam ser realizados para avaliar o impacto dos dados de refratividade quando outras variáveis de controle forem utilizadas. A escolha de cada parâmetro atendeu o que era habitualmente usado na versão operacional do G3D-var e o recomendado em DTC (2016). Nas subseções é abordado o uso de outros parâmetros na configuração.

Com o propósito de avaliar o nível de processamento dos dados de RO-GPS com que são obtidos os maiores impactos nas previsões, foram executados três experimentos

numéricos. O primeiro experimento consistiu na assimilação de todos os dados convencionais e não convencionais disponíveis no CPTEC no momento de realizar as rodadas, diga-se todos os mencionados na Seção 3.1.1, porém sem incluir nenhum dado de RO-GPS. Este é considerado o experimento base, o qual é usado como referência para realizar comparações de quando se assimilam perfis de refratividade ou ângulos de curvatura, dessa forma determinar o impacto de cada um dos produtos de RO-GPS analisados. Este experimento é chamado de base (identificado com a sigla CNT). A seguir são explicados os outros dois experimentos realizados.

### 3.2.2.1 Assimilação de perfis de refratividade

O operador que foi empregado para a assimilação de perfis de refratividade é o proposto por Cucurull (2010) e que se encontra implementado no GSI. O mesmo corresponde com a Equação 2.6:

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

Em Cucurull (2010) se apresenta uma descrição detalhada desse operador. Ao revisar o código do GSI com a finalidade de entender mais aprofundadamente como as observações RO-GPS são verificadas pelo sistema, foram corroboradas as características previamente abordadas nesse estudo. Entre algumas que vale ressaltar cita-se que neste operador é possível incluir os fatores de compressibilidade mediante a opção para usar compressibilidade (`use_compress`) na lista de parâmetros de entrada (do inglês *namelist*). Se usado como falso então são empregados por padrão os coeficientes fornecidos em Bevis et al. (1994), e se verdadeiro são usados os coeficientes de Rüeger (2002). Na presente foi usado esse parâmetro como verdadeiro. No cálculo da altura geopotencial da observação, a mesma é calculada com correção da superfície, isto é, as alturas geopotenciais são referenciadas com respeito à topografia do modelo ao invés de em relação ao nível do mar. Um ponto de grande relevância constituem os cheques de controle de qualidade (QC, do acrônimo em inglês *Quality Control*) para essas observações. Primeiramente é realizado um cheque de erro grosseiro, que está relacionado com as distancias entre o background e as observações, e reflete no peso que será outorgada a mesma. Como não é desejável manter observações que contenham erros derivados de climatologia ou ruído ionosférico, para evitar incrementos no topo do modelo as observações acima de 30 km são removidas pelo GSI como parte do QC. Outra condição que é levada em conta é se as observações se encontram em/ou perto de camadas com condições de SR. O critério ( $C_r$ ) que é con-

siderado para a presença de SR é  $157N/km$ . No procedimento de QC são definidas faixas do limiar indicando a proximidade das observações às camadas com SR. Se a observação  $O \geq 0,5C_r$  se diz que existem prováveis condições de SR, e se  $O \geq 0,75C_r$  se considera que a camada encontra-se perto das condições de SR. As observações em que se comprovem esses valores são consideradas como que falharam o cheque de QC, e marcadores são colocados indicando a causa da falha.

Considerando as particularidades deste operador foi executado um experimento numérico, no qual se assimilaram dados de perfis de refratividade de RO-GPS adicionados ao conjunto de dados assimilados no experimento CNT, o que se manteve invariável. No GSI a escolha do tipo de dado de GPS a ser usado, é dado pela variável `dtype` na parte de entrada das observações (`OBS_INPUT`) no `namelist`. Para a realização deste experimento foi selecionada a refratividade, `dtype: gps_ref`. Este segundo é chamado de experimento com refratividade (identificado com a sigla REF). As análises e respectivas previsões são realizadas da mesma forma que nos experimentos para a avaliação da inclusão do MetOp-B. Após realizados os experimentos, foram calculadas as métricas estatísticas para a realização da correspondente avaliação dos resultados.

### 3.2.2.2 Assimilação de ângulos de curvatura

O método NBAM destinado para a assimilação de dados de ângulo de curvatura da RO-GPS é o implementado na versão 3.3 do GSI e foi, portanto, o método usado na presente pesquisa. A fórmula que define o operador para essas observações corresponde à Equação 2.4:

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

Cucurull et al. (2013) descrevem esse método, embora algumas diferenças em comparação ao operador de perfis de refratividade são apresentadas a seguir. Por exemplo, no caso dos ângulos de curvatura a altura limite para o uso dessas observações é estendida a 50 km (`gpstop=50`), aproveitando as que estão disponíveis no intervalo entre 30-50 km de altura. Dentro do GSI isso é atendido mediante a opção `nsig_ext` no `namelist`, a qual representa o número de camadas acima no topo do modelo necessárias para a assimilação desses dados (o valor usado foi `nsig_ext=12`). Toda a execução do operador é realizada nessa nova grade estendida, incluindo todos os cálculos e cheques de QC. Para a obtenção das observações de ângulo de curvatura

modeladas, os campos previstos devem ser primeiramente convertidos em perfis de refratividade. Isso é realizado como na seção anterior através da Equação 2.6. Assim, os campos de pressão, temperatura, umidade específica, alturas geopotenciais corrigidas e topografia são interpolados para a localização da observação, calculando-se a refratividade modelada. Como a SR nas camadas é um indicativo da diminuição da força nos sinais GPS (L1 e L2), nesse processo são realizados cheques de QC identificando as camadas com SR provenientes dos campos do modelo (o critério  $C_r$  é igualmente considerado). Os procedimentos para a verificação das camadas com condições de SR são executados da mesma forma que no caso da assimilação de perfis de refratividade, removendo as observações em que essa condição seja comprovada e abaixo da mesma. As observações que falharam os cheques de QC podem ser reconhecidas na saída do GSI a partir de indicadores que são colocados dependendo da causa da falha. Seguidamente são obtidos os ângulos de curvatura modelados nos quais se aplica um outro QC comprovando que as observações se encontrem dentro da grade do modelo. Os ângulos de curvatura modelados em alturas superiores a 50 km são rejeitadas nesse procedimento. Finalmente é calculado o vetor de inovação.

Como a Equação 2.4 está condicionada pela suposição da simetria esférica da atmosfera, o NBAM da mesma forma que os operadores de observações usados atualmente nos centros operacionais, despreza a existência de gradientes horizontais de refratividade, conseqüentemente é afetado pelos erros induzidos em regiões onde essa suposição não é atendida. Detalhes sobre algumas limitações nos QC utilizados são reportados em Cucurull (2015), apresentando a implementação de procedimentos adicionais devido à condições de SR, tanto na obtenção do ângulo de curvatura modelado como no processo de recuperação do dado.

Tendo em conta às características do operador usado, foi realizado um último experimento no qual se assimilaram dados de ângulo de curvatura de RO-GPS em conjunto com os dados assimilados no experimento CNT. Deve-se apontar que neste caso os dados de RO-GPS assimilados foram os de ângulos de curvatura ao invés dos de perfis de refratividade, essa é a diferença básica com relação ao experimento REF. Neste experimento foi selecionado o ângulo de curvatura no namelist do GSI por meio da escolha da variável `dtype`, nesse caso `dtype: gps_bnd`. Este terceiro experimento é chamado de experimento com ângulos de curvatura (identificado com a sigla BND) e constitui a primeira vez em que é realizado a assimilação desse tipo de observação no sistema de PNT do CPTEC.

Similar aos experimentos CTL, MTB, CTN e REF, as análises foram realizadas em modo cíclico e a janela de assimilação foi de 6 horas, as respectivas previsões foram realizadas para um tempo de 120 horas de integração do modelo. Finalmente, calcularam-se as métricas estatísticas propostas para a avaliação dos resultados.

Na Tabela 3.7 são sumarizados os três experimentos numéricos realizados nessa segunda parte do trabalho. Com estes é possível avaliar o impacto de cada conjunto de dados de RO-GPS respeito ao experimento de controle e realizar uma comparação entre eles avaliando com qual desses dados são obtidas as previsões de melhor qualidade.

Tabela 3.7 - Configuração dos experimentos (II).

GSI (v3.3) + BAM (T299L64)		
CNT	REF	BND
Convencionais	Convencionais	Convencionais
Não convencionais (Radiâncias)	Não convencionais (Radiâncias)	Não convencionais (Radiâncias)
	RO-GPS (perfis de refratividade dos satélites: COSMIC, TerraSAR-X, MetOp-A e MetOp-B)	RO-GPS (ângulos de curvatura dos satélites: COSMIC, TerraSAR-X, MetOp-A e MetOp-B)
	gps_ref	gps_bnd

### 3.2.3 Avaliação dos resultados

Nessa subseção se apresenta a metodologia para avaliar a melhoria na qualidade das previsões após ter integrado o modelo por 120 horas fora do modo cíclico. Essa avaliação foi realizada em todos os experimentos executados. Com o objetivo fundamental de direcionar uma leitura adequada do documento, a metodologia empregada para avaliar as análises geradas a partir do GSI é abordada no Capítulo 4 a medida que os resultados vão sendo apresentados. Porém, não foi aplicada uma metodologia de avaliação única em todos os experimentos, sendo que um maior nível de detalhe foi preciso na avaliação dos resultados ao assimilar dados de ângulos de curvatura e perfis de refratividade usando o GSI/BAM. Assim difere da metodologia seguida para avaliar a inclusão de dados de refratividade do satélite MetOp-B.

### 3.2.3.1 Avaliação da qualidade das previsões geradas

As variáveis escolhidas para realizar a avaliação dos resultados das previsões de 120 horas foram: conteúdo integrado de água precipitável (AGPL); pressão ao nível médio do mar (PSNM); perfis de altura geopotencial (ZGEO); componentes zonal e meridional do vento (UVEL e VVEL, respectivamente); umidade específica (UMES); assim como também as temperaturas sensível (TEMP) e virtual (VTMP). As variáveis ZGEO, UVEL, VVEL, TEMP foram avaliadas nos níveis 250, 500 e 850 hPa e as variáveis UMES e VTMP foram avaliadas nos níveis 500, 850 e 925 hPa.

Depois de realizados todos os experimentos e calculadas adequadamente as métricas estatísticas, foram avaliados os resultados encontrados. Primeiramente, para realizar uma adequada interpretação dos resultados da CCA, adotou-se como limiar para as previsões válidas aquelas que apresentaram valores de coeficiente acima de 0,6, pois há consenso na literatura de que CCA igual a 60% corresponde ao limiar em que existe destreza sinótica nos padrões de grande escala. Essa medida varia de -1 a 1, sendo positivamente orientada, o que implica que o valor perfeito é igual a 1, representando que há 100% de correlação entre as anomalias dos campos previstos e dos campos de análise com relação à climatologia. Para o caso dos valores de RMSE e o viés foram destacados aqueles em que tiveram os menores valores possíveis. Esses valores indicam em quais variáveis e regiões é mais notável a contribuição de cada informação assimilada, assim como também o tempo de integração do modelo em que é ampliada a validade da previsão.

Para auxiliar na interpretação dos resultados, um outro coeficiente de interesse foi calculado como parte dessa metodologia. Esse coeficiente representa o ganho nos valores de RMSE, o qual torna-se útil para apresentar quão importante foram os resultados nas previsões ao utilizar os dados de RO-GPS. Esse ganho é relativo a um experimento tomado como controle. O ganho foi calculado por meio da fórmula:

$$GANHO_{v_t}^{RMSE} = \frac{RMSE_{v_t}^{E_i} - RMSE_{v_t}^C}{RMSE_{perfeito} - RMSE_{v_t}^C} \times 100\% \quad (3.4)$$

em que  $v$  corresponde com qualquer uma das variáveis avaliadas no tempo de integração  $t$ , enquanto que  $E$  indica os resultados dos  $i$  experimentos em que foram incrementados algum conjunto de dados e  $C$  representa os resultados dos experimentos de referencia chamados de controle e base. Já  $RMSE_{perfeito}$  representa o valor de RMSE em caso de previsões perfeitas, o que implica que o mesmo seja igual a 0.

Valores de ganho positivos indicam que o experimento adicionando algum dos tipos de observações beneficiou positivamente as previsões com relação aos experimento avaliados. Já valores negativos indicam que a adição dos dados degradou a qualidade das previsões.

Como parte da metodologia para destacar os ganhos obtidos, assim como em [Anthes et al. \(2008\)](#) foi calculada a Mudança Fracional (FC- do acrônimo em inglês Fractional Change), referente ao RMSE das previsões realizadas com a adição de algum tipo de observação e o RMSE daquelas em que essas não foram assimiladas. A FC é dada pela expressão:

$$FC = 1 - \frac{RMSE_{E_i}}{RMSE_C} \quad (3.5)$$

Tanto o ganho como as medidas de FC são positivamente orientadas, com isso valores positivos indicam melhorias ou impactos positivos nas previsões realizadas. Posteriormente, são apresentados os resultados de FC na região onde o resultado foi mais benéfico, e foram analisadas as variáveis em que a assimilação dos dados tiveram maiores impactos. Por último foi calculada a diferença dos valores de RMSE entre os experimentos realizados, da mesma forma que as métricas anteriores, valores positivos indicam uma diminuição no RMSE e, conseqüentemente, uma melhoria no desempenho do modelo de previsão.

Para a avaliação das previsões de precipitação dos experimentos CTN, REF e BND, foi aplicado um método baseado em EOF. No SCANTEC as EOF são calculadas baseando-se na matriz de covariâncias da série de dados, onde primeiramente é calculada a matriz de covariâncias do campo de precipitação e, seguidamente são obtidos os auto-valores ( $\lambda_k$ ) e auto-vetores dessa matriz. Os auto-vetores são não correlacionados entre si, e cada um representa o padrão espacial ou EOF de modo  $k$ . Por sua vez, cada auto-valor é proporcional à porcentagem da variância do campo observado que é descrito pelo modo  $k$ , de forma que a porcentagem da variância total representada por cada EOF (FVar) é calculada segundo a seguinte equação ([WILKS, 2006](#)):

$$FVar_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} \times 100\% \quad (3.6)$$

Para a escolha da quantidade de EOF a ser calculada teve-se em consideração o fato de que o vetor correspondente ao maior auto-valor é o primeiro auto-vetor, com auto-valores progressivamente mais pequenos associados aos subseqüentes auto-vetores

(2, 3, 4, etc.). Dessa forma, nas primeiras EOF se considera que estão representados os padrões espaciais correspondentes aos lugares com a maior variabilidade da série (CASANUEVA et al., 2014). Em relação a qual é o número de EOF suficiente para mostrar essa variabilidade, foi verificado que majoritariamente varia entre 3 e 10 EOF (e.g., Benzi et al. (1997), Xoplaki et al. (2000), Pritchard and Somerville (2009), Cui and Huang (2014)) mas em média são calculadas um total de 4. Por tal motivo, na presente pesquisa foram calculadas um total de 4 EOF Observadas e 4 EOF Previstas. As Observadas foram obtidas a partir dos campos de precipitação estimada por satélites, utilizando para isso os dados do produto 3B42 do satélite TRMM (acrônimo do inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission*). Segundo Huffman et al. (2007), a precipitação a partir do produto 3B42 é considerada a melhor estimativa de precipitação, pois nesse são combinadas observações de vários instrumentos a bordo de satélites, incluindo precipitação por radar e radiômetro de micro-ondas a bordo do TRMM, bem como radiômetro de infra-vermelho em outros satélites. Esse produto possui uma resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e uma resolução temporal de 3 horas. Considerando que as previsões do modelo são de precipitação acumulada em 24 horas e os dados usados do TRMM originalmente de 3 em 3 horas, esses últimos tiveram que ser acumulados para 24 horas visando realizar adequadamente as respectivas comparações. Entre as funcionalidades implementadas no SCANTEC se encontra um algoritmo de interpolação, o qual foi aplicado para calcular o acumulado da precipitação estimada pelo TRMM na área de interesse, nesse caso a América do Sul. Uma vez calculadas as EOF Observadas, calcularam-se as EOF para os campos previstos pelos experimentos executados: CNT, REF e BND, sendo chamadas de EOF Previstas. Essa análise foi focada na representação espacial e por tempo de previsão das EOF Previstas, tendo como referências as EOF Observadas, com a finalidade de comparar os padrões de variabilidade em cada caso. Para a comprovação matemática foi realizado o cálculo do coeficiente de correlação linear (CCOR) entre cada EOF por tempo de previsão, dado pela fórmula:

$$\rho_{xy}^t = \frac{\sigma_{xy}^t}{\sigma_x^t \sigma_y^t} \quad (3.7)$$

em que  $x$  e  $y$  representam as quatro EOF calculadas em cada experimento,  $t$  designa o tempo de previsão,  $\sigma_{xy}$  é a matriz de covariância entre as EOF Observada e Prevista e  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os desvios padrão de cada EOF. Esse coeficiente varia de -1 a 1, sendo que o valor 1 representa uma relação positiva perfeita entre as variáveis, neste caso entre as EOF calculadas por tempo de previsão. Já o valor -1 implica uma relação negativa perfeita. O valor 0 indica que não existe relação entre as componentes.

Com relação as porções da superfície terrestre em que as métricas foram calculadas separadamente, as seguintes regiões foram consideradas: Hemisfério Sul (HS) entre  $80^{\circ}\text{S}$ - $20^{\circ}\text{S}$ ; Hemisfério Norte (HN) entre  $80^{\circ}\text{N}$ - $20^{\circ}\text{N}$ ; América do Sul (AS) entre  $50^{\circ}\text{S}$ - $10^{\circ}\text{N}$  e  $80^{\circ}\text{W}$ - $30^{\circ}\text{W}$ ; Região Equatorial (EQ) entre  $20^{\circ}\text{S}$ - $20^{\circ}\text{N}$  e a Região Global (GL) com ênfase na AS.

O período escolhido para a aplicação da metodologia visando a inclusão dos dados de RO-GPS provenientes do MetOp-B compreendeu os meses janeiro e agosto de 2014. Porém, para a realização da segunda parte da pesquisa referente à avaliação da assimilação do ângulo de ocultação, foi utilizado apenas o mês de agosto de 2014 para a execução dos experimentos CNT, REF e BND. O custo computacional, espaço em disco bem como tempo necessário para a execução dos experimentos, foram os elementos fundamentais que limitaram a escolha de um período de estudo mais extenso.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme já abordado no capítulo anterior, os resultados serão apresentados atendendo separadamente uma avaliação do impacto da inclusão dos dados de RO-GPS provenientes do satélite MetOp-B e do impacto do uso de dados de ângulos de curvatura ao invés de perfis de refratividade nas análises e previsões geradas.

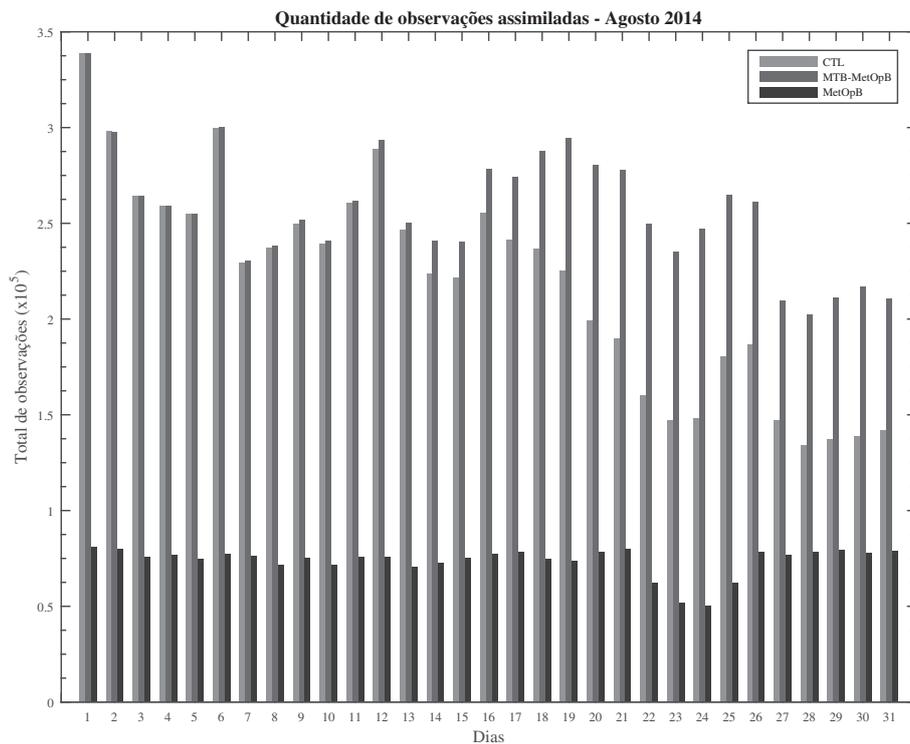
### 4.1 Impacto da inclusão dos dados de RO-GPS provenientes do satélite MetOp-B

Após a execução do GSI em cada ciclo de assimilação, são disponibilizados uma série de resultados contendo informações sobre a base de dados utilizadas com estatísticas e diversas informações sobre seu uso no processo. Os mesmos são explorados para realizar uma avaliação das análises geradas durante esse processo.

Um primeiro ponto que deve ser destacado na inclusão de um novo conjunto de dados é a forma em que o sistema de assimilação trata os dados dos demais conjuntos. No caso da presente dissertação isso seria avaliar o impacto da inclusão dos perfis de refratividade do MetOp-B na assimilação de refratividades dos outros satélites. Para isso, durante a execução dos experimentos, foram quantificadas as observações assimiladas em cada ciclo de assimilação, os quais são apresentados na Figura 4.1. Nessa figura os totais médios diários de dados de refratividade assimilados em cada experimento, durante agosto de 2014, são representados por barras verticais. A barra cinza escuro representa a quantidade de observações que foram assimiladas apenas do MetOp-B, cinza claro e barras pretas os acumulados diários de observações provenientes dos demais satélites nos experimentos CTL e MTB, respectivamente. Os valores apresentados deixam evidente que o total de observações de refratividade assimiladas no experimento CTL é muito menor quando comparadas com a quantidade assimilada em MTB, o qual indica o primeiro impacto positivo da inclusão dos dados de RO-GPS do MetOp-B na entrada do processo de assimilação. No experimento controle observa-se que existe uma tendência de diminuição da quantidade de dados assimilados no período avaliado, sendo mais acentuado entre os dias 19 e 25 de agosto. Porém com a inclusão dos dados do MetOp-B constata-se claramente que essa tendência é minimizada mostrando-se um aumento com relação ao CTL, sendo esse aumento modesto no início e se intensificando com a evolução do processo cíclico no período. Isso é explicado pelo fato de que, diferente de outros sistemas de observação que avançam amostrando apenas uma região como as passagens de satélites de órbita polar, na RO-GPS são obtidas amostras bem distribuídas globalmente, embora com uma baixa resolução horizontal é possível obter informações confiáveis

em regiões onde não se tem medidas a partir de outras fontes. Dessa forma, ao incluir as medidas de refratividade do MetOp-B, as diferenças entre o background e as observações são reduzidas globalmente com o avanço do processo cíclico da assimilação, possibilitando que mais observações sejam aceitas através dos diversos passos de assimilação envolvidos no processo. Dessa forma, observa-se um aumento gradual da quantidade aceita de dados dos outros satélites que na ausência do MetOp-B os mesmos (experimento CTL) foram rejeitados, confirmando o impacto positivo desses dados na assimilação das refratividades dos outros satélites. Em Cucurull et al. (2007) é reportado um resultado semelhante, o que demonstra um bom desempenho do algoritmo de minimização e a vantagem de ampliar a base de dados de RO-GPS para a assimilação operacional.

Figura 4.1 - Série temporal do acumulado diário de observações de RO-GPS utilizadas no experimento controle (coluna cinza claro), no experimento com MetOp-B subtraindo os dados assimilados desse satélite (coluna preta) e as observações utilizadas do MetOp-B (coluna cinza escuro) no G3D-Var para o mês de agosto de 2014.

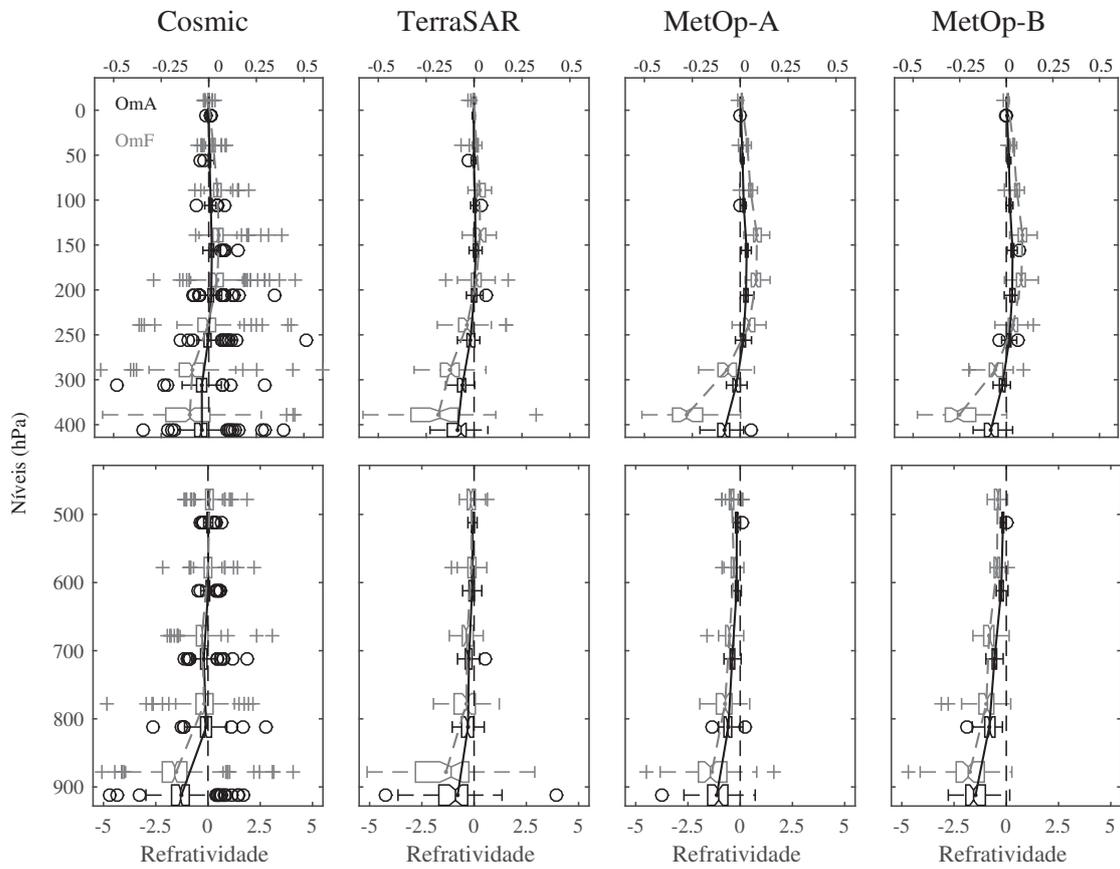


A fim de explorar em que níveis da atmosfera os dados de refratividade do MetOp-B exerceram um maior impacto, foram analisados os valores das observações menos os

valores das análises (OmA) e menos as previsões de curto prazo utilizadas como estimativas iniciais (OmF). A Figura 4.2 mostra esses valores mediante de diagramas de caixas separados em diferentes camadas atmosféricas organizadas em perfis verticais para os satélites da constelação COSMIC, TerraSAR-X, MetOp-A e MetOp-B. Em cada caixa, a marca central representa a mediana, as bordas da caixa representam os 25° e 75° percentis, os bigodes representam os dados extremos que não são considerados discrepantes nessa distribuição e as cruces e círculos representam os valores discrepantes para OmF e OmA, respectivamente. Esse resultado é apresentado apenas para agosto de 2014 uma vez que janeiro de 2014 apresentou resultados similares. Na Figura 4.2 pode ser observado que os valores médios e as incertezas observados do OmF foram reduzidos depois da assimilação ao observar os valores do OmA, os quais apresentam os valores médios menores (traço contínuo preto) e uma dispersão (representadas pelo tamanho das caixas) também menor que os valores apresentados no OmF. Isso permite afirmar que o processo de assimilação cumpriu sua função com relação a esses sistemas de observação, e permite verificar que o mesmo não apresentou problemas na minimização das incertezas nesse processo. Esse padrão é observado em todo o perfil atmosférico e também nos dados de todos os diferentes satélites. É notável que essas diferenças são maiores nas camadas mais inferiores da atmosfera diminuindo exponencialmente nas camadas mais elevadas, o qual é um resultado natural associado a própria física da refratividade atmosférica que apresenta esse mesmo padrão vertical. Observe que a escala na parte superior da figura teve que ser diminuída em um fator de 10 para tornar acessível às informações nesses níveis. Algo que merece destaque nessa figura é a maior quantidade de dados espúrios nessa análise com relação aos dados de refratividade dos satélites da constelação COSMIC, o qual pode estar associado com a qualidade dos resultados gerados uma vez que se trata dos satélites mais antigos em operação no momento.

Um outro ponto a ser destacado neste estudo são os ganhos produzidos na melhoria da qualidade das previsões obtidas com a inclusão das refratividades do MetOp-B, o que foi obtido com a comparação com os resultados obtidos no experimento controle. Em uma visão geral foi perceptível que entre os meses estudados os resultados foram bem diferentes. Na Figura 4.3 são apresentados os resultados de CCA obtidos para a variável ZGEO em 500 hPa, durante janeiro e agosto de 2014 nas regiões HN, EQ e HS (da esquerda para a direita, respectivamente). Observa-se claramente que os maiores impactos, tanto positivos quanto negativos, corresponderam ao mês de agosto, com uma extensão das previsões válidas para todo o período de integração nas áreas do HN e HS, sendo mais acentuados no HS em concordância ao apresentado em trabalhos como Cucurull et al. (2007) e Bonavita (2014). Destaca-se que a região

Figura 4.2 - Perfis verticais das diferenças de observações menos as análises (OmA, preto) e observações menos as estimativas iniciais (OmF, cinza) para a refratividade em função dos níveis de pressão, médias entre as análises geradas às 0000 e 1200 UTC, para os satélites da constelação COSMIC, TerraSAR, MetOp-A e MetOp-B (da esquerda para a direita, respectivamente).

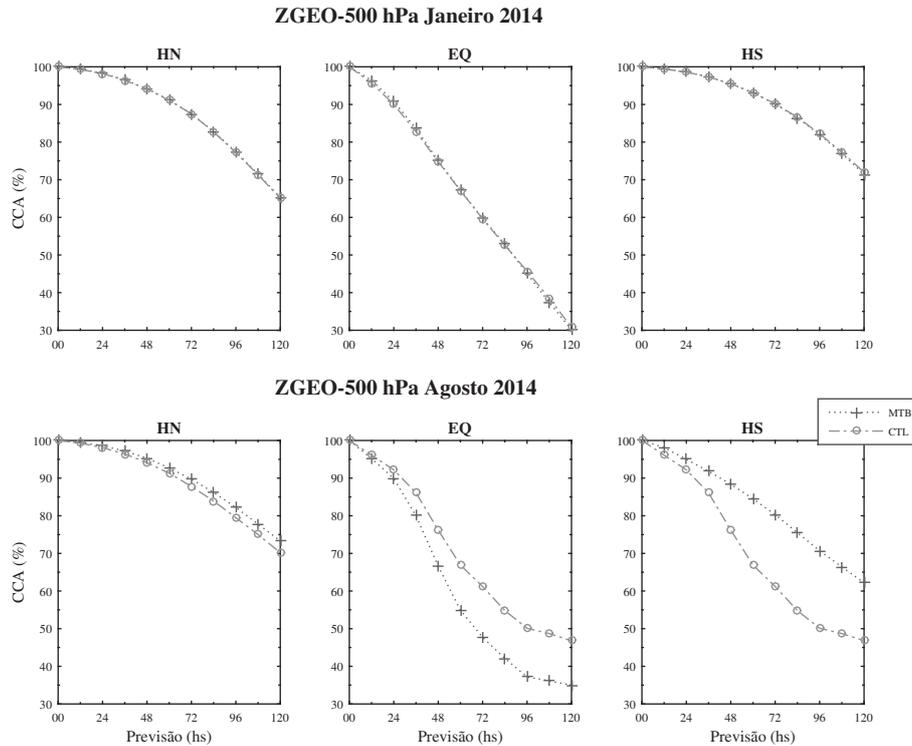


do HS se encontra na estação de inverno, na qual, segundo Cucurull et al. (2007), as observações são menos afetadas pela SR e heterogeneidades na refratividade horizontal, condições causadas fundamentalmente pelo gradiente de vapor d'água, sendo que ao adicionar os dados de refratividade do MetOp-B as previsões são estendidas em 4% desde as primeiras 24 horas e mantendo-se válidas até o final do tempo de integração. Para o HN nesse mês, os resultados são importantes, pois embora se encontre em verão, ao adicionar esses dados nota-se uma melhoria a partir das 36 horas com respeito ao experimento controle, com valores de CCA maiores a 70% até às 120 horas de previsão. Por sua vez, na região Tropical observam-se os maiores valores de impacto negativos. O baixo desempenho desse sistema de observação nessa região já foi reportado em outros estudos, tais como Sapucci et al. (2014). A região EQ particularmente é caracterizada por possuir menor concentração de perfis de RO-GPS em relação às regiões dos extratropicais, motivo pelo qual a constelação COSMIC-2 contará com satélites tanto de órbita polar como equatorial (YEN et al., 2012), de tal forma se espera que resultados mais promissores sejam obtidos nessa região após a operacionalização dessa constelação. No mês de janeiro, esse impacto foi muito sutil nas três regiões apresentadas.

Para avaliar o impacto dos dados de RO-GPS do MetOp-B nas outras variáveis, o ganho percentual para diversas variáveis citadas na metodologia foram calculados. No mês de janeiro, embora os resultados fossem menos expressivos do que os observados em agosto, cabe ressaltar que no HN foi observado impactos positivos em praticamente todas as variáveis. A Figura 4.4 mostra os valores do ganho percentual para o HN, permitindo constatar que tais ganhos são expressivos e maiores nas previsões de mais curto prazo, o que indica que esses ganhos estão mais associados com a qualidade da análise do que a evolução do modelo. Em algumas variáveis são observadas perdas, mas nesses casos os valores são ínfimos. Embora os resultados não atinjam valores de ganhos muito elevados, são relevantes pelo fato de que nesse hemisfério a cobertura de observações convencionais é muito mais densa com relação às demais regiões do globo. Assim como em Bonavita (2014) em janeiro os resultados mais proeminentes da inclusão de dados de RO-GPS foram encontrados no HN.

Para o mês de agosto, os resultados no impacto da assimilação dos dados do MetOp-B em todas as variáveis avaliadas são mais expressivos no HS. Na Figura 4.5 são apresentados os valores de ganho no RMSE, onde nota-se que nessa região os valores dos ganhos podem chegar até 60%, como é o caso do ZGEO-250 e ZGEO-500. Observa-se que nessa região o impacto positivo da inclusão dessa fonte de dados aumenta com a integração do modelo, de forma que são menores e até há perdas em

Figura 4.3 - Valores médios de coeficiente de correlação de anomalia (CCA) da altura geopotencial (ZGEO) em 500 hPa sobre o Hemisfério Norte extratropical (HN), Tropical (EQ) e Hemisfério Sul extratropical (HS), durante janeiro e agosto de 2014, para o experimento controle (curva com círculos cinzas) e para o experimento adicionando os dados do satélite MetOp-B (curva com cruzeiros pretas).



algumas variáveis em horários próximos a análise, mas os ganhos crescem substancialmente e as perdas diminuem ao se distanciarem da condição inicial. Nas previsões de 24 horas as variáveis mais próximas da superfície e as associadas com a umidade apresentam perdas, mas com a integração do modelo essas perdas são praticamente anuladas e em alguns casos ganhos são observados depois de 72 horas. Na maioria das variáveis, fundamentalmente VTMP, TEMP, ZGEO e as componentes U e V do vento são observados valores de 60% tanto às 72 como às 120 horas de integração. As perdas observadas nas variáveis de umidade podem ser atribuídas à forma em como são analisados os campos de umidade dentro do sistema de assimilação. Nesta pesquisa foi selecionada a umidade relativa normalizada como variável de controle da análise da umidade, pois é a variável que era utilizada operacionalmente no CP-TEC. Esse resultado confirmou a mudança na escolha de essa variável de controle nos experimentos referentes à assimilação de dados de RO-GPS usando o sistema GSI/BAM, escolhendo-se a pseudo-umidade relativa.

Figura 4.4 - Ganho percentual nos valores de RMSE em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para 24, 48, 72, 96 e 120 horas de previsão (da esquerda para a direita, respectivamente), sobre o Hemisfério Norte extratropical durante janeiro de 2014.

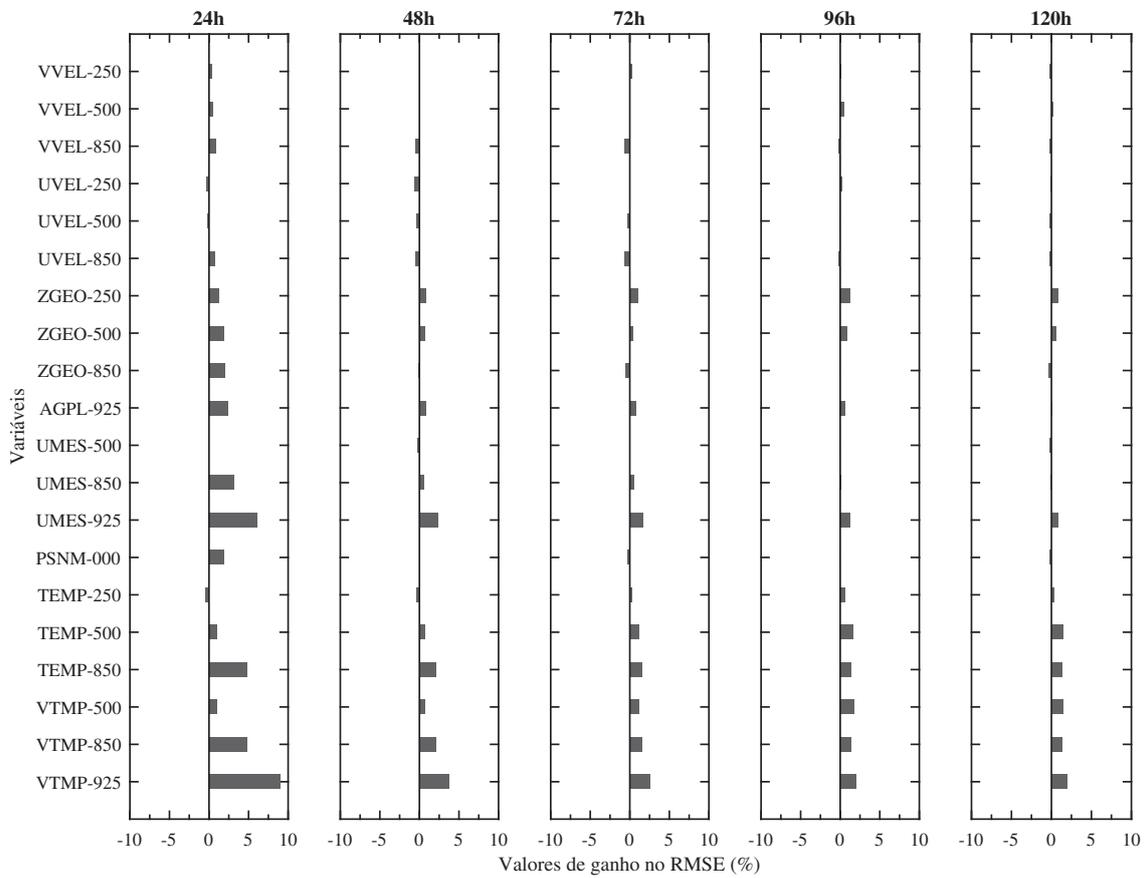
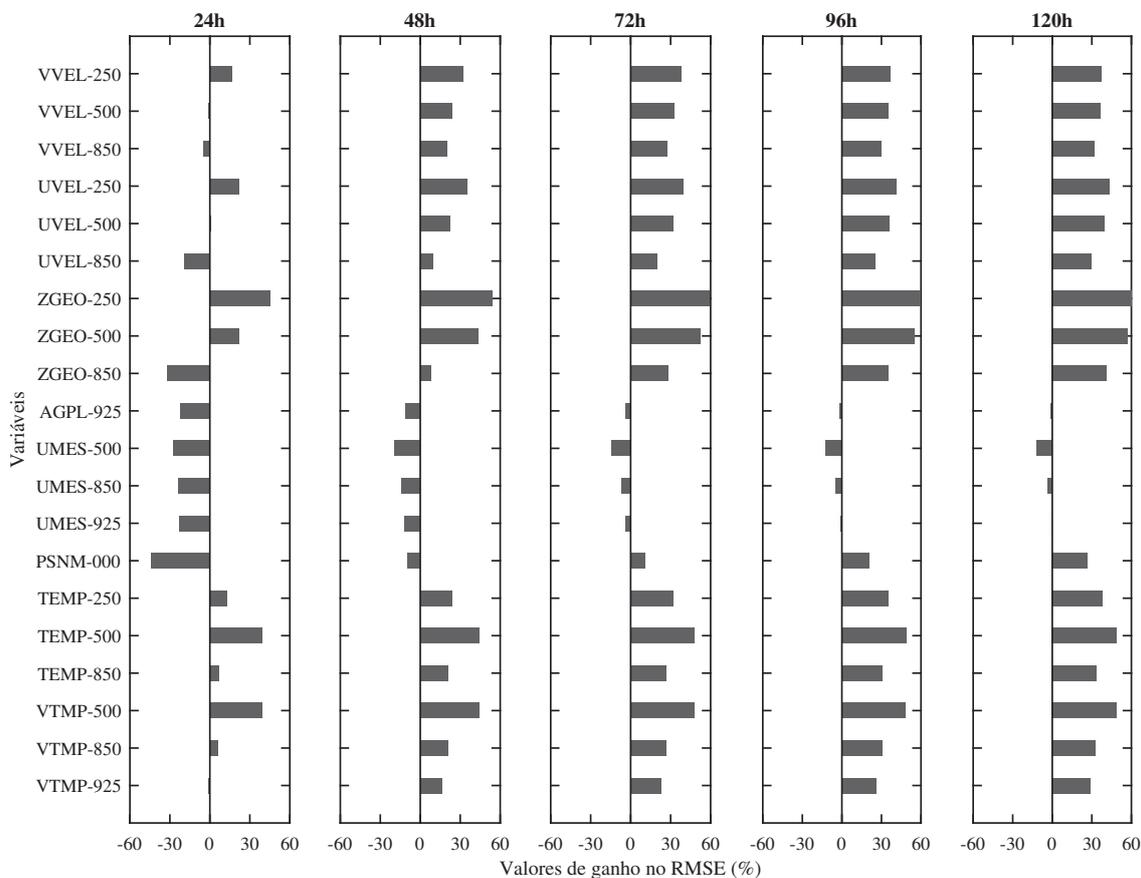


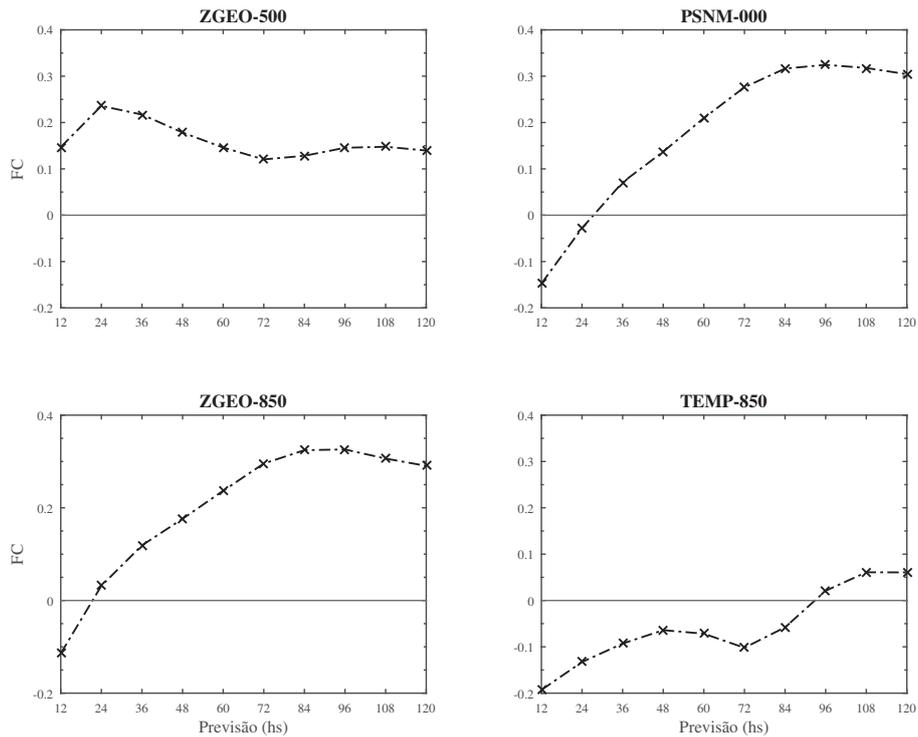
Figura 4.5 - Idem a Figura 4.4, exceto que para o Hemisfério Sul extratrópicos durante agosto de 2014.



Como um dos focos principais do CPTEC é a previsão numérica de tempo visando o benefício da sociedade brasileira, foi realizada uma análise mais detalhada dos ganhos e perdas produzidos com ênfase na AS. Com base na análise sazonal realizada entre ambos os meses, foi escolhido o mês de agosto para apresentar esses resultados. Na Figura 4.6 são apresentados os valores obtidos no cálculo de FC para a AS nas variáveis ZGEO em 500 hPa, ZGEO e TEMP em 850 hPa e PSNM, onde o eixo horizontal representa os horários de previsão. Pode ser observado que na ZGEO em 500 hPa o impacto é positivo para todas as previsões, entretanto na ZGEO em 850 hPa e na PSNM entorno das 24 horas se produz um impacto positivo que se estende até o final do tempo de integração. O resultado encontrado para a variável PSNM demonstra o quanto os ganhos produzidos na AS contribuem aos ganhos encontrados na região do HS, pois nessa região foram observados ganhos na PSNM a partir das 72 horas de previsão. Nota-se que para a TEMP em 850 hPa os resultados se tornam positivos após 94 horas aproximadamente, porém mostram que

com a inclusão de uma maior quantidade de dados de RO-GPS a tendência é de diminuição do RMSE com o tempo de integração. O comportamento nas variáveis não apresentadas é em geral similar às aqui mostradas.

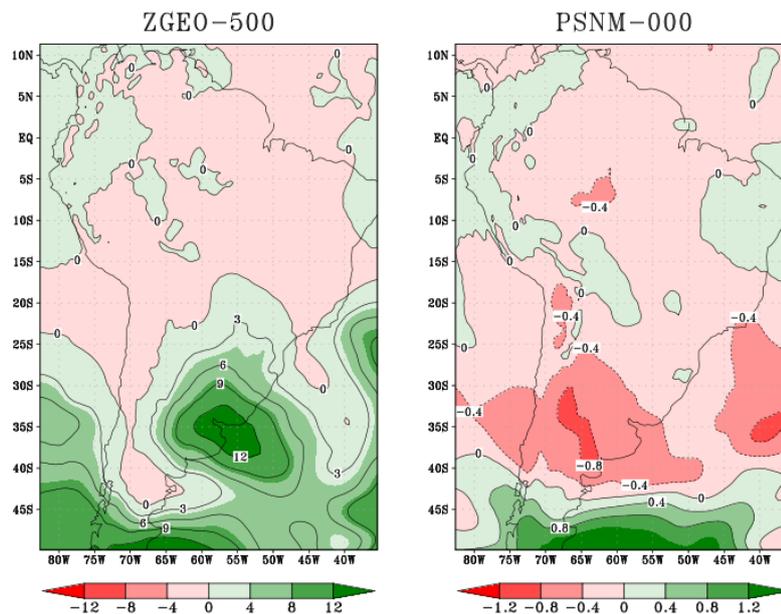
Figura 4.6 - Mudança fracional nos valores de RMSE para as variáveis altura geopotencial em 500 e 850 hPa, pressão ao nível médio do mar e temperatura em 850 hPa, em função do tempo de previsão, na América do Sul durante agosto de 2014.



Em uma avaliação espacial sobre a AS, as previsões de 36 horas foram escolhidas para representar as diferenças nos valores de RMSE entre ambos os experimentos para os impactos nas variáveis ZGEO em 500 hPa e PSNM, as quais são mostradas na Figura 4.7. O propósito fundamental dessa análise é observar em quais regiões específicas da AS se concentraram esses ganhos e perdas. Esse horário foi escolhido como recomendado em Sapucci et al. (2014), por serem as mais utilizadas em aplicações operacionais, pois representam as previsões de 12 horas do dia seguinte a sua divulgação pelos meteorologistas. Melhorias na ZGEO em 500 hPa são localizadas na metade sul da AS, com impactos positivos significativos localizados no sul do Brasil e norte do Uruguai, e na ponta sul da AS e oceanos adjacentes abrangendo a parte sul da Cordilheira dos Andes (CA). Parte da região nordeste do Brasil também é influenciada positivamente junto à porção noroeste da AS incluindo grande parte

do norte da CA e do oceano adjacente. Algumas áreas isoladas entre o noroeste e o centro da AS possuem também impactos positivos. Por sua vez, nota-se que para a PSNM os maiores impactos positivos são encontrados entre os 45°S e 50°S. Os resultados sobre a região nordeste do Brasil e o centro da AS apresentam uma melhoria abrangendo uma maior área. A porção noroeste da AS continua com impactos positivos para esta variável, porém diminuindo na horizontal, mas atingindo os 15°S de latitude. Parte dos oceanos adjacentes também são influenciadas positivamente ao incluir os perfis de refratividade do MetOp-B. Percebe-se que para esta variável os resultados com impactos positivos mostram-se menos abrangentes quanto para a ZGEO em 500 hPa. Da mesma forma, pode ser observado que uma área de impacto negativo é localizada na porção central e metade sul da CA, resultado pode estar relacionado com condições de SR nos sinais nessa região o que termina degradando a previsão. Mais estudos focalizados nas condições de SR sobre a CA devem ser realizados.

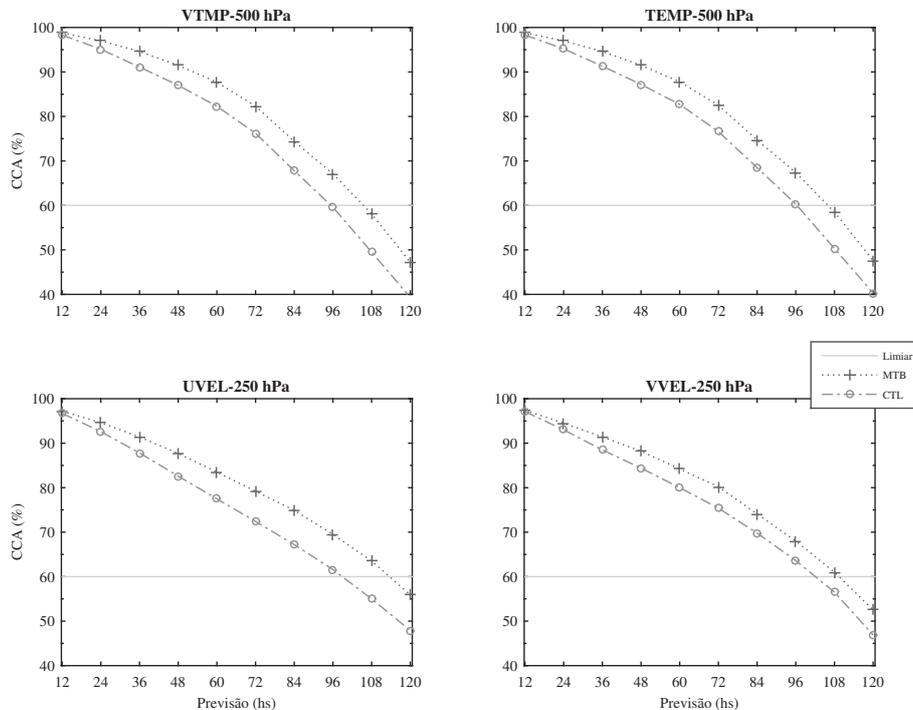
Figura 4.7 - Distribuição espacial da diferença nos valores de RMSE das previsões de 36 horas entre o experimento controle e o experimento MTB, para as variáveis altura geopotencial em 500 hPa (ZGEO-500, esquerda) e pressão ao nível médio do mar (PSNM-000, direita), na América do Sul durante agosto de 2014.



Além do exposto, apresentam-se também os resultados em relação ao tempo de

previsões válidas com base nos resultados dos CCA para a AS. Cabe destacar o comportamento das variáveis VTMP e TEMP em 500 hPa e as componentes de vento zonal e meridional em 250 hPa, UVEL e VVEL, respectivamente, para todo o tempo de integração do modelo, o qual é representado graficamente na Figura 4.8. Nessa figura é ressaltada a linha que corresponde com o 60% por ser o limiar proposto para as previsões válidas. Na figura é possível observar o ganho no CCA para cada tempo de previsão, sendo que para as 36 horas nas variáveis UVEL e VVEL em 250 hPa, respectivamente, encontrou-se ganhos de 3,6% e na VTMP em 500 hPa foi superior a 3,5% de ganho nas previsões quando comparado com as previsões sem utilizar os dados de RO-GPS do MetOp-B. A variável TEMP em 500 hPa, entretanto, apresentou 3,3% de ganho. Com isso, de modo geral mostra-se que ao assimilar dados de refratividade do MetOp-B são impactados também indiretamente variáveis como UVEL e VVEL dadas as melhorias observadas. Resultado similar a esse foi encontrado em Rennie (2008). Outra variável que reflete essa mesma influência é a VTMP, revelando uma intensificação das melhorias obtidas na temperatura.

Figura 4.8 - Comportamento das previsões válidas das variáveis temperatura e temperatura virtual em 500 hPa e as componentes zonal e meridional do vento em 250 hPa, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul.

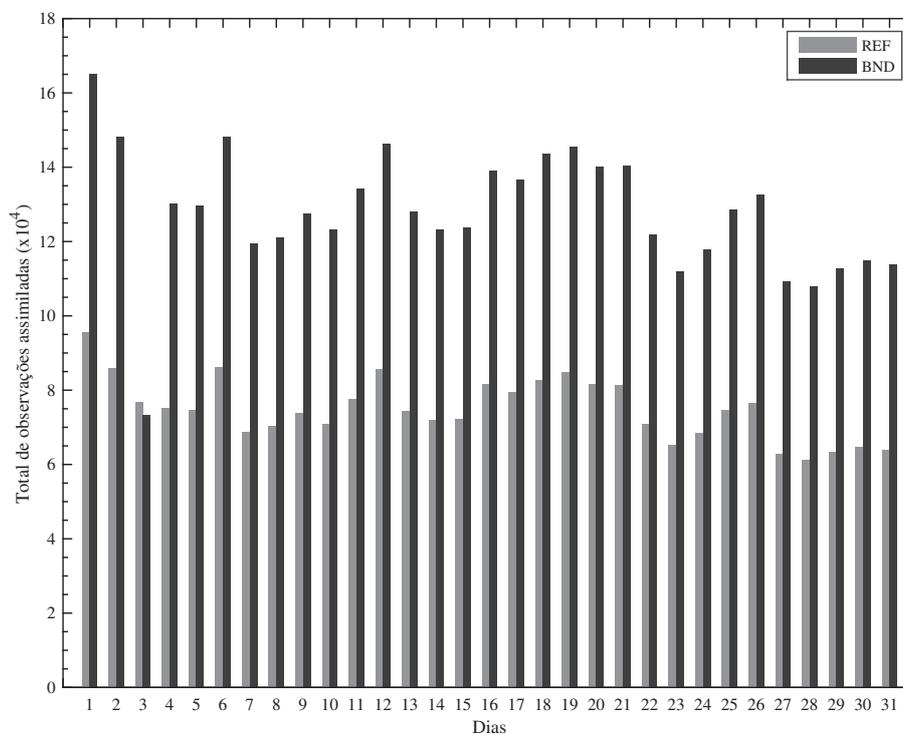


## 4.2 Impacto da assimilação de dados de ângulos de curvatura ao invés de perfis de refratividade

Em uma primeira avaliação de qual produto de RO-GPS se obtém o maior impacto positivo nas análises, as observações assimiladas em cada experimento foram quantificadas, tanto temporalmente como por níveis verticais de pressão da atmosfera, destacando-se em qual experimento e quais níveis foram os mais impactados. Na Figura 4.9 é mostrada a série temporal dos dados assimilados diariamente durante agosto de 2014, ou seja, a média nos 4 ciclos realizados a cada dia. Cada barra vertical cinza claro corresponde às observações de refratividade assimiladas, enquanto que os ângulos de curvatura assimilados são representados pelas barras cinza escuro. Observa-se claramente que o primeiro impacto positivo de assimilar ângulos de curvatura ao invés de perfis de refratividade incide na maior quantidade de observações que são usadas pelo sistema de assimilação em BND quando comparadas com o experimento REF. Isso sinaliza para o fato de que com a assimilação do BND a condição inicial obtida representa melhor o estado real da atmosfera. Nota-se uma diminuição na quantidade de observações assimiladas em ambos os experimentos no dia 3 de agosto, embora levemente menor em BND, que foi devido a uma menor disponibilidade das mesmas no horário das 0600 UTC especificamente.

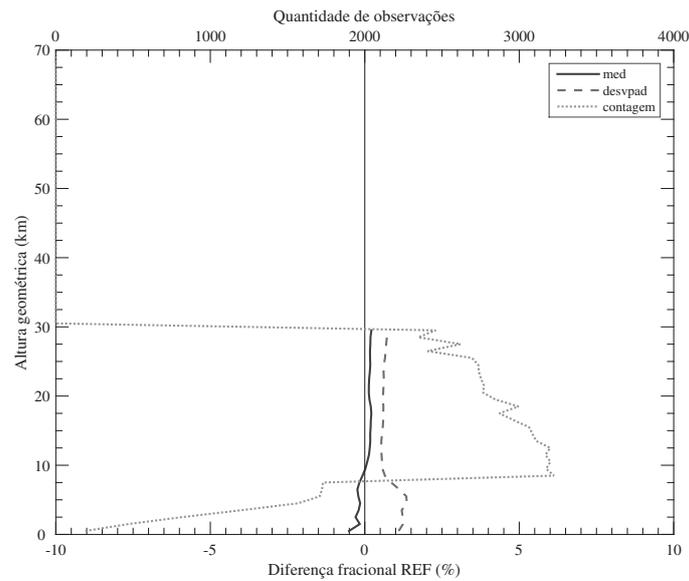
Assim como em Cucurull et al. (2013), as diferenças fracionais dos ângulos de curvatura, ou seja, o resultado de normalizar as inovações pela observação ( $\frac{O-F}{O}$ ), onde  $O$  representa as observações, e  $F$  o FG, foram quantificadas por camadas de altura em função do parâmetro de impacto (em km). O objetivo foi mostrar as observações que efetivamente passaram os procedimentos de QC e ficaram dentro da grade vertical do modelo. Os resultados das diferenças fracionais são apresentadas em porcentagem e normalizadas pelo desvio padrão dos erros das observações. Além da contagem foi calculada a média e o desvio padrão, por cada camada em um intervalo de 0,5 km e para o período de estudo. Para destacar as camadas da atmosfera mais impactadas ao assimilar ângulos de curvatura e refratividade, respectivamente, se apresenta a Figura 4.10. Nessa, se mostram estatísticas da média (curva preta) e o desvio padrão (curva descontínua cinza escuro) para as diferenças fracionais entre os perfis de refratividade e os simulados pelo modelo (Figura 4.11(a)), assim como entre as observações de dados de ângulos de curvatura e os valores simulados pelo modelo de previsão (Figura 4.11(b)), respectivamente. Adicionalmente, representada pela curva descontínua cinza claro se mostra a contagem das diferenças em cada camada de 0,5 km. Primeiramente, nota-se que as observações de ângulos de curvatura contribuem quase o dobro com o estado do modelo em relação aos perfis

Figura 4.9 - Série temporal do acumulado diário de observações de RO-GPS utilizadas no experimento assimilando perfis de refratividade (coluna cinza claro) e ângulos de curvatura (coluna cinza escuro) para o mês de agosto de 2014.

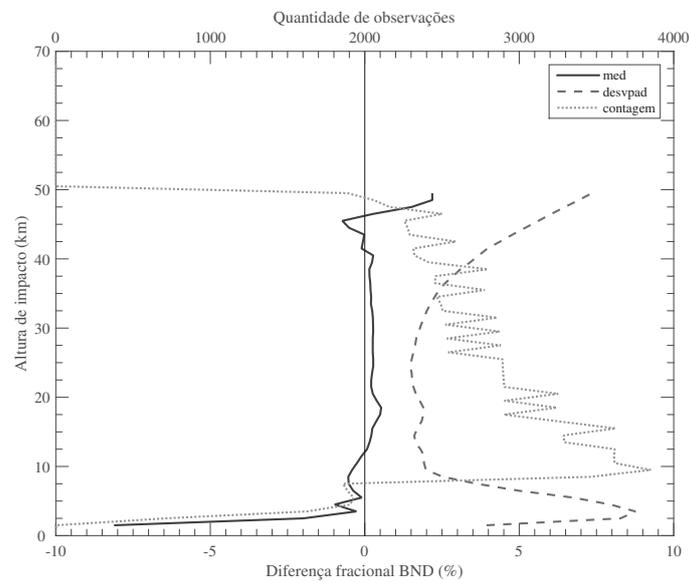


de refratividade. Com o experimento BND percebe-se uma maior extensão do domínio vertical do modelo impactada do que com dados REF, pois a refratividade é confinada a uma camada de menor extensão. Isso mostra uma das vantagens fundamentais de assimilar um produto de dados de RO-GPS menos processado, uma vez que de acordo com os procedimentos de QC os perfis refratividades em alturas superiores a 30 km são rejeitados. Em segundo lugar e como já foi mencionado, se verifica que a quantidade de observações assimiladas em cada camada é muito maior em BND do que em REF, essencialmente entre 8 e 15 km de altura, que em média representa a alta troposfera e baixa estratosfera. Esse resultado é similar ao obtido em vários estudos, como por exemplo, Cucurull et al. (2013). Vale ressaltar que embora a estratosfera não esteja diretamente envolvida no desenvolvimento dos sistemas de tempo diariamente, as condições estratosféricas impõem limitações ou restrições à variabilidade do tempo e do clima. Assim, uma adequada representação dessas camadas no modelo de previsão pode ser benéfico em aumentar a capacidade de previsibilidade do mesmo, como a temperatura da superfície do mar ou a cobertura do gelo marinho (KARPECHKO et al., 2016).

Figura 4.10 - Estatísticas das diferenças fracionais entre (a) as observações de perfis de refratividade em função da altura geométrica e as simuladas pelo modelo e (b) as observações de ângulos de curvatura em função da altura de impacto e as simuladas pelo modelo, para agosto de 2014.



(a)

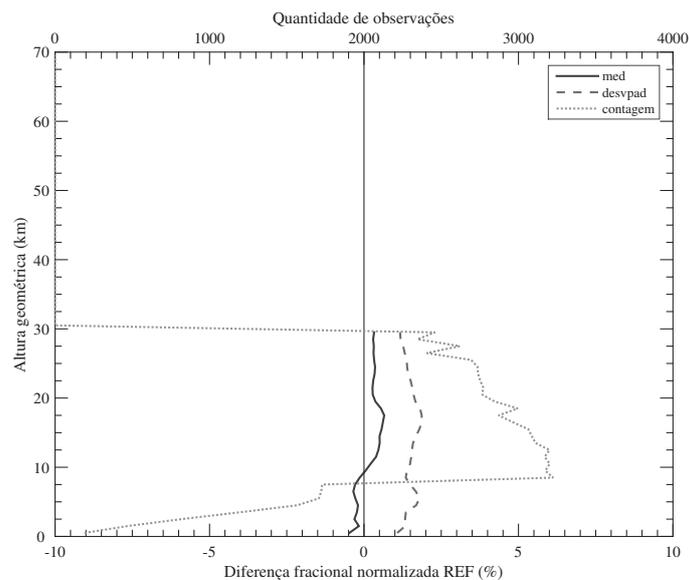


(b)

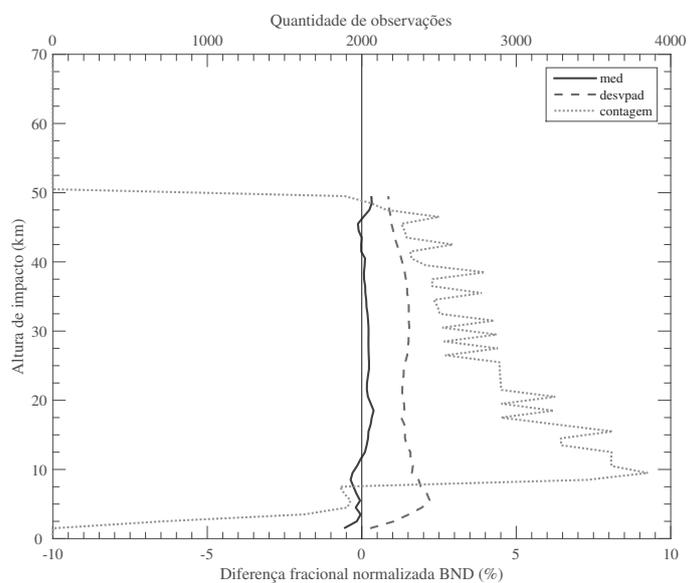
Na análise das camadas do perfil vertical mais impactadas pelos diferentes tipos de observações de RO-GPS, algo que se deve levar em consideração é a própria variabilidade vertical dos valores das quantidades físicas que tais observações quantificam. No caso dos dados de RO-GPS existe um comportamento bastante característico em função da altura, no qual os valores decrescem exponencialmente em função da altitude. Assim, normalizar as estatísticas em função do valor médio de cada camada da atmosfera permite definir o quão significativa pode ser essa variância nos dados em função da variabilidade dos valores observados, além de comparar os resultados entre as diferentes camadas da atmosfera. Os resultados dessa normalização são apresentados na Figura 4.11 para os experimentos REF e BND. Embora os ângulos de curvatura apresentaram um desvio padrão alto, nota-se na Figura 4.12(b) que normalizando pela média do valor do erro em cada camada, o desvio padrão se reduz a um valor muito mais coerente. O desvio em BND não mostra mais um comportamento exponencial, o mesmo se mantém entorno de 1,5% em toda a extensão da camada, semelhante ao que se observa na Figura 4.12(a) para os perfis de refração. Em ambos os casos, na altura de aproximadamente 5 km se aprecia um leve aumento no desvio, o que concorda com o descrito na literatura sobre porque essa altura é a escolhida como referência na recuperação dos dados de ângulos de curvatura pelo maior conteúdo de vapor d'água em alturas inferiores.

Um resumo da quantidade de observações disponíveis e as assimiladas em cada experimento para todo o mês de agosto de 2014 é apresentado na Tabela 4.1. Primeiramente, percebe-se que do total de observações de RO-GPS disponíveis, o que corresponderia com o total no experimento BND por ser um produto anterior à refração, 2,1% das não é convertido em refração no momento de recuperação do dado. Isso pode estar relacionado com o ponto de referência, sendo em função do parâmetro de impacto nos ângulos de curvatura e em função da altura geométrica nos perfis de refração, o que implica que algumas observações de ângulos de curvatura em alturas elevadas não consigam ser derivadas em refração. Em relação à quantidade de observações assimiladas em cada experimento, nota-se que ao assimilar perfis de refração se consegue explorar apenas o 42,1% do potencial dessa técnica, enquanto que com ângulos de curvatura se consegue explorar o 73,4% da mesma. Percebe-se que na camada entre 0-30 km a quantidade de dados de BND supera em 3,4% o total de observações assimiladas usando perfis de refrações. Uma vez mais, se destaca o intervalo de alturas entre 30-50 km onde 27,8% das observações são assimiladas em BND. Finalmente, o número de observações não assimiladas em cada experimento mostra que 55,8% não é aproveitado em REF. Isso evidencia a necessidade de se utilizar observações de ângulos de curvatura dentro do

Figura 4.11 - Estatísticas das diferenças fracionais normalizadas entre (a) as observações de perfis de refratividade em função da altura geométrica e as simuladas pelo modelo e (b) as observações de ângulos de curvatura em função da altura de impacto e as simuladas pelo modelo, para agosto de 2014.



(a)



(b)

sistema de assimilação, para que o estado da atmosfera seja mais adequadamente representado em toda a extensão do domínio do modelo.

Tabela 4.1 - Resumo da quantidade de observações assimiladas em cada experimento.

	BND	%	REF	%
Quantidade de observações	21.385.736	100	20.935.518	97,9
Assimiladas	15.688.745	73,4	9.002.718	42,1
0-30 km	9.736.151	45,5	9.002.718	42,1
0-50 km	5.952.594	27,8	0	0
Não Assimiladas	5.696.991	26,6	11.932.800	55,8

No processo de assimilação de dados usando métodos variacionais, especial atenção deve ser dada a minimização da função custo como uma medida de que o sistema está realizando corretamente a obtenção do estado de menor variância da atmosfera. Como parte da análise foi calculada a média e o desvio padrão para cada conjunto de função custo e norma do gradiente, por horário e por cada experimento realizado. Na Figura 4.12 se apresentam as funções custo e normas do gradiente para cada experimento realizado (CNT, REF e BND), um resumo das estatísticas é apresentado nos dois últimos painéis da figura. Para simplificar a análise e evitar redundância, o horário correspondente às 1200 UTC foi escolhido para essa análise. Esse horário foi o escolhido por ser aquele em que um maior número de dados estão disponíveis para a assimilação, portanto onde se requer maior eficiência no processo. Nota-se que o comportamento da curva de minimização das funções custo são semelhantes ao usar dados de BND e REF, embora observa-se um aumento dos valores do jacobiano em decorrência do total de observações assimiladas em cada caso. Esse resultado mostra que embora verifica-se um aumento significativo do número de observações com a assimilação de dados de BND, não é observado um aumento do custo computacional para se encontrar o estado de variância mínima desejado. Com o experimento BND se atingem os maiores valores da função custo e o desvio padrão é levemente superior aos obtidos em REF e CNT. Considerando que o desejado é um estado de menor variância, o desvio padrão da norma do gradiente indica que valores similares são obtidos nos experimentos realizados com um valor menor em BND. Assim, deve ser ressaltado que embora está sendo adicionado em BND quase o dobro das observações assimiladas em REF, não está aumentando o custo computacional do sistema, pois o valor mínimo é encontrado de igual forma em praticamente as 50 primeiras iterações. Outro aspecto interessante revelado nessa pesquisa, é que as

curvas de minimização mostram a quantidade de iterações que são suficientes para atingir o valor mínimo. Na configuração do GSI usada são realizadas 100 iterações em apenas um ciclo externo, e os resultados mostram que o mínimo da função custo é alcançado em aproximadamente 50 iterações, sendo que as outras 50 adicionais podem ser interpretadas como um gasto de recurso computacional que poderia ser aproveitado ao realizar um segundo ciclo interno, como é realizado em outros centros tais como o NCEP, ou poderia ser aplicado um método de convergência em que o próprio sistema determine a quantidade de iterações necessárias. Isso indica que um estudo visando melhorar a otimização do processo de minimização deve ser realizado pela divisão de modelagem do CPTEC.

Uma outra análise foi realizada para avaliar o custo de cada tipo de observação durante o processo de minimização. Como proposto em Cucurull et al. (2013), foi calculada a fração da redução da função custo inicial por um grupo de tipo de observações  $x$  durante esse processo. O cálculo foi realizado mediante a fórmula de redução:

$$Redução_x = \frac{J_{0_x} - J_{f_x}}{J_0 - J_f} \quad (4.1)$$

em que  $J_0$  e  $J_f$  correspondem às funções custo global inicial (do FG) e final (de  $X_a$ ) do total de observações, respectivamente, e  $J_{0_x}$  e  $J_{f_x}$  são as componentes das funções custo do grupo por tipo de observações  $x$ , os quais são: Pressão em superfície ( $P_s$ ); Temperatura ( $T$ ); Vento ( $V$ ); Umidade ( $U$ ); GPS (dados de refração ou ângulo de curvatura); e Radiação ( $Rad$ ). Para esse cálculo foi apenas selecionada uma data escolhida de forma aleatória em que se mostram os resultados de cada experimento, REF e BND, em porcentagem. Para distinguir a contribuição de cada observação individual na redução da função custo esses valores foram normalizados pelo total de observações assimiladas de cada grupo.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados das estatísticas do uso das observações antes de realizar a minimização ( $J_0$ ) e após realizado esse processo ( $J_f$ ), indicando quais as observações que mais auxiliaram (ou que menor custo proporcionaram ao sistema) no cálculo do valor mínimo. Essas tabelas são colocadas com o objetivo de compreender melhor como foram atingidos os resultados da fração da redução de  $J$  para os experimentos REF e BND, tendo em conta que foram aqueles onde se incluíram dados de RO-GPS. Como uma amostra representativa do que foi encontrado para o resto das análises geradas, os resultados são apresentados especificamente para a análise do dia 15 de agosto de 2014 às 1200 UTC.

Figura 4.12 - Estatísticas das funções custo e normas do gradiente para o experimento CNT, REF, BND e um resumo das estatísticas dos três experimentos realizados (de acima para abaixo, respectivamente), para o horário correspondente às 1200 UTC.

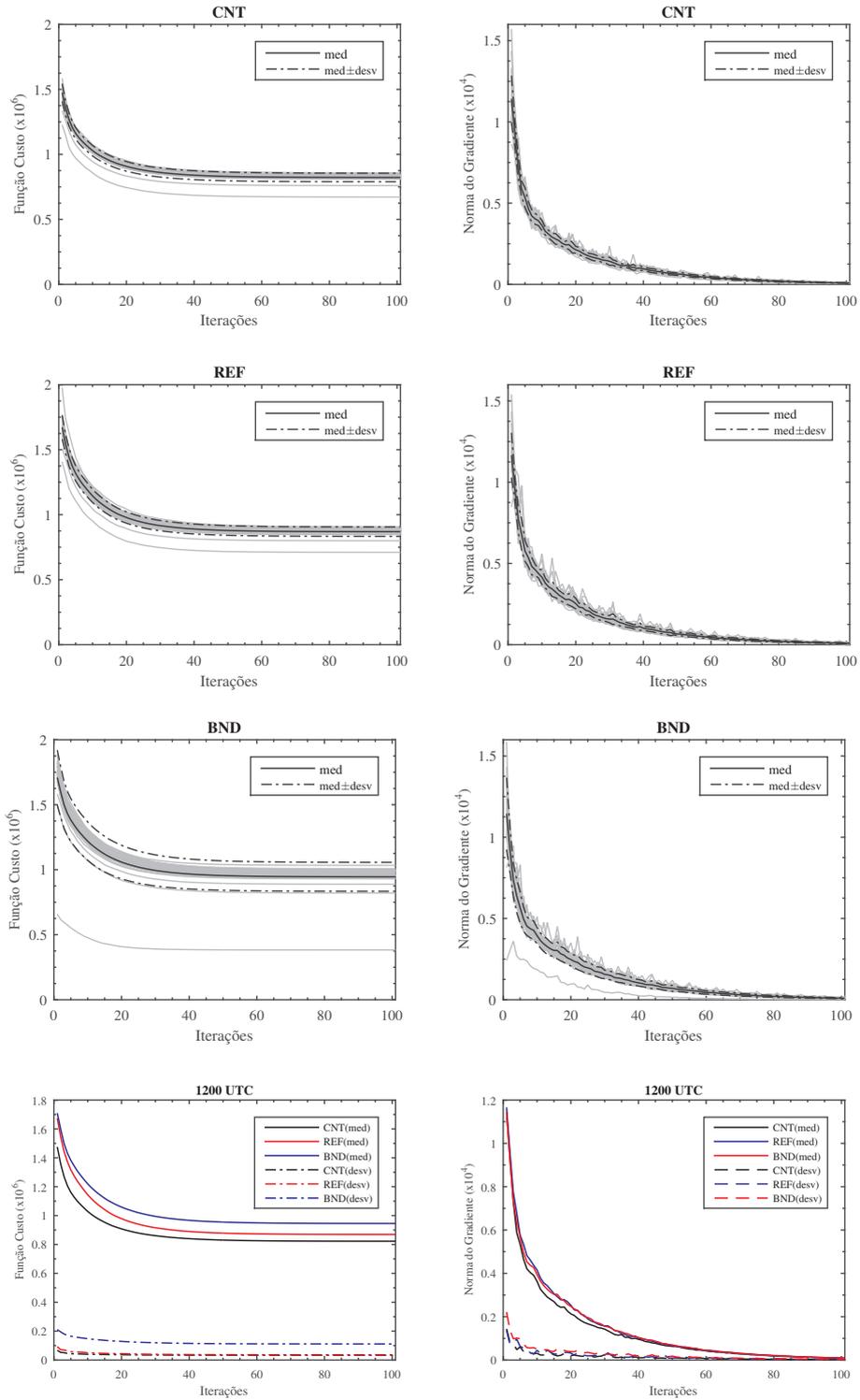


Tabela 4.2 - Estatísticas do uso das observações antes de iniciar o processo de minimização (1200 UTC 15 de agosto de 2014) em cada experimento.

Obs	BND			REF		
	Nobs	$J_0$	$J_0/n$	Nobs	$J_0$	$J_0/n$
$P_s$	70.096	1,42350549E+04	0,203	70.060	1,44790915E+04	0,207
T	38.579	7,39509427E+04	1,978	38.578	6,97765983E+04	1,809
V	288.292	2,26920471E+05	0,787	287.358	2,32709287E+05	0,810
U	15.788	1,03082794E+04	0,653	15.788	1,01733392E+04	0,644
GPS	118.804	2,64826230E+05	2,229	67.093	1,86241289E+05	2,776
Rad	2.494.632	1,17225055E+06	0,471	2.490.108	1,17637486E+06	0,472
$J_0$ Global	3.026.191	1,76249153E+06	0,583	2.968.985	1,68975447E+06	0,569

Tabela 4.3 - Estatísticas do uso das observações após ser realizado o processo de minimização (1200 UTC 15 de agosto de 2014) em cada experimento.

Obs	BND			REF		
	NObs	$J_f$	$J_f/n$	NObs	$J_f$	$J_f/n$
$P_s$	70.352	6,57839518E+03	0,094	70.330	6,56846640E+03	0,093
T	38.581	3,77552830E+04	0,979	38.579	3,64458249E+04	0,945
V	294.540	9,50443715E+04	0,323	293.580	9,55664442E+04	0,326
U	15.788	5,04613289E+03	0,320	15.788	5,00024991E+03	0,317
GPS	119.984	1,23959880E+05	1,033	69.340	4,06599035E+04	0,586
Rad	2.627.744	6,44408141E+05	0,245	2.628.053	6,51181281E+05	0,248
$J_f$ Global	3.166.989	9,12792203E+05	0,288	3.115.670	8,35422170E+05	0,268

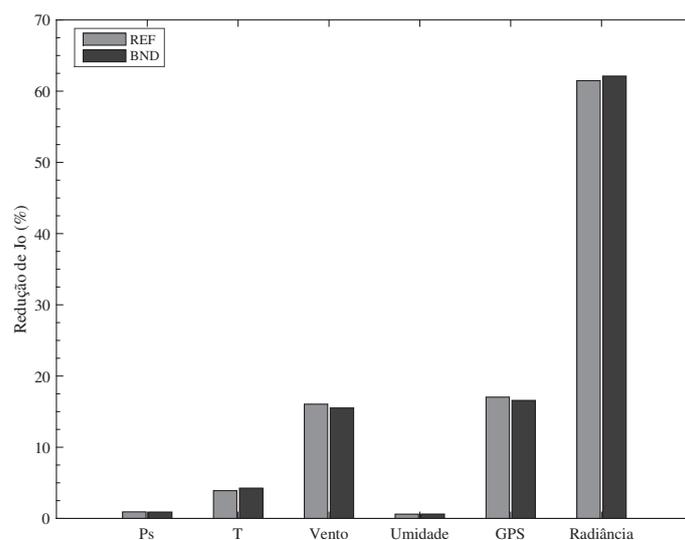
Em relação à contribuição de cada tipo de observação na fração de redução da função custo ( $J$ ), a Figura 4.14(a) mostra os resultados do cálculo dessa redução. Primeiramente se observa que as observações que mais contribuem são as de radiância com 60% na redução de  $J$ . Como segundo maior contribuidor se tem as observações de GPS reduzindo aproximadamente 17% de  $J$ , resultado que é seguido pelas observações de vento com uma redução de aproximadamente 16%, seguida pela temperatura com 4%, pressão em superfície com 1% e por último a umidade com 0,6% de contribuição na redução de  $J$ . O resultado encontrado nas radiâncias está relacionado com o número elevado de observações assimiladas desse sistema. Porém, ao normalizar pela quantidade total de cada tipo de observações, nota-se que a maior contribuição é dada pelas de GPS, como se observa na Figura 4.14(b). Os valores são adimensionais, sendo uma contribuição de  $2,5 \times 10^{-6}$  para cada observação de GPS e de apenas  $0,25 \times 10^{-6}$  para cada observação de radiância. Por outro lado, nota-se que para cada tipo de observação de RO-GPS a maior redução é encontrada

majoritariamente ao assimilar ângulos de curvatura. Porém, em quanto às próprias observações de GPS o maior valor de redução é atingido assimilando perfis de refratividade. Resultado similar foi encontrado em Cucurull et al. (2013), os autores atribuem esse comportamento ao fato da menor quantidade de refratividades que é assimilada em REF em comparação aos ângulos de curvatura assimilados em BND. Um outro motivo que é mencionado é a dificuldade que exige o operador de observações de ângulos de curvatura a diferença do operador para as refratividades, resultando em maior custo para o sistema.

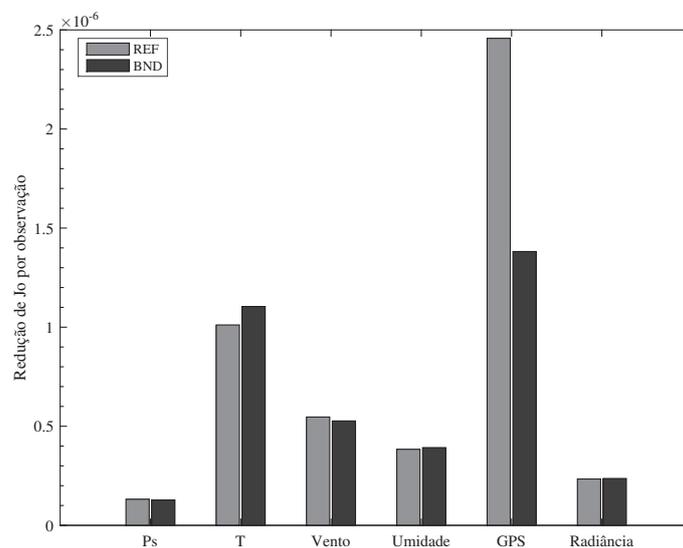
Para uma análise das diferenças incrementais entre as observações de RO-GPS e os valores previstos pelo modelo a partir do background, foram feitos histogramas de frequência referentes a essas quantidades em porcentagem e estratificando-as em intervalos de altura na atmosfera. O comportamento ideal seria uma distribuição gaussiana indicando uma distribuição normal das diferenças, ou seja, contínua e simétrica, caracterizada pela média e a variância da distribuição. Para o caso da refratividade foram analisados os resultados entre as alturas de 0 a 15 km e de 15 a 30 km, incluindo sempre o segundo valor do intervalo. Para os ângulos de curvatura, como esses foram estendidos até 50 km, além dos dois intervalos para REF foram também analisados os resultados entre 30 e 50 km. Para a elaboração dos histogramas foram definidas 600 classes para os resultados de ambos os experimentos, o tamanho de cada classe é chamado de *bin*.

A Figura 4.14 mostra histogramas de frequência de forma estratificada no perfil vertical referentes ao experimento REF e BND. As observações em geral parecem ser mais desviadas positivamente em relação às observações modeladas, porém ao assimilar perfis de refratividade se observa uma função de densidade de probabilidade menos desviada, assim valores mais frequentes próximos ao valor zero. Nota-se também, que cada barra vertical representa a frequência de cada classe. Para uma melhor interpretação dos resultados a escala no eixo das ordenadas foi estendida ao valor de 600 em todos os painéis. Na figura se evidencia claramente que no experimento REF as barras são menos pesadas quanto em BND, ou seja, uma menor quantidade de diferenças por cada classe. Esses resultados estão estreitamente relacionado com a quantidade de observações assimiladas nesse experimento, sendo que entre 0-15 km de altura em BND se concentram quase 600 observações por *bin*. Entre 15-30 km diminuem para entorno de 330, ainda mais que em REF, onde se concentram no máximo 220 observações por *bin* nas proximidades de zero. Já de 30-50 km nota-se que essa quantidade é incrementada a mais de 400 observações por *bin* no caso de BND. Embora em BND os valores das diferenças são mais pro-

Figura 4.13 - Contribuição de (a) cada tipo de observação (em %) e (b) cada tipo de observação normalizada pelo número de observações utilizadas em cada caso, na redução da função custo na análise gerada para o dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC.



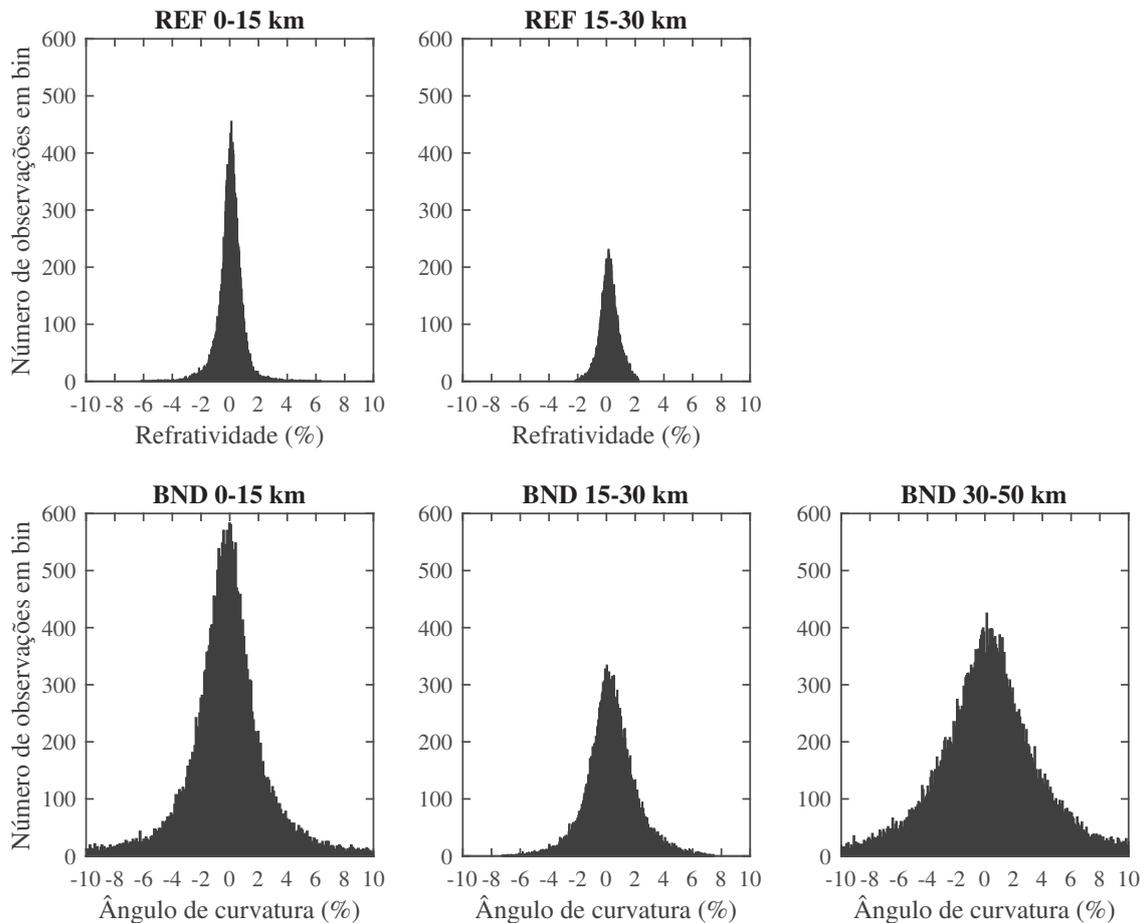
(a)



(b)

nunciados do que no experimento REF, diminuindo em alturas entre 15-30 km e persistindo entre 30-50 km, intervalo onde um maior número de diferenças é localizado na cauda da distribuição concordando com os maiores valores de desvio padrão observados na Figura 4.11(b). Porém, o comportamento nos intervalos de alturas analisadas mostra uma curva de distribuição gaussiana diferente do encontrado em Cucurull et al. (2013), onde as observações nesse intervalo mostraram uma curva de distribuição claramente não gaussiana. Em Healy et al. (2007) pode ser encontrado um estudo com resultados similares aos encontrados no presente estudo.

Figura 4.14 - Histogramas das diferenças entre as observações e as simuladas pelo modelo por intervalos de altura, nos experimentos REF (painéis superiores) e BND (painéis inferiores), referentes à análise gerada para o dia 10 de agosto de 2014 às 1200 UTC.



Considerando que o objetivo da assimilação de dados é prover a melhor condição

inicial para o modelo de previsão, um desbalanço entre as variáveis introduzido durante esse processo de assimilação pode degradar as previsões geradas a partir da condição inicial fornecida ao modelo. Frente a isso, o cálculo da tendência absoluta média da pressão em superfície, segundo [Lynch and Huang \(1992\)](#), mostra-se como uma ferramenta útil para medir a porção de desbalanço gerada na análise a partir do processo de assimilação. [Wang et al. \(2013\)](#) também usaram o cálculo de tendência como uma medida do ruído de alta frequência nas previsões geradas em várias simulações realizadas usando diferentes tipos de inicialização. A formulação para o cálculo da tendência absoluta média (T) é dada por:

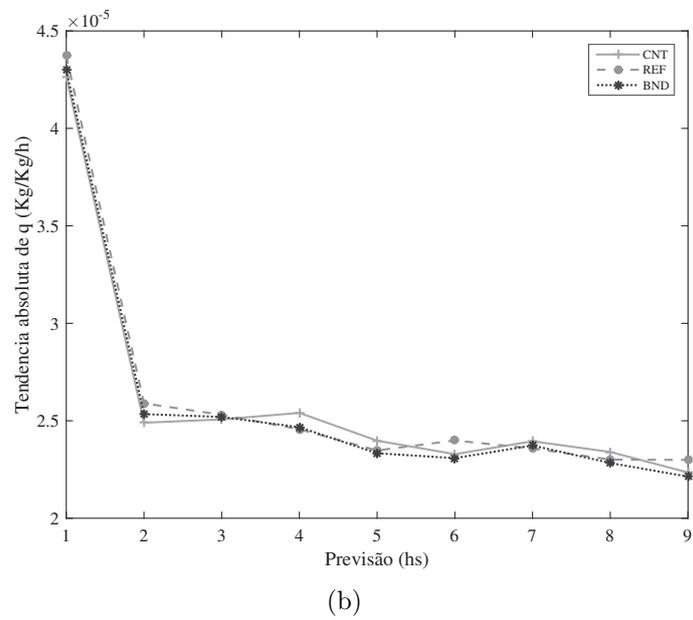
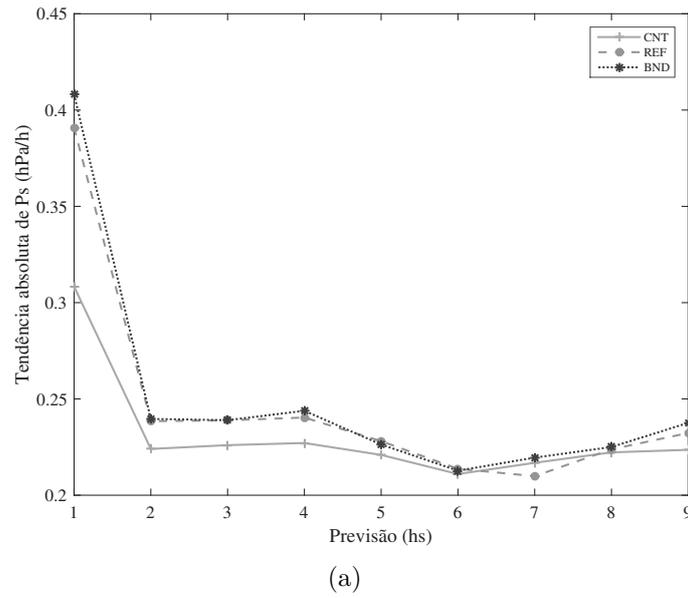
$$T_{exp} = \left(\frac{1}{IJ}\right) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| \frac{\partial p_s}{\partial t} \right| \quad (4.2)$$

em que o subíndice *exp* representa cada experimento realizado, *I* e *J* são os pontos do domínio,  $p_s$  é a pressão em superfície e *t* o tempo, neste caso as 9 horas de previsão que são realizadas dentro do ciclo. A área em que foi avaliada a tendência correspondeu à região global. Valores de tendência menores e equilibradas entorno a um valor indicam balanço nas análises geradas em cada experimento. Além da tendência absoluta média da pressão em superfície foi explorada a tendência absoluta média da temperatura e a umidade em superfície.

Para avaliar o impacto no balanço do modelo com a assimilação cíclica dos diferentes tipos de observações RO-GPS, foi analisado o comportamento de medidas de tendência para os diferentes experimentos em função do tempo de integração dentro do ciclo de assimilação. A Figura 4.15 mostram os valores para a tendência de pressão e de umidade, respectivamente. Observa-se nessas figuras que após a segunda hora de previsão é atingido o balanço nas variáveis analisadas  $P_s$  e *q* em superfície. A tendência na  $P_s$  nos 3 experimentos possui um valor inicial entre 0,3 e 0,4 hPa/h diminuindo na segunda hora de previsão para valores inferiores à 0,25 hPa/h. Nota-se que os valores de tendência ficam oscilando entre 0,2 e 0,25 hPa/h nos 3 experimentos, o que indica que as análises geradas se encontram equilibradas. A tendência em *q* se comporta de forma similar, oscilando após a segunda hora entre 2,25 e 2,5 kg/kg/h.

Para a avaliação do impacto de assimilar ângulos de curvatura e perfis de refatividade foi calculado o ganho dos experimentos REF e BND em relação ao experimento CNT, seguindo a metodologia já descrita. Porém, para ressaltar mais claramente onde se concentraram os ganhos obtidos com o experimento BND sobre o REF,

Figura 4.15 - Tendência absoluta média (a) da pressão em superfície e (b) da umidade no nível de 1000 hPa, em cada experimento, sobre a região global.

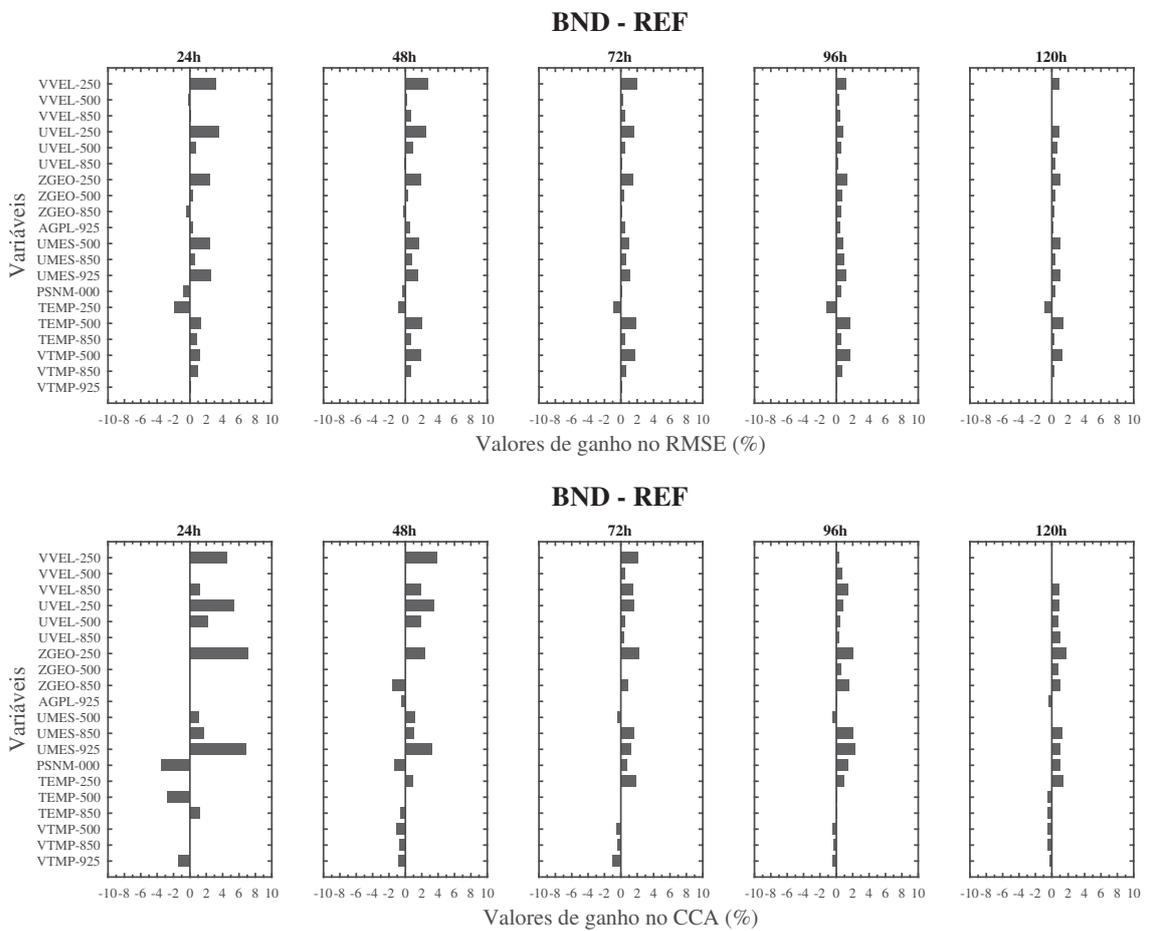


foi calculada a diferença nos valores de ganho no RMSE e CCA entre esses experimentos. Na Figura 4.16 essas diferenças são apresentadas para cada horário de previsão em cada variável por níveis analisados. Os resultados evidenciam que ao assimilar ângulos de curvatura são obtidos os maiores valores de impacto durante todo o tempo de previsão, sendo que em 24 horas se atingem os valores mais pronunciados. Os resultados mais sobressalentes se observam nas variáveis UMES em 500, 850 e 925 hPa; ZGEO, UVEL e VVEL em 250 hPa; e TEMP em 500 hPa. Era esperado um impacto positivo nos altos níveis considerando a grande quantidade de dados de ângulos de curvatura que foram assimilados entre 30-50 km, mas nota-se como o estado geral da atmosfera foi impactado em toda sua extensão devido à assimilação desses dados, principalmente o ganho na umidade, o qual é realmente promissor, pois nos experimentos adicionando o MetOp-B apresentou perdas. Isso pode estar relacionado à escolha de variável de controle da umidade, nesse caso a pseudo-umidade relativa.

A fim de detalhar as regiões do globo onde se centraram esses ganhos, essas diferenças são apresentadas nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 para 24, 72 e 120 horas de previsão, respectivamente, as quais são separadas para diferentes domínios do globo. Para as 24 horas de previsão, a escala em que se apresentam os resultados da região EQ foi estendida para valores entre -100 e 100% pois é onde claramente se observam os ganhos mais sobressalentes no RMSE e CCA, de aproximadamente 80% no CCA, embora os maiores valores de perda também são encontrados nessa região. Particularmente a região EQ, como foi discutido na seção anterior, é onde se apresentou o menor desempenho ao incluir as observações de refratividade provenientes do MetOp-B, fundamentalmente pela menor quantidade de observações que se concentram nessa região. Porém, nota-se que primeiramente, ao atualizar o sistema de assimilação e o modelo de previsão, um melhor desempenho é alcançado nessa região mesmo assimilando perfis de refratividade. Dessa vez, ao assimilar ângulos de curvatura, valores elevados de ganho são encontrados nessa região, destacando-se o benefício de assimilar esses dados ao invés da refratividade. Resultados dessa magnitude no ganho para a região EQ não tinham sido encontrados anteriormente em outros estudos no CPTEC.

Na região do HN, embora os resultados não atingiram valores tão pronunciados quanto na EQ, mostram-se ganhos ao assimilar ângulos de curvatura fundamentalmente no CCA na variável UMES em 925 hPa, sendo que no RMSE os ganhos foram estendidos à maioria das variáveis. No HS não foram obtidos valores muito marcantes de ganhos nos resultados de ambas estatísticas, embora no CCA são bem

Figura 4.16 - Diferenças do ganho percentual nos valores de RMSE e CCA em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para 24, 48, 72, 96 e 120 horas de previsão (da esquerda para a direita, respectivamente) sobre a região global, durante agosto de 2014.



importantes na UMES em 500, 850 e 925 hPa e em ZGEO em 250 hPa. Como essa análise é comparativa com os resultados obtidos na assimilação no experimento REF, os resultados são menores do que normalmente observados nessa região quando comparados com experimentos sem dados de RO-GPS. Dentro do HS a região de maior interesse para o CPTEC é AS, onde os ganhos parecem concentrar-se. Nota-se que assimilando ângulos de curvatura são obtidos valores de diferenças em relação à assimilação de refratividades de quase 15% no CCA e 10% no RMSE, com ganhos de aproximadamente 5% nas variáveis UVEL, VVEL e ZGEO em 500 e 250 hPa, UMES em 500 e 850 hPa, e aproximadamente 2,5% na TEMP em 500 e 850 hPa e VTMP em 500, 850 e 250 hPa.

Para as 72 horas de previsão nota-se que os ganhos persistem nos valores do CCA na região EQ, mas no RMSE já se apresentam perdas quando comparado com a assimilação de refratividades. No HN e HS os ganhos se mantêm, embora menos pronunciados. Em contraste, na AS os valores de ganhos mostram-se ainda sobresalientes, entre 5-10% nas variáveis UVEL e VVEL em 850 hPa e TEMP em 250 hPa, que apresentaram pequenas perdas em 24 horas, mas apresentam ganhos em 72 horas de integração. Ressalta-se que a exceção da variável AGPL em 925 hPa o resto apresenta ganhos na AS, denotando a importância de assimilar as observações de ângulos de curvatura nessa região.

Para as 120 horas de previsão, conforme foi encontrado nos resultados da seção anterior, o modelo de previsão é capaz de prever com um bom desempenho as variáveis analisadas. Tudo indica que 120 horas antes o modelo em uso consegue prever um estado da atmosfera onde se reflete um balanço termodinâmico obtido dada a entrada de uma condição inicial resultado da assimilação de um grande número de observações distribuídas de forma global e com uma alta resolução vertical. Assim, nesse horário nota-se que no HN e HS os ganhos persistem em algumas variáveis como ZGEO em 250 hPa e UMES em 925 hPa, embora já menores. Na região da AS os ganhos são mantidos em quase todas as variáveis e entorno do mesmo valor. No caso da EQ são apresentadas perdas em todas as variáveis nos valores do RMSE a exceção da UMES em 500 e 925 hPa, enquanto ao CCA a variável UMES mostra perdas em relação à assimilação de refratividades, mas a quantidade de variáveis em que se mantêm os ganhos nas previsões é maior. Os resultados encontrados nos campos de umidade, ainda persistentes em 120 horas de integração, podem ser um impacto positivo de usar pseudo-umidade relativa, como já tinha sido explorado em [Campos et al. \(2016\)](#)

Figura 4.17 - Diferenças do ganho percentual nos valores de RMSE e CCA em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) para as regiões Hemisfério Norte extratropical, Equatorial, Hemisfério Sul extratropical e América do Sul (da esquerda para a direita, respectivamente), durante agosto de 2014.

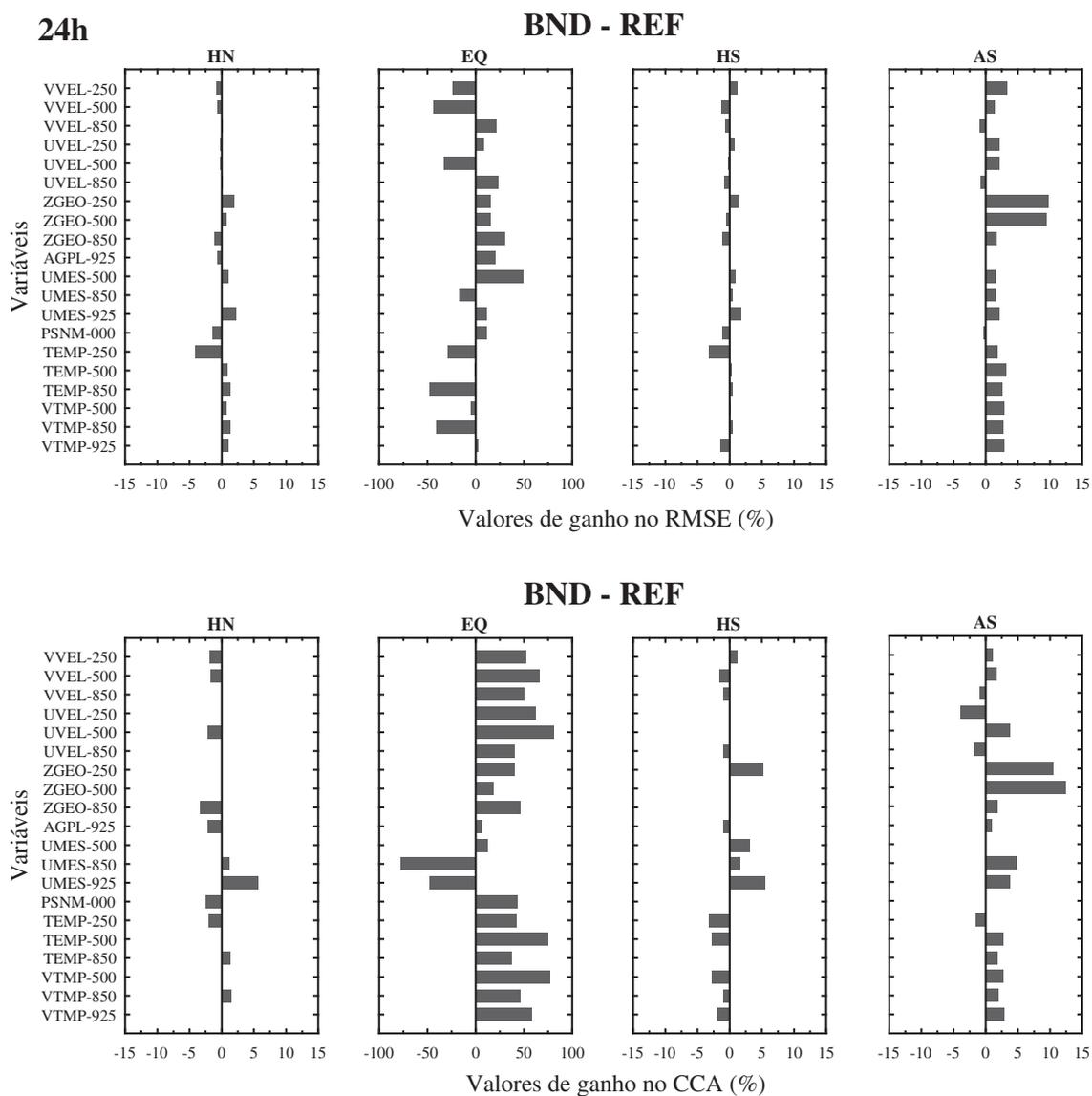


Figura 4.18 - Idem a Figura 4.17, exceto que para as previsões de 72 horas.

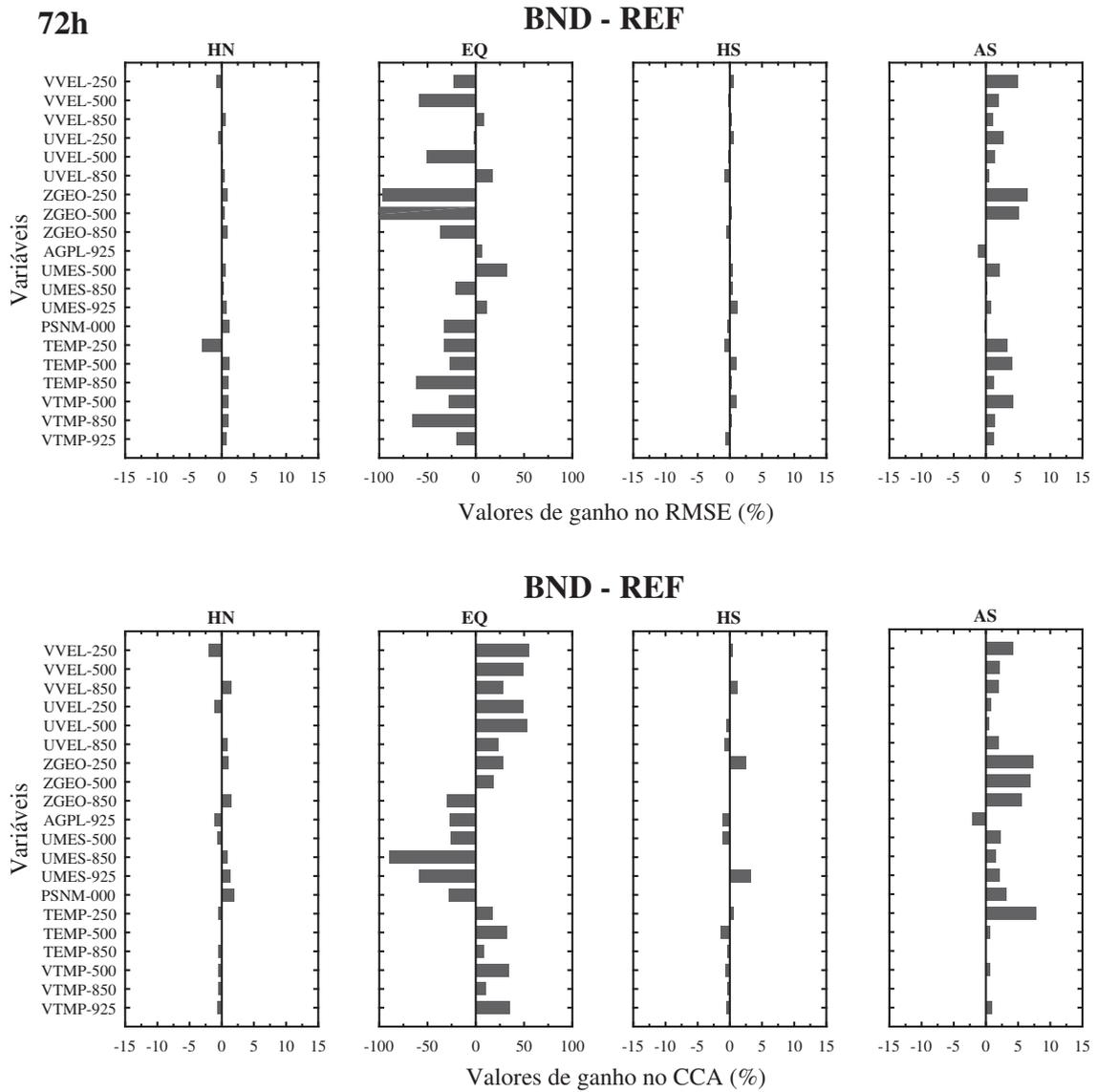
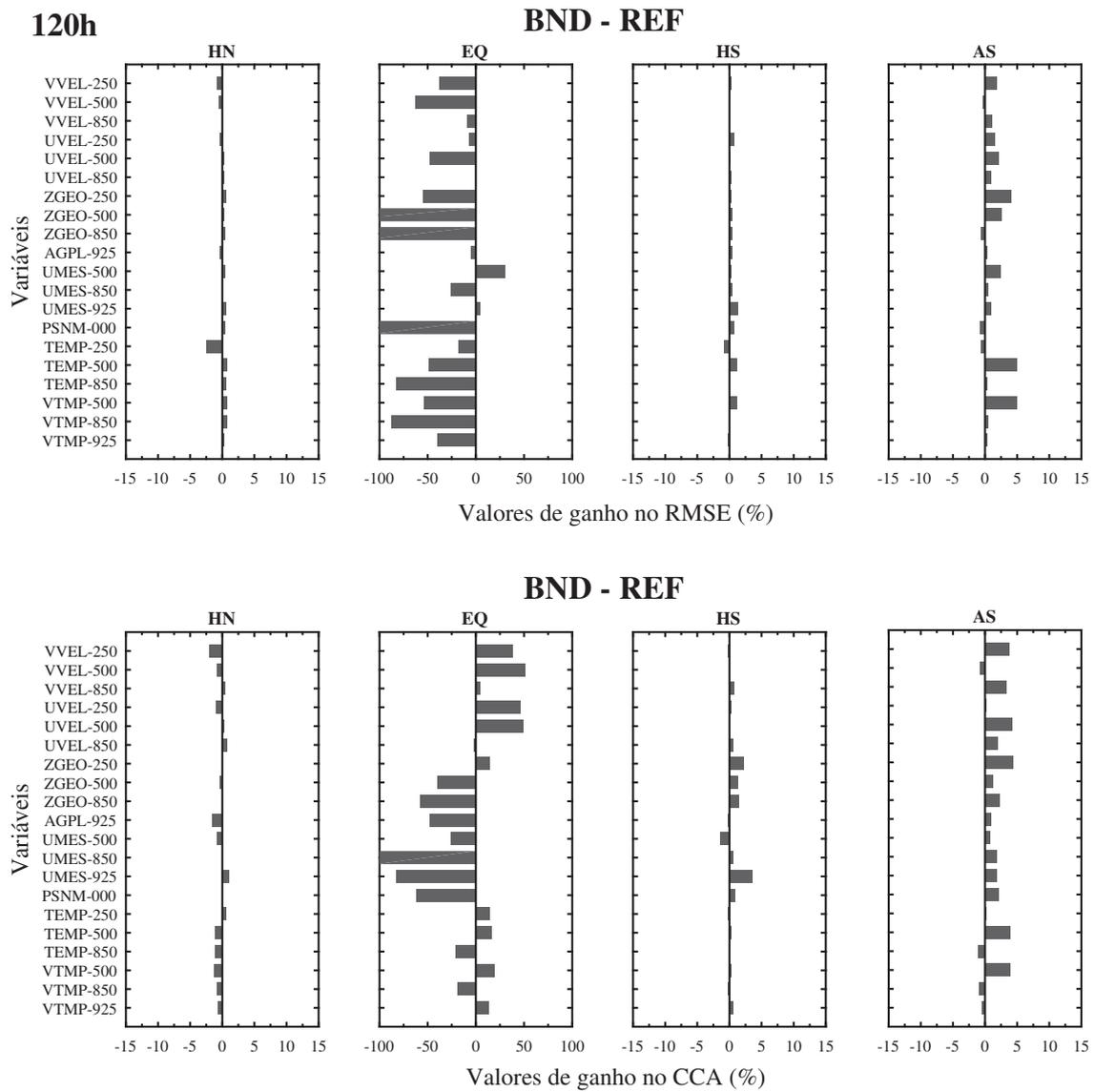


Figura 4.19 - Idem a Figura 4.17, exceto que para as previsões de 120 horas.



Considerando os resultados obtidos na AS, na Figura 4.20 são mostrados os valores de FC calculados para os experimentos BND e REF nessa região, ressaltando a linha de zero, pois os valores positivos indicam um maior impacto. Em geral, os resultados de FC entre os dois experimentos indicam que com BND os valores ficam mais positivos que com REF em uma maior quantidade de variáveis. Se observa que os níveis da atmosfera mais impactados são 500 e 850 hPa, com mais variáveis ultrapassando o valor de zero. Porém, no nível de 250 hPa com BND se obtém resultados mais positivos que em REF. A partir desses resultados podem ser analisadas várias questões. Na avaliação das análises se mostrou que a assimilação dos ângulos de curvatura em alturas entre 30-50 km apresentou valores de desvio padrão de aproximadamente 7%, essa região se corresponde com os altos níveis onde os resultados sobre a AS são menos pronunciados quanto os da média e baixa atmosfera. Um aspecto importante a analisar é a resolução vertical do modelo em uso, de 64 níveis sigma na vertical, o qual pode não ser ainda o adequado para assimilar esse tipo de observação que possui uma resolução vertical que varia de 0,5 km na baixa troposfera e 1,4 km na atmosfera média (KURSINSKI et al., 1997). Por outro lado, como não existem muitos outros tipos de sistemas de observações que forneçam de forma confiável medições nessa altura, é provável que o modelo não possua uma adequada caracterização dos erros nessa área do domínio, de forma que é necessário a realização de estudos em que seja calculada uma nova matriz de covariância dos erros do modelo ( $B$ ).

Visando compreender melhor os resultados obtidos na AS, na Figura 4.21 são apresentados os valores de CCA para todas as variáveis avaliadas nos três experimentos realizados. Destaca-se o fato de que em todas as variáveis e durante todo o tempo de integração do modelo os valores de CCA se mantêm acima do 60%, limiar proposto na meteorologia como previsões válidas. Esse resultado indica a destreza sinótica do modelo em prever os padrões de grande escala ao comparar com os resultados obtidos na seção anterior. Nota-se uma grande diferença, pois nesses as curvas do CCA decaem mais rapidamente e atingem o 60% entorno das 96 horas de previsão.

Esses resultados na variável ZGEO em 500 hPa são ampliados na Figura 4.22, onde pode ser observado com mais detalhes o comportamento de cada experimento. Nota-se que com a assimilação de ângulos de curvatura se obtém uma extensão nas previsões válidas durante as 120 horas de integração, sendo mais marcadas depois das 60 horas de previsão. Perto do horário da análise ao assimilar ambos os dados, os resultados são satisfatórios, porém em BND se observa que desde 120 horas antes o modelo prevê adequadamente o estado da atmosfera melhor que assimilando os perfis de refratividade. Embora, além dos bons resultados alcançados de forma ge-

Figura 4.20 - Mudança fracional nos valores de RMSE para todas as variáveis avaliadas, na América do Sul durante agosto de 2014.

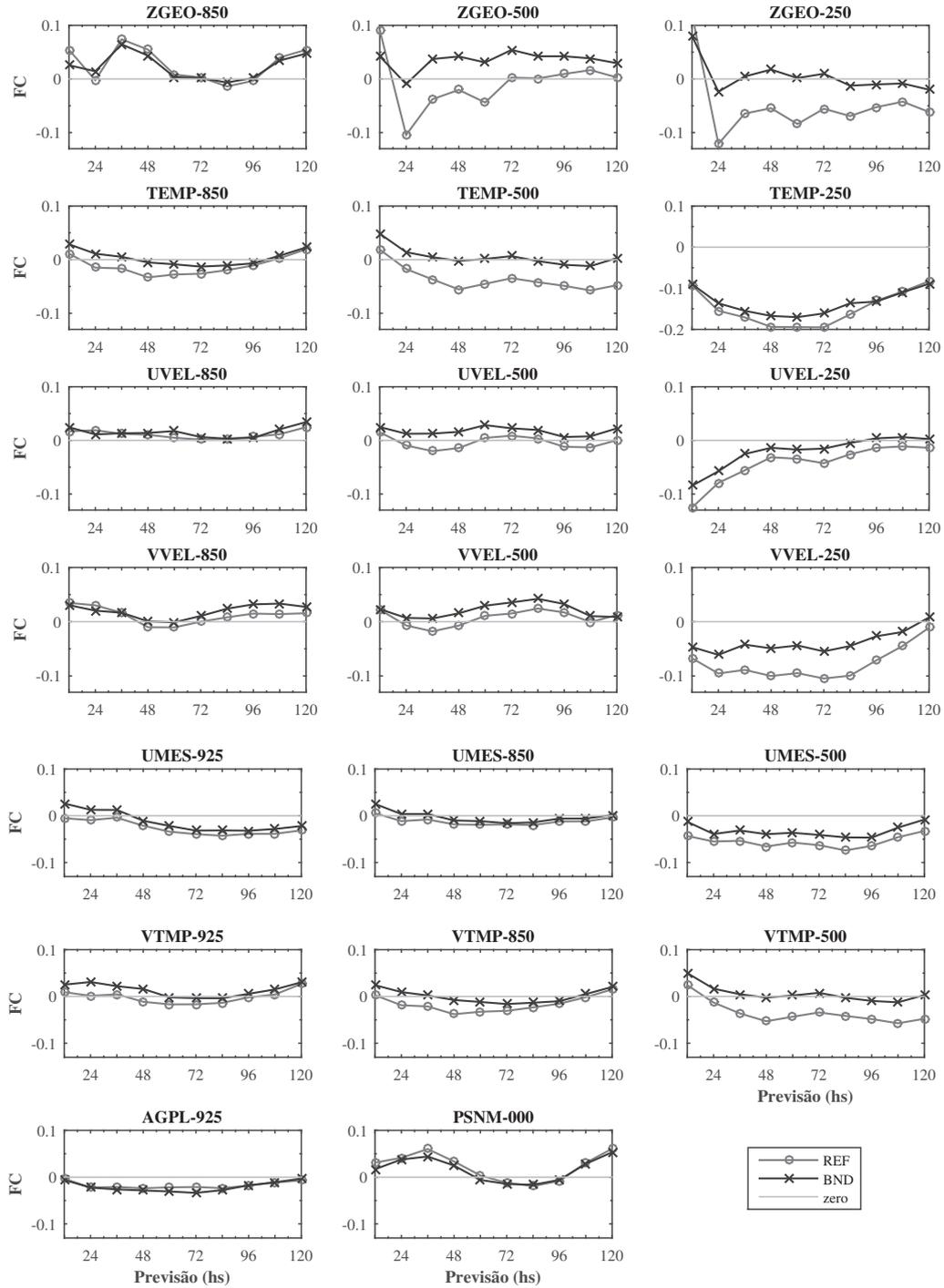
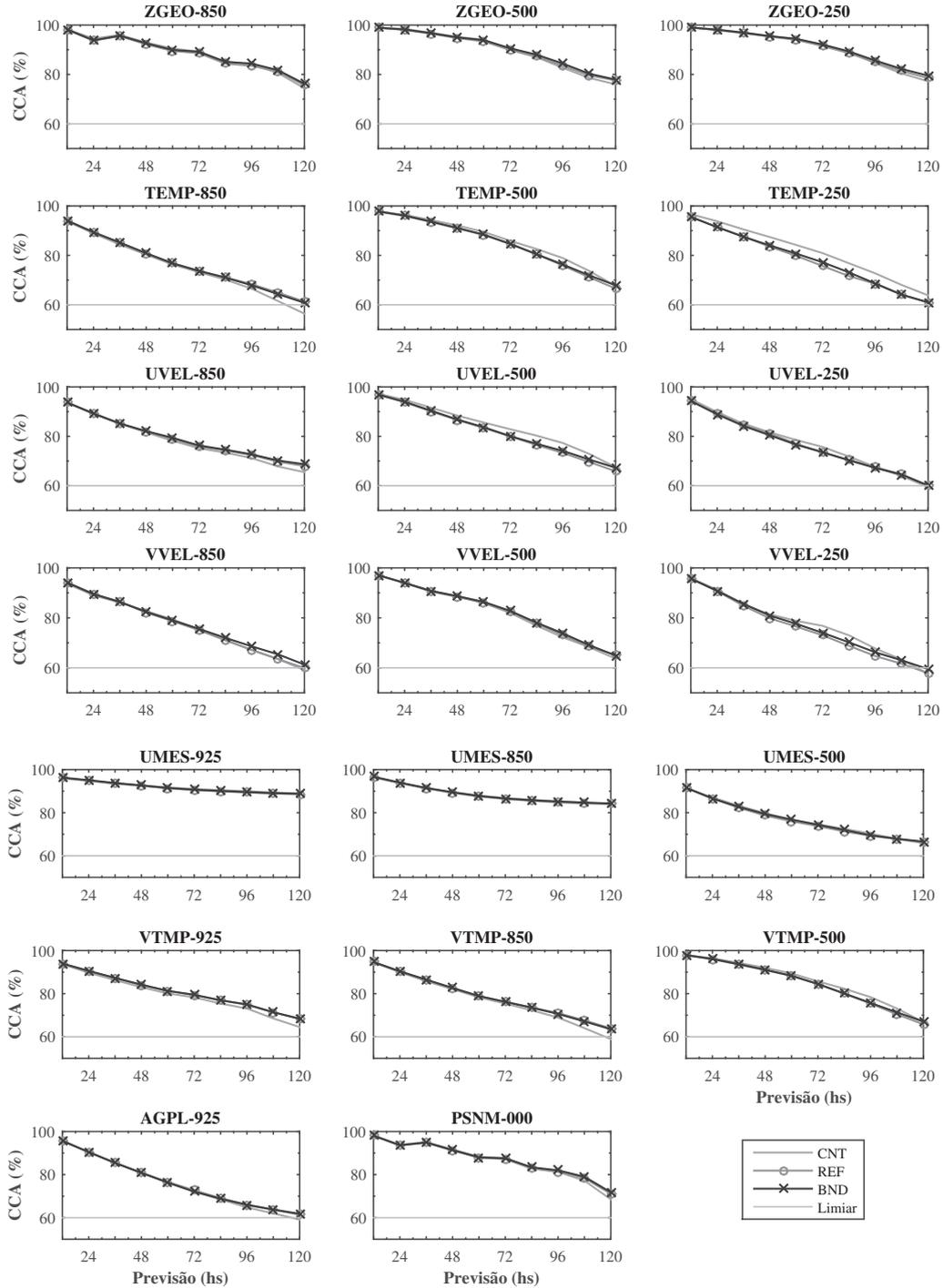
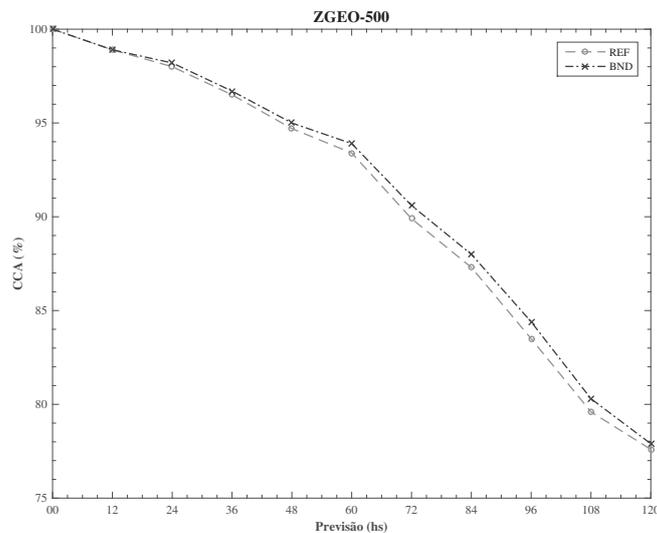


Figura 4.21 - Comportamento das previsões válidas para todas as variáveis avaliadas, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul.



ral, existe um menor desempenho no nível de 250 hPa, o que pode estar relacionado com a necessidade de uma maior resolução vertical do modelo e de uma melhor representação da atmosfera nos altos níveis, isto é por exemplo: representar mais realisticamente a camada de ozônio na estratosfera bem como o arrastro por ondas de gravidade, o que deve ser mais explorado em pesquisas futuras.

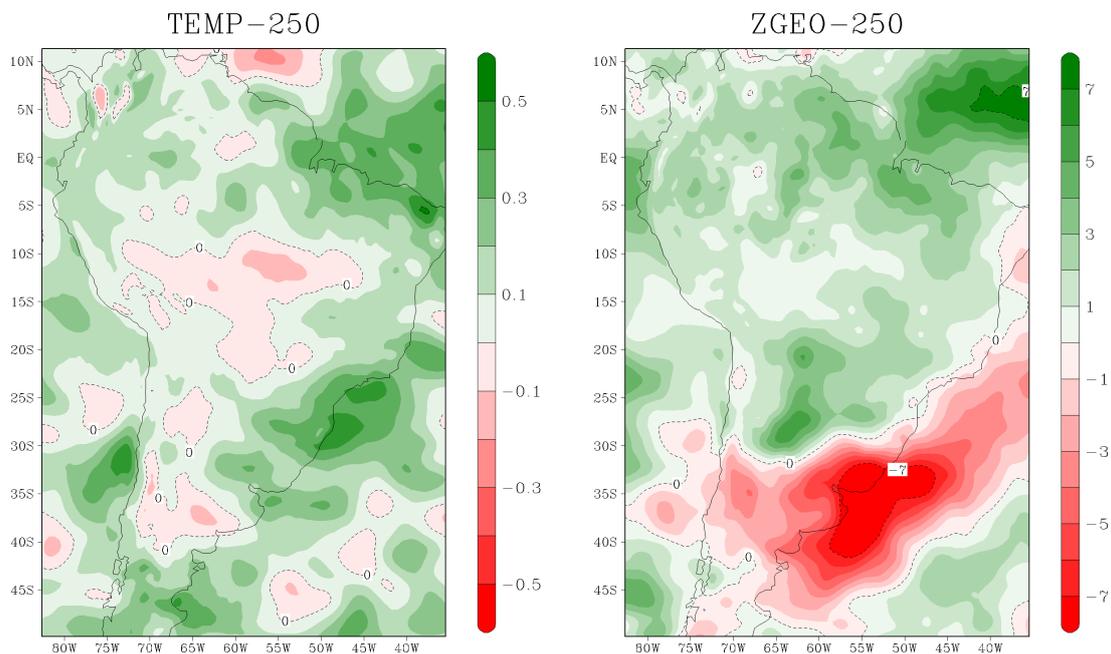
Figura 4.22 - Comportamento das previsões válidas para a variável altura geopotencial em 500 hPa, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul.



Os resultados no RMSE foram semelhantes aos obtidos no CCA, embora ao comparar cada experimento, BND e REF respectivamente, com respeito ao experimento CNT, em uma avaliação espacial sobre a AS os resultados são promissores para essa região. As diferenças BND-CNT das variáveis TEMP e ZGEO em 250 hPa para as 24 horas de previsão podem ser observadas na Figura 4.23. Na TEMP em 250 hPa se observam grandes melhorias no RMSE que quando não se assimilam dados de RO-GPS, indicando a necessidade dos mesmos para a realização das previsões. Em uma visão geral, a AS é impactada positivamente, principalmente a região nordeste e sudeste do Brasil, sendo que o sudeste brasileiro é uma das mais difíceis de prever. A Cordilheira dos Andes é também impactada positivamente em toda sua extensão, assim como a maior parte dos oceanos adjacentes. Já em ZGEO em 250 hPa esses resultados foram expandidos abrangendo a quase toda a região centro e norte de AS, bem como os oceanos adjacentes. É observada uma área onde o impacto é negativo, concentrado no sudeste de AS. Essa região é mais afetada por instabili-

dade associada à passagem de sistemas frontais caracterizados por fortes gradientes horizontais o qual constitui uma das debilidades dessas observações ao considerar simetria esférica.

Figura 4.23 - Distribuição espacial da diferença nos valores de RMSE das previsões de 24 horas entre o experimento controle e o experimento BND, para as variáveis temperatura em 250 hPa (TEM-250, esquerda) e altura geopotencial em 250 hPa (ZGEO-250, direita), na América do Sul durante agosto de 2014.



#### 4.2.1 Avaliação das previsões de precipitação usando EOF

Para avaliar o impacto da assimilação de dados de RO-GPS no desempenho do modelo BAM na previsão do campo de precipitação, foram comparadas as quatro EOF Observadas e Previstas calculadas para os três experimentos realizados. A Tabela 4.4 mostra a fração de variabilidade (FVar) da série representada em cada EOF (em porcentagem) e por tempo de previsão. Nota-se que a FVar Acumulada (FVar Acum.) das EOF Observadas para 24 horas de previsão, explica aproximadamente

48,8% da variação da precipitação na área analisada, o que demonstra a grande variabilidade da precipitação. Uma melhor representação da variância do campo observado poderia ser encontrada ao analisar um período mais longo no mesmo ano, ou o mesmo mês de vários anos. Isso é considerando que fundamentalmente os trabalhos consultados usam as EOF desde o ponto de vista climatológico. Porém, o resultado obtido para as EOF Observadas é o usado como referência para a comparação com as EOF Previstas. Na Tabela 4.4 também se apresentam os resultados de FVar e FVar Acumulada para as EOF Previstas, onde percebe-se que a tendência do modelo é de super-estimar a precipitação. Para 24 horas de previsão a FVar Acumulada das quatro EOF Previstas em CNT, REF e BND, atinge em média 65%, super-estimando em aproximadamente 20% os padrões de variabilidade atmosféricos. Vale ressaltar, que entre os três experimentos e em todos os tempos de previsão, uma pequena melhoria no desempenho é obtida ao assimilar ângulos de curvatura persistindo até as 120 horas, embora nota-se que os valores no experimento REF não distam muito dos obtidos em BND. Ao analisar os resultados do experimento CNT observa-se que são atingidos os maiores valores de super-estimativa da variabilidade da precipitação.

Devido a que os valores de FVar nas EOF Observadas não atingem o 50%, foi realizada uma avaliação espacial dos padrões de variabilidade apresentados na primeira EOF Observada. Para isso, foi analisada a precipitação acumulada durante todo o mês de agosto a partir das estimativas do TRMM, as que foram usadas para o cálculo dessas EOF. A Figura 4.24 mostra esse resultado, bem como o acumulado de precipitação para esse mês fornecido pela parte de monitoramento do clima da AS do CPTEC/INPE (CPTEC, 2017). Primeiramente, nas Figuras 4.24(a) e (b) constata-se um padrão na região norte da AS que pode estar relacionado à posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), abrangendo a região noroeste da AS. Na literatura é reportado que nos meses de julho-agosto a posição desse sistema é descolado mais ao norte e o contrário acontece nos meses de verão (UVO, 1989). Como o mês em questão é agosto, o padrão obtido é coerente com o reportado. Um núcleo de maior intensidade se observa entorno da linha meridional dos 5°N, que pode estar relacionado a uma maior frequência de dias com chuva nessa área. Segundo se observa na Figura 4.24(a) esse padrão se estende sobre a região norte do Oceano Atlântico Sul, o qual não é mostrado na Figura 4.24(b), pois se apresenta apenas o acumulado sobre a região terrestre. Esse padrão sobre o norte da AS e o oceano é adequadamente representado pela primeira EOF Observada.

Um segundo padrão observa-se na Figura 4.24(a) entre os 25-45°S, atingido o sudeste

Tabela 4.4 - Valores de fração de variabilidade da precipitação (FVar em %) de todas as EOF calculadas, Previstas e Observadas.

FVar Observada					
	24	48	72	96	120
EOF1	27,032	26,995	27,306	27,773	27,657
EOF2	8,308	8,600	8,806	9,085	9,352
EOF3	6,097	6,319	6,464	6,688	6,917
EOF4	4,390	4,500	4,592	4,733	4,905
FVar Acum.	45,828	46,415	47,167	48,279	48,832
FVar CNT					
	24	48	72	96	120
EOF1	54,753	50,696	47,448	46,541	44,072
EOF2	5,319	6,417	6,506	6,756	5,846
EOF3	4,461	4,596	4,686	4,781	5,162
EOF4	3,021	4,035	3,529	3,860	3,858
FVar Acum.	67,553	65,744	62,170	61,939	58,938
FVar REF					
	24	48	72	96	120
EOF1	53,024	49,239	47,280	46,719	46,748
EOF2	5,149	6,523	6,505	6,497	5,615
EOF4	4,184	4,247	4,243	3,938	4,152
EOF4	2,727	3,758	3,538	3,523	3,800
FVar Acum.	65,084	63,766	61,566	60,677	60,315
FVar BND					
	24	48	72	96	120
EOF1	51,911	48,312	46,947	46,536	43,242
EOF2	5,371	6,365	6,170	6,336	5,777
EOF3	4,047	4,681	3,887	4,144	4,381
EOF4	3,456	3,843	3,484	3,493	3,717
FVar Acum.	64,785	63,201	60,488	60,508	57,117

do Brasil e toda a região litorânea nessa faixa de latitudes, uma área praticamente horizontal é também observada sobre o Oceano Atlântico. Embora na Figura 4.24(b) não se apresentem os acumulados sobre os oceanos, o padrão sobre terra é igualmente observado. O mesmo pode estar associado à passagem de sistemas frontais sobre o sul da AS e seu deslocamento para o oceano. Em [Andrade \(2005\)](#) é reportado que a chuva acumulada em 24 horas associada a esses sistemas é menos intensa no inverno do que no verão, de forma que a menor intensidade observada nesse padrão concorda com tais informações. Considerando que na EOF é representado o padrão mais recorrente que aconteceu em todo o mês, esse padrão se mostra na Figura 4.24(b) sobre a região do oceano. Por último, nota-se uma área de acumulados de precipitação sobre o sul da CA nas Figuras 4.24(a) e (b), porém, que não é representado pela primeira EOF Observada. Isso indica que o padrão não foi recorrente no período analisado, e assim não mostrado.

Tendo definidos os padrões de variabilidade mais relevantes representados pela EOF Observada a partir do que foi observado, são apresentados os campos correspondentes à primeira EOF Prevista em cada experimento, para 24, 72 e 120 horas de previsão. A finalidade dessa avaliação é evidenciar em qual tempo de previsão o modelo é capaz de prever o padrão de variabilidade da precipitação de forma mais acertada, usando como referência a primeira EOF Observada. Nas EOF Previstas se mostra claramente o padrão atmosférico recorrente sobre a região norte da AS e o oceano, sendo que a tendência é de super-estimar e suavizar o campo na região oceânica. Esse resultado reflete aos valores maiores de FVar encontrados para as EOF Previstas. Na mesma figura, nota-se que os resultados das EOF Previstas falham ao não prever o segundo padrão de variabilidade. Mais ainda, tendem a colocar um padrão sobre o sul da CA, o qual se verificou que ao não ser recorrente não foi mostrado na EOF Observada. Isso pode estar associado com a tendência do modelo de super-estimar essa variável. Dentre os tempos de previsão apresentados, nota-se que na previsão de 24 horas se mostra um melhor desempenho do modelo com uma concordância nos três experimentos com a EOF Observada, embora em BND parece existir maior correspondência. As áreas mais super-estimadas nos outros horários de previsão correspondem à parte norte do Oceano Atlântico nesse primeiro padrão. Enquanto que o segundo padrão é sub-estimado em todos os tempos e experimentos.

Visualmente os campos de variabilidade parecem muito semelhantes entre si, porém, para quantificar essa correspondência, na Tabela 4.5 se apresentam os resultados do cálculo do CCOR entre as EOF Observadas e Previstas para todos os tempos de previsão. Os padrões de variabilidade atmosféricos representados pela primeira EOF

Figura 4.24 - Comportamento das previsões válidas para todas as variáveis avaliadas, em relação a todo o tempo de integração, para agosto de 2014 sobre a América do Sul.

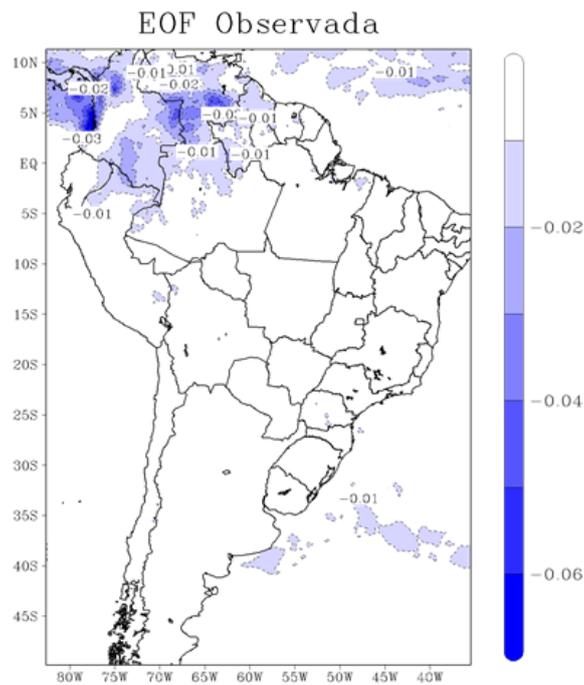
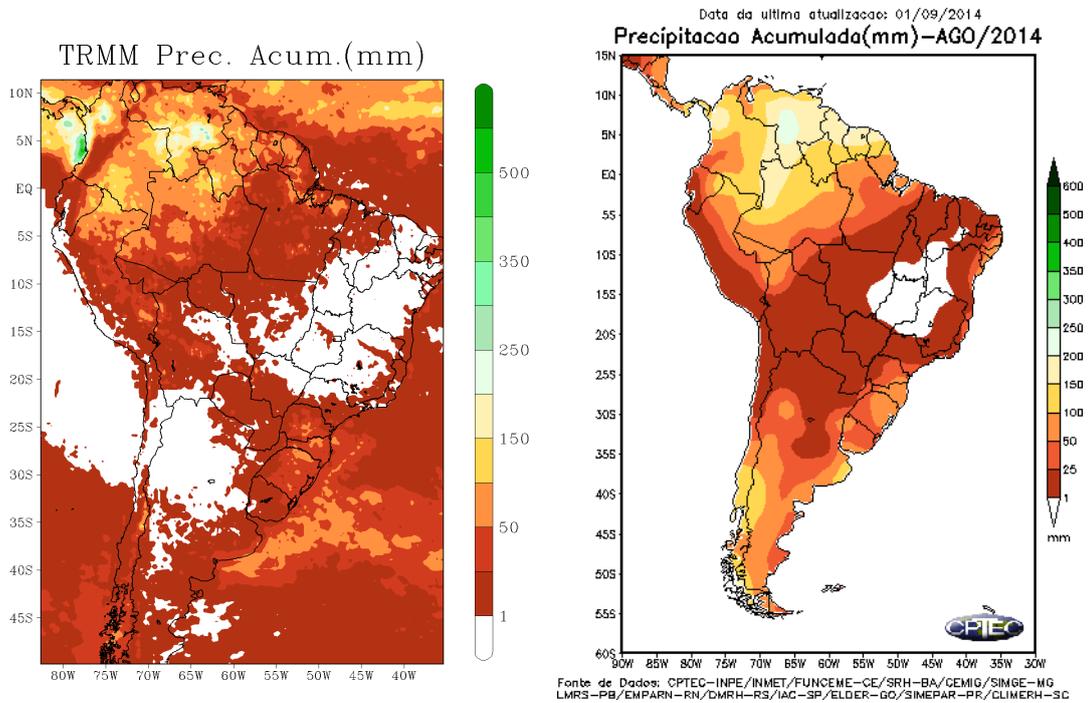
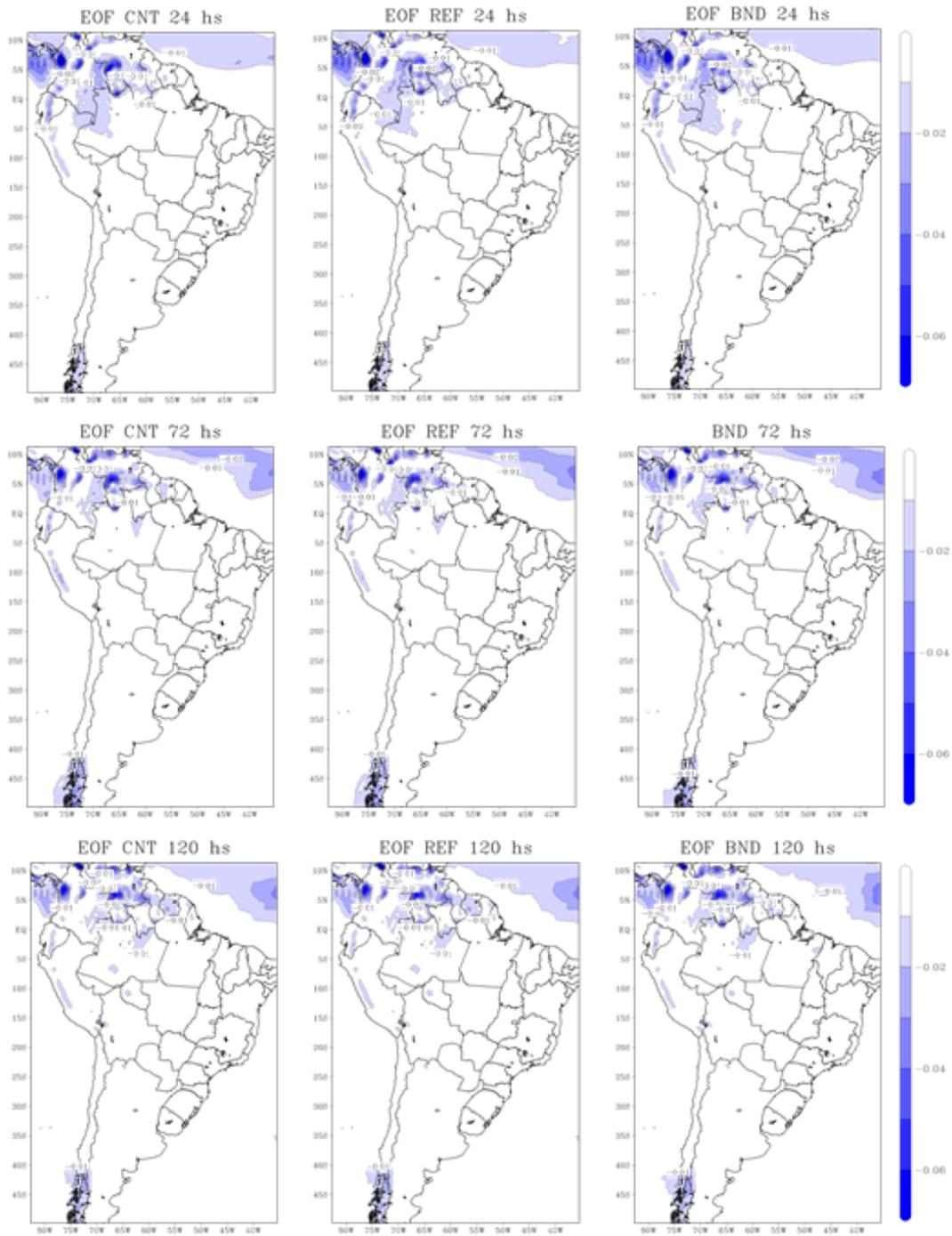


Figura 4.25 - Padrões de variabilidade obtidos com a primeira EOF calculada para os campos previstos nos experimentos CNT, REF e BND, às 24, 72 e 120 horas de previsão, respectivamente.



observada conseguem ser reproduzidos pela primeira EOF Prevista, com valores de CCOR bem próximos. Os resultados obtidos para as primeiras EOF em todos os experimentos e tempos de previsão, indicam que existe correlação positiva entre as EOF, sendo maior que 0,5, e que uma pequena melhoria é obtida ao assimilar dados de ângulos de curvatura.

Tabela 4.5 - Valores de CCOR entre as EOF Previstas por cada experimento CNT, REF e BND, respectivamente, e as EOF Observadas para os horários de previsão 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

CCOR CNT-OBS					
	24	48	72	96	120
EOF1	0,623	0,570	0,523	0,471	0,465
EOF2	-0,315	0,383	-0,443	0,244	0,283
EOF3	0,263	-0,349	-0,024	0,165	-0,267
EOF4	0,038	-0,099	0,054	-0,086	-0,027
CCOR REF-OBS					
	24	48	72	96	120
EOF1	0,637	0,581	0,537	0,482	0,502
EOF2	-0,357	0,335	-0,428	0,189	-0,341
EOF3	-0,227	-0,292	-0,076	0,176	-0,147
EOF4	0,184	-0,116	0,011	-0,029	0,040
CCOR BND-OBS					
	24	48	72	96	120
EOF1	0,639	0,589	0,538	0,472	0,506
EOF2	0,115	0,338	0,240	-0,167	0,328
EOF3	-0,051	-0,098	-0,088	0,285	0,188
EOF4	0,039	0,023	-0,090	0,069	0,066

## 5 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Nesta pesquisa, com a realização de diversos experimentos de assimilação de dados usando o sistema GSI acoplado ao modelo global de PNT do CPTEC, buscou-se definir quais são os possíveis benefícios e desvantagens da assimilação de dados do ângulo de curvatura, adicionalmente aos perfis de refratividade, bem como avaliar o ganho pela ampliação da base de dados de RO-GPS com a inclusão dos dados do satélite MetOp-B na versão atual do sistema. O primeiro ponto constitui um desafio para o CPTEC em virtude da assimilação de dados menos processados para a PNT. O segundo tem a intenção de avaliar a capacidade do sistema em absorver um maior fluxo desse tipo de dados, avaliando a relação custo-benefício, o que pode antecipar iniciativas para otimizar a base de dados. Em uma análise geral dos resultados obtidos, observa-se que os mesmos podem ser considerados pertinente para o propósito da Pós-Graduação do INPE em suporte a sua missão, uma vez que são robustos cientificamente e contribuem para a tomada de decisões na modelagem operacional do centro. As conclusões aqui descritas atestam essa afirmação.

### 5.1 Conclusões

No que se refere à inclusão dos dados do MetOp-B, os resultados obtidos nesse trabalho permitem concluir que:

- Foi expressivo o impacto da inclusão dos dados do MetOp-B na assimilação dos dados de refratividade dos satélites COSMIC, TerraSAR-X e MetOp-A, uma vez que a quantidade de observações cresceu significativamente se comparado com a quantidade envolvida no experimento sem a inclusão desses dados, no qual foi grande a quantidade rejeitada;
- Entre os meses analisados observou-se que em agosto foram obtidos os maiores impactos nos valores de RMSE. Especificamente nesse mês, no HS foram observados os ganhos mais significativos no RMSE, atingindo 40% desde as primeiras 24 horas de previsão;
- Sobre a América do Sul observou-se que as variáveis com melhores resultados de Mudança Fracional nos valores do RMSE foram ZGEO-500 e a PSNM, as quais após 24 horas produziram impactos positivos até o final do tempo de previsão. No entanto, a primeira mostrou resultados mais abrangentes ao serem representadas as áreas em que se concentraram os valores mais relevantes;

- Do ponto de vista da avaliação das previsões válidas, para as 36 horas de previsão se destacam os resultados nas componentes zonal e meridional do vento em 250 hPa;

Com relação à utilização dos perfis de ângulo de curvatura ao invés de refratividade, as seguintes afirmações podem ser aqui colocadas como conclusões dessa pesquisa:

- Com a assimilação de observações de ângulos de curvatura uma maior extensão do domínio vertical do modelo foi impactada, explorando-se em 73,4% o potencial da técnica de rádio ocultação, enquanto que ao assimilar perfis de refratividade se consegue explorar menos da metade desse potencial;
- Embora a quantidade de observações de RO-GPS seja praticamente dobrada usando dados de BND, o custo computacional na minimização da função custo é praticamente o mesmo ao usar dados de REF;
- Com relação aos níveis verticais do perfil atmosférico observou-se que com o BND a extensão das camadas impactadas por esse tipo de observação é muito maior do que usando dados de REF, sendo os valores do desvio padrão normalizados semelhantes para os dois tipos de dados;
- O impacto na qualidade das previsões ao assimilar ângulos de curvatura são observados durante todo o tempo de integração avaliado, sendo mais pronunciados depois de 24 horas de integração do modelo;
- O maior impacto da assimilação de dados de BND foi observado na região tropical, onde foi alcançado valores no ganho de aproximadamente 80% no CCA para 24 horas de previsão. Resultados dessa magnitude não tinham sido encontrados anteriormente em outros estudos realizados no CPTEC avaliando dados de RO-GPS;
- Sobre a América do Sul assimilando ângulos de curvatura, os valores de CCA se mantêm acima de 60% em todas as variáveis e durante todo o tempo de integração do modelo, indicando uma extensão nas previsões válidas durante as 120 horas de integração. São obtidos valores de ganhos de quase 15% no CCA e 10% no RMSE, ganhos de aproximadamente 5% nas variáveis UVEL, VVEL e ZGEO em 500 e 250 hPa, UMES em 500 e 850 hPa, e aproximadamente 2,5% na VTMP em 500, 850 e 250 hPa

e TEMP em 500 e 850 hPa. No caso de TEMP em 250 hPa a América do Sul é impactada positivamente fundamentalmente na região nordeste e sudeste do Brasil;

- Embora a variabilidade do campo de precipitação observada (informação contida na EOF observada) seja super-estimada e suavizada nas EOF Previstas, a assimilação dos dados de BND apresentou impacto positivo, dando a indicação que deve ser melhor explorado no futuro;

## 5.2 Comentários finais

Ao longo dos últimos anos são várias as iniciativas na área de pesquisa e de atividades operacionais, tanto proveniente da iniciativa privada como das instituições públicas, que indicam o crescimento exponencial da oferta de dados de RO-GPS, as quais justificam a realização de investigações semelhantes à presente dissertação, uma vez que no mesmo objetiva-se explorar de forma eficiente as informações disponíveis nesse processo.

A primeira rede privada de satélites meteorológicos no mundo, Spire, pretende usar a técnica de RO por GPS para obter informações sobre as condições atmosféricas, oferecendo uma vantagem competitiva para as organizações que requerem uma visão sobre áreas como o comércio global, clima, cadeia de transporte e de abastecimento, etc. Planejam para o ano 2017 completar um total de 100 satélites LEO do tipo Cubesat (forma de cubo medindo 10 cm de cada lado, com uma massa de até 1 kg) com os que pretendem gerar um valor de 100.000 sondagens por dia (FASTCOEXIST, 2016). Similarmente, se encontra em desenvolvimento a constelação CICERO (do inglês *Community Initiative for Cellular Earth Remote Observation*) focada na obtenção de medidas de RO para fins de pesquisa. Uma das características mais relevantes de CICERO é que os 24 satélites concebidos levarão a bordo receptores desenhados para receber sinais de vários sistemas de posicionamento além dos GPS. Junto aos GPS, existem operacionais o GLONASS (acrônimo do inglês *GLObal NAVigation Satellite System*) da Rússia, o GALILEO da Europa e o Beidou/COMPASS da China. A fim de aproveitar as observações dos sistemas disponíveis, surge o GNSS, que visa recepcionar e armazenar todos eles simultaneamente (BAUER et al., 2014), assim, quando um receptor é capaz de captar sinais de vários sistemas são chamados de receptores GNSS, os que justamente formarão parte do equipamento dessa constelação de satélites. Se espera que ao ficar completamente operacionais em 2018, possam ser geradas aproximadamente 30.000 sondagens por dia (SCITECHDAILY, 2012). Com essas projeções por parte das empresas privadas, nota-se que a quanti-

dade de informação de RO-GPS aumentará consideravelmente em um futuro muito próximo.

Por outro lado, os programas governamentais também estão contribuindo à expansão significativa desse sistema de observação. O mais importante nesse sentido constitui a missão COSMIC-2. Frente à degradação das capacidades da constelação COSMIC, a WMO recomendou a continuidade das observações de RO operacionalmente e da missão para tornar-se em uma “Missão Operacional”. Assim, surge o COSMIC-2 que pretende ser um sistema mais aprimorado que o anterior, consistindo em uma nova constelação de 12 satélites LEO equipados entre outros, com receptores GNSS. Espera-se que os 6 primeiros satélites sejam lançados no final de 2017 e os demais em 2019, prevendo produzir ao redor de 8.000 sondagens por dia com uma latência de informação calculada para aproximadamente 45 minutos. A comunidade meteorológica encara com bastante entusiasmo a ampliação dessa base de dados, devido ao fato de que os benefícios são significativos para os interesses operacionais e os resultados em estudos com dados sintéticos indicam que essa ampliação ainda não atingirá a supersaturação, o que indica um horizonte animador nessa frente de pesquisa se considerado os modelos de alta resolução e a previsão de eventos extremos.

Vislumbrando a utilização eficiente desse sistema de observação da terra e atento as possibilidades em diversas áreas de pesquisa, o INPE, utilizando recursos da Agência Espacial Brasileira, dentro do Programa Brasileiro de Monitoramento do Clima Espacial (EMBRACE), tem investido em adquirir e operacionalizar dentro do território brasileiro uma antena de recepção dos dados brutos do sistema COSMIC-2. Essa antena já foi adquirida e está em processo final de instalação, na fase inicial de testes operacionais (YEN *et al.*, 2012). O objetivo da operação de uma antena de recepção dos dados da constelação COSMIC-2 é permitir que o EMBRACE seja um centro regional gerador de dados de RO-GPS com aplicações tanto na meteorologia operacional do CPTEC como na modelagem do clima espacial, atividade já em desenvolvimento nesse programa. Com isso, do ponto de vista da meteorologia, esses dados estariam disponíveis para a assimilação no CPTEC em tempo real antes de sua disponibilidade pelos centros oficiais, o que diminuiria a latência da informação com benefícios operacionais importantes para a modelagem do CPTEC. Visando a assimilação de dados de forma operacional, em que sejam aproveitadas todas as informações presentes e que estarão disponíveis em um futuro próximo, nesse centro está sendo implementado o Sistema de Modelagem Global o qual integra o modelo de previsão global BAM e a versão 3.4 do sistema de assimilação GSI. Os resultados

atingidos na presente pesquisa permitem direcionar o uso eficiente dos produtos de RO-GPS para sua assimilação, sendo que com o uso de um sistema atualizado e assimilando ângulos de curvatura ao invés de perfis de refratividade, um maior impacto seja encontrado nas análises e previsões geradas, o que indica que resultados similares ou melhores devem ser encontrados com esse novo Sistema. Adicionalmente, uma metodologia de avaliação capaz de definir com precisão a qualidade das previsões, especialmente as de precipitação é necessário. Nesse sentido, os resultados apresentados usando uma análise de EOF, demonstraram a utilidade da metodologia para a avaliação dos campos de precipitação previstos.

### 5.2.1 Perspectivas futuras

Com a ampliação da constelação de satélites LEO, o envolvimento dos demais sistemas de posicionamento e a evolução dos sistemas de assimilação de dados, com o refinamento da resolução espacial para aplicações de previsão de eventos extremos, essa linha de pesquisa está longe de ser exaurida e diversas funcionalidades, anuências e outros aspectos associados à assimilação de dados de RO-GPS deverão ser exploradas no futuro. Uma lista dos pontos que foram identificados no desenvolvimento desse trabalho pode ser descrita a seguir:

- Realizar um estudo em que sejam assimilados dados de ângulos de curvatura por um período de tempo mais longo, visando que o modelo de previsão reproduza um melhor estado da atmosfera;
- Um esforço deve ser dedicado ao aperfeiçoamento do modelo nos altos níveis;
- Calcular uma matriz das covariâncias dos erros do background;
- Avaliar a quantidade de iterações que são suficientes para atingir o valor mínimo da função custo;
- Detalhar o uso de EOF para avaliar o desempenho dos modelos de previsão no CPTEC/INPE, usando um maior período de tempo;
- Investigar quais as formas mais eficientes do uso da assimilação dos dados de RO-GPS provenientes da missão COSMIC-2 para a realização de uma previsão numérica de forma mais precisa e com maior qualidade sobre a América do Sul. Uma vez essa missão em operação, as observações devem ser exploradas com vista na implementação de um novo controle de qualidade dos dados de RO-GPS que permita o uso mais ótimo dos mesmos.

- Com o experimento ROHP-PAZ (acrônimo do inglês *Radio-Occultation and Heavy Precipitation* com o satélite PAZ) um novo conceito sobre o uso da RO foi introduzido, no qual é extraída a informação polarimétrica dos sinais, de forma que usando o efeito induzido de despolarização na propagação dos mesmos pode ser recuperada informação sobre eventos de precipitação (CARDELLACH et al., 2015). Atualmente, existem estudos propondo a implementação de um operador para esse tipo observações a serem assimiladas para gerar uma previsão de precipitação mais precisa. Visando explorar outras formas do uso da técnica de RO, deve-se determinar os benefícios de assimilar um menor nível de processamento do dados de RO-GPS que poderia ser usado com fins de previsão numérica de tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Master Thesis (Dissertação (Mestrado em Meteorologia)) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005-04-04 2005. Available from: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.15.17.12>>. 91
- ANTHES, R. A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: Contributions to weather, climate and space weather. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 4, p. 1077–1103, 2011. 20
- ANTHES, R. A.; ECTOR, D.; HUNT, D. C.; KUO, Y.-H.; ROCKEN, C.; SCHREINER, W. S.; SOKOLOVSKIY, S. V.; SYNDERGAARD, S.; WEE, T.-K.; ZENG, Z.; BERNHARDT, P. A.; DYMOND, K. F.; CHEN, Y.; LIU, H.; MANNING, K.; RANDER, W. J.; TRENBERTH, K. E.; CUCURULL, L.; HEALY, S. B.; HO, S.-P.; MCCORMICK, C.; MEEHAN, T. K.; THOMPSON, D. C.; YEN, N. L. The COSMIC/Formosat-3 mission: Early results. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, p. 313–333, 2008. 20, 36, 50
- APARICIO, J. M.; DEBLONDE, G. Impact of the assimilation of CHAMP refractivity profiles on Environment Canada global forecasts. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 257–275, 2008. 2, 20
- ARAVÉQUIA, J. A.; QUADRO, M. F. **Aspectos gerais da previsão numérica de tempo e clima**. Cachoeira Paulista: CPTEC, 2003. 57 p. Available from: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.23.10.21>>. Access in: 14 fev. 2016. 35
- AZEVEDO, H. B. **Uso da técnica de OSE para avaliar o impacto de observações no sistema de assimilação de dados global variacional tridimensional do CPTEC/INPE**. 142 p. Master Thesis (Dissertação (Mestrado em Meteorologia)) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014-05-16 2014. Available from: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18/2014/05.07.17.54>>. 4, 29
- BAUER, P.; RADNÓTI, G.; HEALY, S.; CARDINALI, C. GNSS radio occultation constellation observing system experiments. **Monthly Weather Review**, v. 142, p. 555–572, February 2014. Available from:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/MWR-D-13-00130.1>>.

Access in: 2 mar. 2016. 24, 97

BENZI, R.; DEIDDA, R.; MARROCU, M. Characterization of temperature and precipitation fields over Sardinia with principal component analysis and singular spectrum analysis. **International journal of climatology**, v. 17, n. 11, p. 1231–1262, 1997. ISSN 08998418. Available from:

<<http://unica2.unica.it/rdeidda/papers/1997{ }IntJournClim.pdf>>. 51

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S.; HERRING, T. A.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, p. 379–386, March 1994. Available from:

<[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2)>. 18, 19, 45

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T.; ROCKEN, C.; ANTHES, R.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 15787–15801, October 1992. 2, 8

BEYERLE, G.; GRUNWALDT, L.; HEISE, S.; KÖHLER, W.; KÖNIG, R.; MICHALAK, G.; ROTHACHER, M.; SCHMIDT, T.; WICKERT, J.; TAPLEY, B. D. First results from the GPS atmosphere sounding experiment TOR aboard the TerraSAR-X satellite. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, p. 6687–6699, 2011. ISSN 16807316. 20

BONATTI, J. P. Desenvolvimentos atuais e planejamento para o MGCA/CPTEC e Aplicações para Tempo e Clima. In: EPGMET, Campos de Jordão, São Paulo.

**XIV Encontro dos alunos de pós-graduação em meteorologia do CPTEC/INPE (EPGMET)**. Campos de Jordão, 2015. Available from:

<[http://eventos.cptec.inpe.br/~reventos/xiv-epgmet/apresentacao/1\\_MTC\\_Bonatti\\_150929.pdf](http://eventos.cptec.inpe.br/~reventos/xiv-epgmet/apresentacao/1_MTC_Bonatti_150929.pdf)>. 35

BONAVITA, M. On some aspects of the impact of gpsro observations in global numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, n. October, p. 2546–2562, 2014. ISSN 00359009. 2, 24, 25, 27, 55, 57

BUONTEMPO, C.; JUPP, A.; RENNIE, M. Operational NWP assimilation of GPS radio occultation data. **Atmospheric Science Letters**, John Wiley & Sons,

Ltd., v. 9, p. 129–133, July/September 2008. ISSN 1530-261X. Available from:  
<<http://dx.doi.org/10.1002/asl.173>>. 2, 20, 25

CAMPOS, T. L. O. B.; SAPUCCI, L. F.; AVANÇO, L. A.; LIMA, W. F. A.; FERREIRA, D. B. S. Sensibilidade da previsão numérica de tempo à escolha da variável controle da umidade atmosférica na assimilação de dados do CPTEC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2016. Submetido em Junho 2016. 44, 80

CARDELLACH, E.; RIUS, A.; AO, C. O.; KURSINSKI, E. R.; SCHREINER, B.; ECTOR, D.; CUCURULL, L. Sensitivity of PAZ LEO Polarimetric GNSS Radio-Occultation Experiment to Precipitation Events. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, v. 53, n. 1, January 2015. 100

CARDINALI, C.; DAESCU, D.; HEALY, S.; DAHOUI, M.; RADNÓTI, G.; FOUILLOUX, A. Monitoring the assimilation and forecast system performance. In: ECMWF, 2011, Shinfield Park, Reading. **Seminar on Data assimilation for atmosphere and ocean**. ECMWF, 2011. 6-9 September. Available from:

<<http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2011/14955-monitoring-assimilation-and-forecast-system-performance.pdf>>.

24

CARDINALI, C.; HEALY, S. GPS-RO at ECMWF. In: ECMWF, 2011, Shinfield Park, Reading. **Seminar on Data assimilation for atmosphere and ocean**. ECMWF, 2012. p. 323–336. 6-9 September. Available from:

<<http://www.ecmwf.int/en/learning/workshops-and-seminars/past-workshops/2011-annual-seminar>>. 24

CASANUEVA, A.; RODRÍGUEZ-PUEBLA, C.; FRÍAS, M. D.; GONZÁLEZ-REVIRIEGO, N. Variability of extreme precipitation over Europe and its relationships with teleconnection patterns. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 2, p. 709–725, 2014. ISSN 10275606. 51

CDAAC. **Atmospheric data inversion (ROAM)**. 2016. Available from:  
<<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/overview.html>>. Access in:  
17 nov. 2016. 13, 17

COHN, S. E.; 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, n. 11, p. 2913–2926, November 1998. ISSN 0027-0644. Available from: <<http://journals.ametsoc.org/doi/>

abs/10.1175/1520-0493{%}281998{%}29126{%}3C2913{%}3AATEODS{%}3E2.0.CO{%}3B2{#}.VsC5usBI7Eo.mendeley>. 29

COLLINS-SUSSMAN, B.; FITZPATRICK, B. W.; PILATO, C. M. **Controle de Versão com Subversion**. O'Reilly, Sebastopol: TBA, 2007. Available from: <[http://www.terralab.ufop.br/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=terralab:tecnologias:tutorial\\_svn.pdf](http://www.terralab.ufop.br/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=terralab:tecnologias:tutorial_svn.pdf)>. 39

CPTEC. **Monitoramento América do Sul**. 2017. Available from: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentoams/pt>>. Access in: 31 jan. 2017. 89

CUCURULL, L. Improvement in the Use of an Operational Constellation of GPS Radio Occultation Receivers in Weather Forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. November 2006, p. 749–767, 2010. ISSN 0882-8156. 18, 42, 43, 45

\_\_\_\_\_. Implementation of a quality control for radio occultation observations in the presence of large gradients of atmospheric refractivity. **Atmos. Meas. Tech.**, v. 8, p. 1275–1285, 2015. 47

CUCURULL, L.; ANTHES, R. A. Impact of Infrared, Microwave, and Radio Occultation Satellite Observations on Operational Numerical Weather Prediction. **Monthly Weather Review**, n. 142, p. 4164–4186, 2014. 27

CUCURULL, L.; ANTHES, R. A.; TSAO, L.-L. Radio Occultation Observations as Anchor Observations in Numerical Weather Prediction Models and Associated Reduction of Bias Corrections in Microwave and Infrared Satellite Observations. **R. J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 31, p. 20–32, 2014. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00059.1>>. 26

CUCURULL, L.; DERBER, J. C. Operational Implementation of COSMIC Observations into NCEP's Global Data Assimilation System. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 4, p. 702–711, 2008. 2, 20, 26

CUCURULL, L.; DERBER, J. C.; PURSER, R. J. A bending angle forward operator for global positioning system radio occultation measurements. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 118, p. 14–28, 2013. ISSN 2169897X. 2, 8, 15, 16, 26, 46, 64, 65, 70, 73, 75

CUCURULL, L.; DERBER, J. C.; TREADON, R.; PURSER, R. J. Assimilation of Global Positioning System Radio Occultation Observations into NCEP's Global Data Assimilation System. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 3174–3193,

2007. ISSN 0027-0644. Available from:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR3461.1>>. 2, 3, 15, 16, 19, 26, 43, 54, 55, 57

CUI, S.; HUANG, Q. Spatial and temporal variation of annual precipitation in a river of the Loess Plateau in China. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2014, p. 1–11, 2014. Article ID 827120. 51

DINIZ, F. L. R. Assessing observation impacts using CPTEC Global GSI. **Royal Meteorological Society**, p. 2546–2562, 2016. In preparation. 30

DTC. **Community GSI Users Page**. 2016. Available from:

<<http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/>>. Access in: 15 fev. 2016. 36, 37, 44

ELLIOT, J. L. Stellar occultation. **Annu. Rev. Astron. Astrophys**, v. 17, p. 445–475, 1979. Available from: <[www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)>. 7

EOPORTAL. **Satellite Missions Database**. 2016. Available from:

<<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>>. Access in: 13 fev. 2016. 19, 21

ESHLEMAN, V. R. Atmospheres of Mars and Venus: A Review of Mariner 4 and 5 and Venera 4 Experiments. **Radio Science**, v. 5, February 1970. ISSN 1944-799X. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/RS005i002p00325>>. 1, 7

EUMETSAT. **Keeping a closer eye on weather and climate**. 2012. Available from: <[https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_FILE&dDocName=PDF\\_BR\\_PRG02&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web](https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_BR_PRG02&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web)>. Access in: 9 nov. 2015. 21

\_\_\_\_\_. **Metop**. 2015. Available from: <<http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/index.html>>. Access in: 9 nov. 2015. 21

\_\_\_\_\_. **Global Telecommunication System**. 2017. Available from:

<<http://www.eumetsat.int/website/home/Data/DataDelivery/WMOInformationSystem/GTSRMDCN/index.html>>. 31

EYRE, J. An introduction to GPS radio occultation and its use in numerical weather prediction. In: ECMWF. **ECMWF GRAS SAF Workshop on Applications of GPS Radio Occultation Measurements**. Shinfield Park, Reading: ECMWF, 2008. p. 1–10. 16-18 June. 23, 25

EYRE, J. R. **Assimilation of Radio Occultation measurements into a numerical weather prediction system**. [S.l.], 1994. Available from: <http://www.ecmwf.int/publications/PPTviaSimulatedAnnealing.pdf>. Access in: 17 nov. 2015. 1, 2, 3, 8, 24

FASTCOEXIST. **Weather Predictions Are Getting Better Thanks To New, Tiny Satellites**. 2016. Available from: <http://www.fastcoexist.com/3055557/change-generation/weather-predictions-are-getting-better-thanks-to-new-tiny-satellites>. Access in: 11 mar. 2016. 97

FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P. Y.; GRELL, G. A.; MORRISON, H.; BARROS, S. R. M.; FERNANDEZ, J. P. R.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUZIA, G.; SILVA, J.; SILVA, J. R.; PENDHARKAR, J.; CAPISTRANO, V. B.; ALVIM, D. S.; ENORÉ, D. P.; DINIZ, F. L. R.; SATYAMURTI, P.; CAVALCANTI, I. F.; NOBRE, P.; BARBOSA, H. M. J.; MENDES, C. L.; PANETTA, J. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547–1572, 2016. 35, 36

FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V. R. The atmosphere of mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data. **Planetary and Space Science**, v. 16, p. 1035–1059, August 1968. ISSN 0032-0633. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032063368900202>. 1, 7

FJELDBO, G.; KLIORE, A. J.; R., E. V. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. **The Astronomical Journal**, v. 76, 1971. 1, 7, 16

FOELSCHE, U.; SCHERLLIN-PIRSCHER, B.; LADSTÄDTER, F.; STEINER, A. K.; KIRCHENGAST, G. Refractivity and temperature climate records from multiple radio occultation satellites consistent within 0.05%. **Atmospheric Measurement Techniques**, Copernicus GmbH, v. 4, n. 9, p. 2007–2018, 2011. ISSN 1867-8548. Available from: <http://www.atmos-meas-tech.net/4/2007/2011/>. 15

FUSSEN, D.; TÉTARD, C.; DEKEMPER, E.; PIEROUX, D.; MATESHVILI, N.; VANHELLEMONT, F.; FRANSSSENS, G.; DEMOULIN, P. Retrieval of vertical

profiles of atmospheric refraction angles by inversion of optical dilution measurements. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, p. 3135–3145, 2015. 10

GDAD. **Gridpoint Statistical Interpolation no SMG**. 2016. Available from: <<https://projetos.cptec.inpe.br/projects/smg/wiki/>>. Access in: Ago. 2016. 37

\_\_\_\_\_. **Instruções de Obtenção, Instalação, Configuração e Utilização do Sistema G3DVAR (versão v1.1.3) no supercomputador CRAY XE6 do CPTEC/INPE**. 2016. Available from: <<https://projetos.cptec.inpe.br/projects/g3dvar/wiki>>. Access in: 15 fev. 2016. 38, 39

\_\_\_\_\_. **Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM)**. 2016. Available from: <<https://projetos.cptec.inpe.br/projects/smg/wiki/>>. Access in: Ago. 2016. 35

GORBUNOV, M. E. Radio-holographic analysis of Microlab-1 radio occultation data in the lower troposphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D12, p. ACK 7–1–ACK 7–10, 2002. ISSN 2156-2202. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000889>>. 15

GORBUNOV, M. E.; KORNBLUEH, L. **Principles of variational assimilation of GNSS radio occultation data**. Hamburg, Germany, 2003. December. Available from: <<http://en.scientificcommons.org/8586049>>. 24

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 14, p. 38(1)–38(4), 2002. 42, 44

HARSHVARDHAN, R. D.; RANDALL, D. A.; CORSETTI, T. G. A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D1, p. 1009–1016, 1987. ISSN 2156–2202. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/JD092iD01p01009>>. 42, 44

HEALY, S. B. Assimilating GPS radio occultation measurements with two-dimensional bending angle observation operators. **Quarterly Journal of the Royal**, v. 133, p. 1213–1227, July 2007. Par A. 24

\_\_\_\_\_. Assimilation of GPS radio occultation measurements at ECMWF. In: ECMWF, Shinfield Park, Reading. **ECMWF GRAS SAF Workshop on**

**Applications of GPS Radio Occultation Measurements.** Shinfield Park: ECMWF, 2008. p. 99–109. 16-18 June. 2, 24

\_\_\_\_\_. **Refractivity coefficients used in the assimilation of GPS radio occultation measurements.** [S.l.], October 2009. SAF/GRAS/DMI/REP/GSR/009. 18

HEALY, S. B.; CULVERWELL, I. D. A modification to the standard ionospheric correction method used in GPS radio occultation. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 8, p. 3385–3393, 2015. ISSN 1867-8548. Available from: <<http://www.atmos-meas-tech.net/8/3385/2015/>>. 13

HEALY, S. B.; EYRE, J. R. Retrieving temperature, water vapour and surface pressure information from refractive-index profiles derived by radio occultation: A simulation study. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 126, n. 566, p. 1661–1683, 2000. ISSN 1477-870X. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.49712656606>>. 24

HEALY, S. B.; THÉPAUT, J. N. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, p. 605–623, January 2006. ISSN 00359009. Par B. 20, 24, 25

HEALY, S. B.; WICKERT, J.; MICHALAK, G.; SCHMIDT, T.; BEYERLE, G. Combined forecast impact of GRACE-A and CHAMP GPS radio occultation bending angle profiles. **Atmospheric Science Letters**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 8, n. 2, p. 43–50, 2007. ISSN 1530-261X. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1002/asl.149>>. 20, 24, 75

HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; SAPUCCI, L. F. A assimilação de dados no CPTEC/INPE. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 57–64, 2008. Abril. 28

HIERRO, R.; LLAMEDO, P.; TORRE, A. de la; ALEXANDER, P. Oscillation modes of humidity over the Amazon basin derived from GPS RO profiles. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 118, n. 23, p. 13121–13127, 2013. ISSN 2169897X. Available from: <<GotoISI>://WOS:000330266500032>. 28

HIERRO, R.; TORRE, A. de la; ALEXANDER, P.; ROLLA, A. Climatological patterns over South America derived from COSMIC radio occultation data. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D3, p. D03116, 2012. ISSN

0148-0227. Available from: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JD016413>>. 28

HOBBS, D.; BOHN, P. Precise Orbit Determination for Low Earth Orbit Satellites. **Annals of the Marie Curie Fellowship Association**, v. 4, n. 1, p. 1–7, 2006. 12

HOLTSLAG, A. A. M.; BOVILLE, B. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. **Journal Climate, American Meteorological Society**, v. 6, p. 1825–1842, 1993. Available from: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1825:LVNBLD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1825:LVNBLD>2.0.CO;2)>. 42, 44

HOLZSCHUH, M. L. **Recuperação de perfis atmosféricos a partir de ocultação GPS: fundamentos, implementação e análise de resultados**. 127 p. Master Thesis (Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas)) — Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007. Available from: <[http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d\\_holzs Schuh\\_ml-dr.pdf](http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_holzs Schuh_ml-dr.pdf)>. Access in: 27 dec. 2016. 15

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>>. 51

INPE. **A Pós-Graduação no CPTEC/INPE**. 2011. Available from: <[http://www.inpe.br/pos\\_graduacao/cursos/met/](http://www.inpe.br/pos_graduacao/cursos/met/)>. Access in: 2 .mar. 2016. 28

JENSEN, A. S.; LOHMANN, M. S.; BENZON, H.-H.; NIELSEN, A. S. Full Spectrum Inversion of radio occultation signals. **Radio Science**, v. 38, n. 3, 2003. ISSN 1944-799X. 1040. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/2002RS002763>>. 15

JIN, S.; CARDELLACH, E.; XIE, F. **GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications**. 1. ed. Springer Netherlands, 2014. (Remote Sensing and Digital Image Processing 19, v. 19). ISBN 978-94-007-7481-0,978-94-007-7482-7. Available from: <<http://gen.lib.rus.ec/>

[book/index.php?md5=a05863f19ef2d1c6f78758df7946ba34](http://book/index.php?md5=a05863f19ef2d1c6f78758df7946ba34)>. 1, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 22

KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability**. [s.n.], 2003. 341 p. ISSN 1477870X. ISBN 9780521791793.

Available from: <<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Uqc7zC7NULMC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Atmospheric+modeling,+data+assimilation+and+predictability&ots=1I5gpir1RV&sig=FuhXqkYSMxhz2jLI2T8144HX6fs>>. 2, 22, 24, 37

KARPECHKO, A.; TUMMON, F.; WMO, S. Climate Predictability in the Stratosphere. **Bulletin of the World Meteorological Organization**, v. 65, n. 1, 2016. Available from: <<https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/climate-predictability-stratosphere>>. 65

KOLOSOF, M. A.; YAKOVLEV, O. I.; EFIMOV, A. I.; PAVELYEV, A. G.; MATYUGOV, S. S. Radio occultation of the Venusian atmosphere and bistatic radiolocation of the surface of Venus using the Venera-9 and Venera-10 satellites. **Radio Science**, v. 14, p. 163–173, January-February 1979. ISSN 00486604. Available from: <<http://doi.wiley.com/10.1029/RS014i001p00163>>. 7

KURSINSKI, E.; HAJJ, G.; 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**, v. 102, p. 23429–23465, 1997. 2, 10, 11, 14, 16, 18, 84

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; BERTIGER, W.; 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. R. N. Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. **Science**, v. 271, p. 1107–1110, February 1996. ISSN 0036-8075. 2, 8, 20

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; LEROY, S. S.; HERMAN, B. The GPS Radio Occultation Technique. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 11, n. 1, p. 53–114, March 2000. Available from: <<http://tao.cgu.org.tw/pdf/v111p053.pdf>>. 17

LI, R.; HU, M.; OLSON, J. O. **BUFR/PrepBUFR User's Guide**. Version 1.0 draft. [S.l.], 2011. 82 p. Available from: <[http://www.dtcenter.org/com-GSI/BUFR/docs/users\\_guide/BUFR\\_PrepBUFR\\_User\\_Guide\\_v1.pdf](http://www.dtcenter.org/com-GSI/BUFR/docs/users_guide/BUFR_PrepBUFR_User_Guide_v1.pdf)>. 31

LYNCH, P.; HUANG, X.-Y. Initialization of the HIRLAM Model Using a Digital Filter. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 6, p. 1019–1034, 1992. Available from:

<[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<1019:IOTHMU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<1019:IOTHMU>2.0.CO;2)>. 76

MARSHALL, J.; XIAO, Y.; NORMAN, R.; ZHANG, K.; REA, A.; CUCURULL, L.; SEECAMP, R.; STEINLE, P.; PURI, K.; LE, T. The beneficial impact of radio occultation observations on Australian region forecasts. **Australian Meteorological and Oceanographic Journal**, v. 60, p. 121–125, June 2010. ISSN 1836716X. 27

MELBOURNE, W. G.; DAVIS, E. S.; DUNCAN, C. B.; HAJJ, G. A.; HARDY, K. R.; KURSINSKI, E. R.; MEEHAN, T. K.; YOUNG, L. E.; YUNCK, T. P. The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring. **JPL Publication**, v. 18, April 1994. Available from: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960008694.pdf>>. 7, 10, 11, 13

NOAA. **The World Meteorological Organization Circuits and Data Exchange**. 2013. Available from:

<<http://www.nws.noaa.gov/tg/circuit.php>>. 31

PALMER, P. I.; BARNETT, J. J.; EYRE, J. R.; HEALY, S. B. A nonlinear optimal estimation inverse method for radio occultation measurements of temperature, humidity, and surface pressure. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D13, p. 17513–17526, 2000. ISSN 2156-2202. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900151>>. 13, 23

PALMER, T.; HAGEDORN, R. **Predictability of Weather and Climate**. Cambridge University Press, 2006. 702 p. ISBN 9780511225017. Available from: <<https://books.google.com.br/books?id=vobtjwEACAAJ>>. 22

POLI, P.; JOINER, J.; KURSINSKI, E. R. 1DVAR analysis of temperature and humidity using GPS radio occultation refractivity data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. ACL 14–1–ACL 14–20, 2002. ISSN 2156-2202. 4448. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000935>>. 20

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. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 20, n. 1, p. 101–113, February 2009. 2

PRITCHARD, M. S.; SOMERVILLE, R. C. J. Empirical orthogonal function analysis of the diurnal cycle of precipitation in a multi-scale climate model. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 5, p. 1–5, 2009. ISSN 00948276. 51

RANGASWAMY, S. Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data. **Geophysical Research Letters**, v. 3, n. 8, p. 483–486, 1976. ISSN 1944–8007. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/GL003i008p00483>>. 1, 7

RENNIE, M. P. The assimilation of GPS Radio Occultation measurements at the Met Office A review of the operational use of GPSRO at the Met Office. In: ECMWF, Shinfield Park, Reading. **ECMWF GRAS SAF Workshop on Applications of GPS Radio Occultation Measurements**. Shinfield Park: ECMWF, 2008. 16-18 June. 20, 63

\_\_\_\_\_. The impact of GPS radio occultation assimilation at the Met Office. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 136, p. 116–131, 2010. ISSN 1477-870X. January 2010. Part A. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.521>>. 2, 25

RIM, H. J.; SCHUTZ, B. E. **Precision Orbit Determination (POD)**. Austin, October 2002. Available from: <[http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/atbd\\_pod\\_10\\_02.pdf](http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/atbd_pod_10_02.pdf)>. Access in: 14 fev. 2016. 11

ROCKEN, C.; YUNCK, T. **Radio Occultation. Atmospheric Profiling with Global Navigation Satellite Systems (GNSS)**. UCAR's COMET program, 2006. Available from: <<http://www.cosmic.ucar.edu/ro.html>>. 14

RÜEGER, J. M. Refractive Index Formulae for Radio Waves. In: JS28 INTEGRATION OF TECHNIQUES AND CORRECTIONS TO ACHIEVE ACCURATE ENGINEERING, April., 2002, Washington, D.C., USA. **FIG Proceedings XXII International Congress**. 2002. p. 19–23. Available from: <[https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig\\_2002/Js28/JS28\\_rueger.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/Js28/JS28_rueger.pdf)>. 18, 19, 45

SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; F., C.; AMARANTE, L.; HERDIES, D. Impacto de perfis de rádio ocultação GNSS na qualidade das previsões de tempo

do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 551–567, 2014. 3, 10, 17, 19, 29, 40, 43, 57, 61

SAPUCCI, L. F.; DINIZ, F. L. R.; BASTARZ, C. F.; AVANÇO, L. A. Inclusion of Global Navigation Satellite System radio occultation data into Center for Weather Forecast and Climate Studies Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) using the Radio Occultation Processing Package as an observation operator.

**Meteorological Applications**, v. 23, n. 2, p. 328–338, April 2016. ISSN 1350-4827. 4, 29

SAPUCCI, L. F.; GONÇALVES, L. G.; ZELL, J. G.; BASTARZ, C. F.; FRASSONI, A. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Investigação de métricas estatísticas e implementação no Sistema Comunitário de Avaliação de Modelos Numéricos de Previsão de Tempo e Clima - SCAMTEC. In: **Projeto de pesquisa CNPq – Universal 2010**. Julho. [s.n.], 2010. p. 27. Available from: <[http://assimila.cptec.inpe.br/scamtec/sites/default/files/Universal\\_sapucci\\_2010\\_v1.1\\_final.pdf](http://assimila.cptec.inpe.br/scamtec/sites/default/files/Universal_sapucci_2010_v1.1_final.pdf)>. 39, 40

SCHREINER, W. S.; HUNT, D. C.; ROCKEN, C.; SOKOLOVSKIY, S. Precise GPS Data Processing for the GPS/MET Radio Occultation Mission at UCAR. In: **Proceedings of the 1998 National Technical Meeting of The Institute of Navigation**. [s.n.], 1998. 21-23 January. Available from:

<<https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=597>>. 11

SCITECHDAILY. **Commercial Network of Microsatellites Aims to Help Weather Prediction**. 2012. Available from: <<http://scitechdaily.com/commercial-network-of-microsatellites-aims-to-help-weather-prediction/>>. Access in: 13 fev. 2016. 97

SILVA, I.; SEGANTINE, P. **Topografia para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015. ISBN 85-352-7748-X,978-85-352-7748-7. 7

SOKOLOVSKIY, S. Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. **Radio Science**, v. 36, May/Jun 2001. ISSN 1944-799X. Available from: <[http://www.cosmic.ucar.edu/related\\_papers/Sergey344.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/Sergey344.pdf)>. 13

\_\_\_\_\_. Effect of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere. **Radio Science**, v. 38, n. 3, 2003. Available from:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.377.1842&rep=rep1&type=pdf>>. 18

STEINER, A. K.; KIRCHENGAST, G.; LADREITER, H. P. Inversion, error analysis, and validation of GPS/MET occultation data. **Annales Geophysicae**, v. 17, n. 1, p. 122–138, 1999. ISSN 09927689. 17

SYNDEGAARD, S. Modeling the impact of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from limb sounding. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, May/June 1998. ISSN 1944-799X. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682697000564>>. 15

SYNDERGAARD, S. On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements. **Radio Science**, v. 35, n. 3, p. 865–883, 2000. ISSN 1944-799X. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/1999RS002199>>. 16

\_\_\_\_\_. **Validation Report: Near Real-Time Level 2a Refractivity Profiles: Metop-A (GRM-01, NRPMEA) and Metop-B (GRM-40, NRPMEB)**. [S.l.], March 2014. SAF/ROM/DMI/RQ/REP/001. Available from: <[http://www.romsaf.org/romsaf\\_ropp\\_overview.pdf](http://www.romsaf.org/romsaf_ropp_overview.pdf)>. 21

T., Y. Y.; RIGHETTI, P. L. Precise Calibration of Multi-Segment Maneuvers for EUMETSAT Polar System (EPS) Operations Planning. In: **Proceedings of the 25th International Symposium on Space Flight Dynamics**. Munich: ISSFD, 2015. Available from: <[http://www.seaspace.com/docs/metop\\_customers.pdf](http://www.seaspace.com/docs/metop_customers.pdf)>. 20

TAKASU, T.; KASAI, S. Precise Orbit Determination of GPS Satellites using Carrier Phase Measurements. In: **Proceedings of the 15th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics**. Japan: ISAS/JAXA, 2005. 25-26 Jul. Available from: <<http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/astro2005.pdf>>. 12

TARASOVA, T. A.; FIGUEROA, S. N.; BARBOSA, H. M. J. **Incorporation of new solar radiation scheme into CPTEC GCM**. Cachoeira Paulista - CPTEC: INPE, 2007. 44 p. Available from: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2006/01.16.10.40>>. 42, 44

THAYER, G. D. An improved equation for the radio refractive index of air. **Radio Science**, v. 9, n. 10, p. 803–807, 1974. ISSN 1944-799X. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1029/RS009i010p00803>>. 18

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 Numerical Models**. Shinfield Park, Reading: ECMWF, 1983. p. 297–316. 42, 44

UVO, C. R. B. **A zona de convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 97 p. Master Thesis (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1989-03-16 1989. Available from:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.26.22.54>>. 89

WANG, H.-G.; WU, Z.-S.; KANG, S.-F.; ZHAO, Z.-W. Monitoring the marine atmospheric refractivity profiles by ground-based GPS occultation. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 4, p. 962–965, 2013. ISSN 1545598X (ISSN). Available from:

<<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84878624517&partnerID=40&md5=d767ee6b0367ea5e08a75d72ddbc49ef>>. 76

WARE, R. GPS sounding of the earth atmosphere. **GPS World**, v. 3, p. 56–57, 1992. 1, 8

WICKERT, J.; GALAS, R.; BEYERLE, G.; KÖNIG, R.; REIGBER, C. GPS ground station data for CHAMP radio occultation measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 503–511, 2001. ISSN 14641895. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464189501000928>>. 19

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Elsevier Science, 2006. (International Geophysics, v. 91). Second Edition. ISBN 13:978-0-12-751966-1. Available from:

<<https://books.google.com.br/books?id=fxPiH9Ef9VoC>>. 41, 50

XIA, P.; YE, S.; JIANG, K. Estimation and Evaluation of COSMIC Radio Occultation Excess Phase Using Non-differenced Measurements. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, p. 1–20, November 2016. 12

XOPLAKI, E.; LUTERBACHER, J.; BURKARD, R.; PATRIKAS, I.; MAHERAS, P. Connection between the large-scale 500 hPa geopotential height fields and precipitation over Greece during wintertime. **Climate Research**, v. 14, n. 2, p. 129–146, 2000. ISSN 0936577X. 51

XUE, Y.; SELLERS, P. J.; KINTER, J. L.; SHUKLA, J. A. Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies. **Journal of Climate, American Meteorological Society**, v. 4, n. 3, p. 345–364, March 1991. ISSN 0894-8755. Available from: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%281991%29004%3C0345%3AASBMFG%3E2.0.CO%3B2>>. 42, 44

YEN, N. L.; FONG, C.-J.; CHANG, G.-S. Approaching the First Global Radio Occultation Operational Mission Using Constellation LEO Satellites. In: EUMETSAT, 2012, Sopot, Poland. **EUMETSAT Meteorological Satellite Conference**. EUMETSAT, 2012. 3-7 September. Available from: <[https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_FILE&dDocName=PDF\\_CONF\\_P61\\_S1\\_08\\_YEN\\_V&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web](https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_CONF_P61_S1_08_YEN_V&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web)>. 57, 98

YUNCK, T. P.; LIU, C.-H.; WARE, R. A History of GPS sounding. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science**, v. 11, n. 1, p. 1–20, 2000. Available from: <[http://www.cosmic.ucar.edu/related\\_papers/Yunck363.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/Yunck363.pdf)>. 1, 8

ZHANG, K.; ZHANG, S.; MARSHALL, J.; KIRCHENGAST, G. A New Australian GNSS Radio Occultation Data Processing Platform. In: IGNSS, 2013, Queensland, Australia. **IGNSS 2013: International GNSS Society Symposium**. [S.l.], 2013. 16-18 July. 27

## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Dissertação apresentada no Curso de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.