

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

LUIZ FERNANDO SAPUCCI

ESTIMATIVAS DO IWV UTILIZANDO RECEPTORES GPS EM BASES TERRESTRES NO BRASIL: SINERGIA ENTRE A GEODÉSIA E A METEOROLOGIA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico Coorientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Toledo Machado

S243e Sapucci, Luiz Fernando Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia - Presidente Prudente: [s.n], 2005. 200p. : il.; 29 cm. Tese de Doutorado. - UNESP, Faculdade de Ciências Tecnologia, Presidente Prudente, 2005. Orientador: João Francisco Galera Monico Coorientador: Luiz Augusto Toledo Machado 1.GPS-Met. 2. GPS - Atraso Zenital Troposférico. 3. Vapor d'água atmosférico. 4. IWV - PW. I. Título. CDD (6^a ed.) 623.71

	TERMO DE APROVAÇÃO
	LUIZ FERNANDO SAPUCCI
ESTIMATIV TERREST	AS DO IWV UTILIZANDO RECEPTORES GPS EM BASES RES NO BRASIL: SINERGIA ENTRE A GEODÉSIA E A METEOROLOGIA
Tese aprovada Ciências Carto examinadora:	como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em gráficas da Universidade Estadual Paulista, pela seguinte banca
Orientador :	Dr. João Francisco Galera Monico. Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas. FCT-UNESP. Presidente Prudente –SP
Coorientador :	Dr. Luiz Augusto Toledo Machado. Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas. DSA-CPTEC-INPE. Cachoeira Paulista – SP
Examinador Ex	terno: Dr. José Antonio Aravequia. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC INPE Cachoeira Paulista – SP.
Examinador Ex	terno: Dr. Paul J. de Jonge. Geodetics Inc. La Jolla, CA. Maceió – AL.
Examinador int	erno: Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli Departamento de Física, Química e Biologia FCT- UNESP. Presidente Prudente - SP.
Examinador int	erno: Dr. Paulo de Oliveira Camargo Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas. FCT- UNESP. Presidente Prudente - SP.
	Presidente Prudente, 7 de dezembro de 2005.

DADOS CURRICULARES LUIZ FERNANDO SAPUCCI

NASCIMENTO:	02/12/1969 – Delfim Moreira MG.
FILIAÇÃO:	Agenor Sapucci Amazil Cortez Araújo Sapucci
1995-1998:	Curso de Graduação Licenciatura Plena em Matemática Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP
1999-2001:	Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas nível de mestrado, na Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2002-2005:	Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas nível de doutorado, na Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho às minhas amadas mulheres:

Do passado:

Dona Amazil, minha mãe (*in memorian*), pois fez valer em vida, nas vidas de seus filhos, o pensamento de Da Costa e Silva, que dizia:

"A vida amarga e triste é doce e linda, se temos mãe, e em sua imagem vimos os transportes sublimes e supremos do amor que se transmite mas não finda."

Do presente e futuro:

Érika, minha esposa, a qual, além de ter contribuído muito com a realização desse trabalho, faz valer em minha vida o pensamento de Vitor Hugo, que dizia:

"A maior felicidade é a certeza se sermos amados apesar de sermos como somos."

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, ao Qual tudo pertence, para o Qual tudo é possível e sem o Qual nada somos.

Aos orientadores desse trabalho, Dr. João Francisco Galera Monico e Dr. Luiz Augusto Toledo Machado, que muito contribuíram com o presente trabalho, sendo os principais agentes da sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia, a qual tornou possível a sua realização.

À coordenadora do experimento RACCI-LBA, Dra. Maria Assunção Faus Silva Dias, e ao coordenador do Subgrupo 2, Dr. Artemio Plana-Fattori, por viabilizarem a participação dos receptores GPS nessa campanha, cujos dados obtidos foram de extrema importância para o trabalho, e ao Eng. Cart. Eduardo Martins de Oliveira, diretor da empresa Santiago & Cintra Imp. e Exp. Ltda. por ter cedido os receptores utilizados.

Aos professores do departamento de Cartografía, aos funcionários da FCT e aos alunos da sala de permanência que, de forma direta ou indireta, contribuíram com a realização do presente trabalho, dos quais, para não ser injusto, não citarei nenhum nome, com exceção de meus quase irmãos: Marcelo Leandro Holzschuh e Wagner Carrupt Machado.

Aos pesquisadores, funcionários e amigos da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC pelo apoio a essa pesquisa, em especial ao Wagner Flauber Araújo de Lima pelo apoio técnico na implementação das previsões do Z_{TD} e à Claudia M. M. R. L. Martins pela implementação desse produto na página da DSA.

Ao Departamento de Ciências Atmosféricas do IAE-CTA, pelo fornecimento da série histórica de dados de altitude utilizada na modelagem da temperatura média troposférica, e aos funcionários e pesquisadores desse instituto pelo apoio durante o período de estágio, em especial Marcos Daisuke Oyama, Maria Aparecida Senaubar Alves e Roberto Lage Guedes;

Aos membros do Grupo de Assimilação do CPTEC, José Antônio Aravéquia, Dirceu Luis Herdies, Sergio Henrique Soares Pereira, pelo apoio na obtenção e análise dos resultados gerados nos experimentos de assimilação, e à Rita Valéria Andreoli, pelo auxílio no uso das ondeletas.

Aos funcionários e amigos do INPE de Cachoeira Paulista pelo apoio durante os vários períodos em que estive lá estagiando, em especial o pessoal do alojamento, pelo bom convívio.

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo, que com auxílio financeiro contribuiu amplamente na realização do presente trabalho (Processo N° 01/12761-9).

EPÍGRAFE

"... Essa felicidade que supomos, árvore milagrosa que sonhamos toda arreada de dourados pomos, existe sim; mas nós não a alcançamos porque está sempre apenas onde a pomos e nunca a pomos onde nós estamos."

Vicente de Carvalho

RESUMO

A quantificação do vapor d'água integrado na atmosfera (IWV - Integrated Water Vapor), ao contrário de outras variáveis meteorológicas, é algo que ainda se apresenta como um grande desafio para as Ciências Atmosféricas. Diversos mecanismos, envolvendo diferentes técnicas, têm sido empregados e testados para esse fim em diferentes regiões do globo por pesquisadores das mais variadas áreas da ciência. Essa tese apresenta uma contribuição a esse tema ao empregar receptores GPS (Global Positioning System) em bases terrestres, localizados no Brasil, envolvendo instituições de pesquisa na área de Geodésia e de Meteorologia. Os objetivos principais desse trabalho são validar os valores do IWV obtidos a partir das observações GPS e contribuir com a viabilização da utilização de redes ativas de receptores GPS, existentes atualmente e futuras, no monitoramento do IWV como suporte às atividades da Meteorologia e Climatologia no Brasil. Os resultados obtidos mostram que, com a efetivação desse processo, poderá ser obtida uma fonte adicional de informações da umidade para Previsão Numérica de Tempo (PNT). Além disso, é mostrado também que a alta resolução temporal dos valores do IWV obtidos a partir das observações GPS pode contribuir para a melhoria dos resultados gerados por outras técnicas empregadas na mesma tarefa. Em contrapartida, um modelo de PNT é utilizado para gerar previsões da influência da troposfera nos sinais GPS, visando beneficiar aplicações GPS em tempo real. Os resultados gerados nesse trabalho são frutos da sinergia entre as duas áreas envolvidas e mostram que, atualmente, há boas perspectivas para essa parceria no Brasil.

Palavras chave: IWV-GPS. IWV. GPS. Vapor D'água Atmosférico. ZTD. Temperatura Média Troposférica. Radiossonda. RACCI-LBA. PNT. Assimilação de dados

ABSTRACT

Quantification of Integrated Water Vapor (IWV), unlike other meteorological variables, still represents a significant challenge to the Atmospheric Sciences. In this task several techniques using different mechanisms have been employed and tested in different regions of the planet. Many researchers from several areas of science have been involved in this process. This thesis presents a contribution to this theme, employing ground-based GPS receivers installed on Brazilian territory, involving Geodesy and Meteorology research institutes. The main aim of this work is to contribute in order to make enable the use of the existing networks of continuously operating GPS receivers, and those that will be installed in the future, in IWV monitoring to support meteorological and climatological activities in Brazil. The results generated show that in this process it is possible to obtain an additional source of humidity information for Numerical Weather Prediction (NWP). Furthermore, the prospect of using the ground-based GPS receivers to monitor atmospheric water vapor is promising because the high temporal resolution of IWV values from GPS observations can improve the results generated from other techniques employed in the same task. At the same time, a NWP model is applied to generate predictions of the atmosphere's influence over radiofrequency signals, to improve real time GPS applications. The results of this work stem from the synergy between the two areas of science involved. They show that the current outlook for this partnership in Brazil is good, and that both Meteorology and Geodesy will benefit.

Key words: IWV-GPS. IWV. GPS. Atmospheric Water Vapor. ZTD. Tropospheric Mean Temperature. Radiosonde. RACCI-LBA. NWP. Data Assimilation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das estações de lançamento das radiossondas utilizadas na modelagem da <i>Tm</i> com destaque para as diferentes regiões climáticas consideradas47
Figura 2 - Valores da temperatura média troposférica em função do dia do ano para as radiossondas lançadas em (a) Porto Alegre-RS e (b) Natal-RN
Figura 3 - Valores dos coeficientes da equação 16 em função dos meses do ano para Curitiba- PR
Figura 4 - Desvio padrão dos valores da <i>Tm</i> provenientes da modelagem espaço-temporal em função do tempo para todas as estações avaliadas
Figura 5 – Estrutura de tubo de PVC utilizada para o lançamento simultâneo de 3 radiossondas (a) e 4 radiossondas (b)
Figura 6– Diagrama de dispersão dos valores do IWV provenientes das radiossondas em função dos valores da RS80
Figura 7 – Disposição das antenas sobre o Laboratório de Geodésia Espacial (LGE-UNESP).
Figura 8 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV nas possíveis combinações dos receptores GPS avaliados
Figura 9 – Valores do viés e do RMS obtidos nas 6 possíveis combinações entre os receptores em função das horas do dia
Figura 10 – Distribuição geográfica das estações do RACCI no Estado de Rondônia
Figura 11 – Valores das discrepâncias (a) e os valores do IWV-GPS (b) em função dos valores do IWV gerados pelo fotômetro solar CIMEL
Figura 12 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV-HSB em função do IWV-GPS92
Figura 13 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV gerados pelo fotômetro CIMEL em função do IWV-RS80
Figura 14 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV-GPS em função dos valores do IWV- RS8094
Figura 15 - Série temporal da média global do TEC para o período de 1 de janeiro de 1995 a 31 de setembro de 2005 (Adaptado de IAUB, 2005). Os valores observados são mostrados em vermelho e as estimativas em azul
Figura 16 – Valores médios do TEC na direção satélite-receptor em função do tempo (hora local) e medidas estatísticas da comparação GPS versus RS80 em função do tempo (horas sinóticas UTC)
Figura 17 – Valores médios do multicaminho na L1 (a) e L2 (b) em intervalos de 5 minutos para o dia 22/10/2002 nas estações GPS do RACCI

Figura	 18 – Diagrama ilustrativo do fluxo de dados em uma rodada cíclica na versão global do modelo de PNT do CPTEC. 108
Figura	19 – Concentração das informações assimiladas pelo GPSAS na rodada de controle para a <i>análise</i> das 12:00 UTC do dia 26/9/2002
Figura	20 - Concentração das informações assimiladas pelo GPSAS na rodada de controle para a <i>análise</i> das 18:00 UTC do dia 26/9/2002
Figura	21 – Diagrama de cores do campo de IWV sobre a América do Sul da <i>análise</i> gerada para as 18:00 UTC do dia (27/9/2002) na rodada de controle do GPSAS-CPTEC. 112
Figura	22 – Valores do IWV da <i>análise</i> gerada na rodada de controle e a série temporal do IWV-GPS nas 3 estações do RACCI
Figura	23 – Valores do IWV gerados nas rodadas de controle e na rodada com assimilação IWV-GPS somente em ABRA comparados com a série temporal do IWV para as 3 estações do RACCI
Figura	 24 – Valores do IWV gerados nas rodadas de controle e na rodada com assimilação IWV-GPS nas 3 estações do RACCI comparados com a série temporal do IWV119
Figura	25 – Diagrama de cores mostrando a diferença (rodada com a assimilação menos o controle) dos campos do IWV sobre o território brasileiro para a <i>análise</i> gerada na rodada das (a) 0:00 UTC, (b) 6:00 UTC, (c) 12:00 UTC e (d) 18:00 UTC do dia 29/9/2002 (valores em kg m ⁻²).
Figura	26– Diagrama de cores mostrando a diferença (rodada com a assimilação do IWVGPS menos o controle) dos campos do IWV sobre o território brasileiro para a <i>análise</i> gerada na rodada das (a) 0:00 UTC, (b) 6:00 UTC, (c) 12:00 UTC e (d) 18:00 UTC do dia 30/9/2002 (valores em kg m ⁻²).
Figura	27 – Perfil de razão de mistura original do <i>First Guess</i> e o perfil interpolado para os 15 níveis em que as informações são assimiladas no GPSAS
Figura	28 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 1 hora
Figura	29 - Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 3 horas
Figura	30 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 6 horas
Figura	31 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 12 horas
Figura	32 - Distribuição geográfica das estações GPS da RBMC, (Fonte: IBGE, 2005) 134
Figura	 33 – Distribuição geográfica das estações GPS localizadas no Estado de São Paulo pertencentes a diferentes redes ativas (atuais e futuras)
Figura	34 – Valores de pressão atmosférica interpolados (círculos em vermelho) a partir de valores medidos (losangos azuis) na estação meteorológica de Porto Velho obtidos por <i>spline</i> cúbica

Figura 35 - Comparação entre valores de pressão interpolados e valores medidos na estação ABRA no dia do ano 278 (5/10/2002)
Figura 36 - Série temporal do IWV nas estações GPS do RACCI em função do tempo e o nível 12 da decomposição pela ondeleta <i>Daubechies</i> de ordem 10146
Figura 37 - Série temporal do IWV na estação ABRA durante episódios de precipitação atmosférica
Figura 38 – Análise por ondeleta aplicada à série filtrada do IWV-GPS: (a) Série temporal filtrada do IWV; (b) espectro de potência (c) Potência média global150
Figura 39 - Detalhamento da análise por ondeleta aplicada à série temporal do IWV-GPS da estação ABRA entre os dias 267 e 270: (a) espectro de potência; (b) dados do Radar: precipitação pluviométrica; (c) variância media para bandas de 1,5-3 e (d) 3-6 horas.
Figura 40 - Perfis de umidade com alta resolução temporal obtidos a partir dos valores IWV- GPS e os perfis de umidade das radiossondas lançadas no dia 18/10/2002154
Figura 41 - Campo dos valores do IWV sobre o Brasil obtido a partir da sondagem remota da atmosfera realizada pelos satélites da série NOAA (Fonte: DSA, 2005)155
Figura 42 - Campos dos valores médios do Z_{WD} sobre a América do Sul nas diferentes estações do ano
Figura 43 - Campos dos valores médios do Z _{HD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b)
Figura 44 - Esquema de cores contendo valores do atraso zenital troposférico (<i>Z</i> _{TD}) ara a América do Sul, durante o inverno (a) e o verão (b)
Figura 45 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) CRAT, (b) CUIB e (c) RECF
Figura 46 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) UEPP, (b) BOMJ e (c) POAL
Figura 47 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) BRAZ e (b) PARA174
Figura 48 - Comparação dos valores do Z_{TD} previstos pelo modelo de PNT e os gerados pelo processamento dos dados GPS com os obtidos a partir de radiossondas
Figura 49 – Campos do Z_{WD} sobre a região sudeste do Brasil provenientes das <i>análises</i> geradas com o emprego do (a) modelo global do CPTEC e do (b) modelo regional ETA para o dia 1° de junho de 2004 às 0:00 UTC

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre as estações de lançamento das radiossondas utilizadas e sobre o período em que os lançamentos foram realizados
Tabela 2 - Valores dos pesos dos 4 primeiros fatores gerados por análise fatorial depois de uma rotação varimax 50
Tabela 3 - Valores dos pesos das variáveis nos dois primeiros fatores gerados por análise fatorial e uma rotação varimax para as diferentes regiões climáticas
Tabela 4 - Regressões lineares dos valores da Tm envolvendo combinações das variáveis medidas na superfície e respectivos R^2
Tabela 5 - Valores dos coeficientes da regressão linear dada pela equação 16, do coeficiente de determinação e variância para as diferentes regiões climáticas consideradas
Tabela 6 - Indicativos da qualidade dos valores da <i>Tm</i> gerados pelo modelo brasileiro60
Tabela 7 - Indicativos da qualidade dos valores da Tm gerados pelas regressões lineares regionalizadas
Tabela 8 – Incerteza nos valores finais do IWV-GPS gerada pela incerteza nos valores da Tm obtidos pelo modelo regionalizado
Tabela 9 - Indicativos da qualidade dos valores IWV com relação à radiossonda RS80 nas diferentes camadas do perfil atmosférico
Tabela 10 – Informações dos receptores envolvidos no experimento de intercomparação de receptores GPS e no experimento RACCI*
Tabela 11 - Detalhes da configuração utilizada no processamento dos dados GPS para a estimativa dos valores do Z_{WD} e obtenção dos valores do IWV
Tabela 12 – Valores dos indicadores da qualidade dos valores do IWV obtidos na comparação entre os receptores GPS
Tabela 13 - Incerteza esperada na diferença entre os valores do IWV-GPS e os provenientes dos perfis de umidade da radiossonda RS80 em termos percentuais 82
Tabela 14 – Localização das estações do RACCI e o período de coleta de cada instrumento utilizado na quantificação do IWV
Tabela 15 - Relação das coordenadas das estações GPS do experimento RACCI referenciadas ao ITRF94
Tabela 16 - Indicativos da qualidade dos valores da Tm considerando as radiossondas lançadas no RACCI 88
Tabela 17 – Latência dos valores do IWV-GPS de melhor qualidade obtidos quase que em tempo real comparados com valores pós-processados

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

4000SSI = Abreviação do receptor da marca TRIMBLE modelo 4000SSI ABRA = Um dos sítios de coleta de dados do experimento RACCI (Ouro Preto de Oeste-RO) AERONET = AErosol RObotic NETwork AIUB = Astronomisches Institut Universität Bern ANA = Agência Nacional de Águas ATOVS = Advanced TIROS Operational Vertical Sounder BDM = Banco de Dados Meteorológicos BOMJ = Estação GPS da RBMC localizada em Bom Jesus da Lapa-BA. BRAZ = Estação GPS da RBMC localizada em Brasília-DF. CEMIG = Companhia de Energia elétrica de MInas Gerais CIMEL = Fotômetro solar da marca Cimel. CLA = Centro de Lançamento de Foguetes CNS-ATM = Communication Navigation Surveillance-Air Traffic Management CODE = Center for Orbit Determination in Europe COLA = Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies COSMIC = Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate COST-716 = European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research 716 CPTEC = Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. CRAT = Estação GPS da RBMC localizada em Crato-CE CUIB = Estação GPS da RBMC localizada em Cuibá-MT DAO = Data Assimilation Office DAS = Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais DFM-97 = Radiossondas fabricadas pela Radiosondes GmbH & Co. KG DPV-FAB = Destacamento de Proteção ao Vôo da Força Aérea Brasileira ECMWF = European Centre for Medium-Range Weather Forecasts EITR = Equação Integral de Transferência Radiativa ETA = Modelo regional de PNT desenvolvido pela NCEP FAB = Força Aérea Brasileira FG = First guessFSL = Forestcast System Laboratory GASP = GPS Atmosphere Sounding Project GENESIS = GPS Environmental & Earth Science Information System GEONET = GPS Earth Observation Network GIPSY = GPS Inferred Positioning SYstem; GJMI = Sítio de coleta situado na cidade de Guajará Mirim-RO. GL-98 = Radiossondas fabricadas pela *MODEM* da França e *InterMet Sys* dos EUA GLONASS = Global Navigation Satellite System GNSS = Global Navigation Satellite System GOA-II = GIPSY OASIS II

GOES = Geostationary Operational Environmental Satellite

GPS/MET JAPAN = GPS meteorology in Japan

GTS = Global Telecommunication System

HIRLAM = High Resolution Limited Area Modeling

HIRS = *High Resolution Infrared Spectrometer*

HSB = Humidity Sounder for Brazil

IAG = International Association of Geodesy

ICAO = International Civil Aviation Organization

IDD = Internet Data Distribution

IGS = International GNSS Service

INMET = Instituto Nacional de Meteorologia

INPA = Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia

INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IWV = Integrated Water Vapor

IWV-GPS = Valores do IWV obtidos a partir de receptores GPS em bases terrestres

IWV-HSB = Valores do IWV obtidos a partir de medidas do HSB

IWV-MWR = Valores do IWV obtidos a partir de medidas efetuados por um MWR

IWV-RSO = Valores do IWV obtidos a partir de perfis de umidade das radiossondas

IWV-RSO = Valores do IWV obtidos a partir de perfís de umidade da radiossonda RS80

JPL = Jet Propulsion Laboratory

LBA = Experimento de Larga Escala da Atmosfera-Biosfera da Amazônia

LEG1 e LEG2 = Abreviação dos receptores Legacy-1 e Legacy-2.

LEO = Low Earth Orbits.

LGE = Laboratório de Geodésia Espacial

MCG = Modelo de Circulação Geral

MKII = Radiossondas fabricadas pela Sippican Inc. dos EUA

MM5 = *Mesoscale Model 5*

MS = Sigla do estado do Mato Grosso do Sul

MSU = Microwave Sounding Units

MVC = Matriz de variância e covariância

MWR = *Microwave radiometer*

NASA = National Aeronautics Space Administration

NCAR = National Center for Atmospheric Research

NCEP = National Centers for Environmental Prediction

NOAA = National Oceanic & Atmospheric Administration

OASIS = Orbit Analysis and Simulation Software

ODS = Observation Data Stream

PARA = Estação GPS da RBMC localizada em Curitiba-PR

PCD = Plataforma de coleta de dados

PNT = Predição Numérica de Tempo

POAL = Estação GPS da RBMC localizada em Porto Alegre-RS

POLI-USP = Universidade Politécnica de São Paulo

PPP = Método de Posicionamento por Ponto Preciso

PSAS = Physical-space Statistic Analysis System

PSU = Pennsylvania State University

PTVE = Sítio de coleta situado na cidade de Porto Velho-RO

RACCI = Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season

RBMC = Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos satélites GPS

RECF = Estação GPS da RBMC localizada em Recife-PE

RS80 e RS90 = Radiossondas fabricadas pela Vaisala Oyj da Finlândia

RSO = WMO RadioSOnde Intercomparison

RSS = Remote Sensing Systems

RUC = *Rapid Update Cycle*

SIVAM = Serviço de Vigilância da Amazônia

SIWV = Slant Integrated Water Vapor

SSM/I = Special Sensor Microware/Imager

SUOMINET = Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education

SW = Sensor de umidade Meteolabor Snow White da Suíça

TEC = *Total Electron Content* (Conteúdo total de electrons)

TEQC = Translation Edit Quality Check

TIROS = Television Infrared Observation Satellite

TOUGH = Targeting Optimal Use of GPS Water Vapor Measurements in Meteorology

UCAR = University Corporation for Atmospheric Research

UEPP = Estação GPS da RBMC localizada em Presidente Prudente-SP

UKMO = United Kingdom Meteorological Office

USP = Universidade de São Paulo

UTC = Coordinated Universal Time o mesmo que GMT

WMO = World Meteorology Organization

ZXII = Abreviação do receptor GPS da ASHTECH modelo ZXII

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\sigma_{_{iwv}}$ Desvio padrão dos valores do IWV
- $\Delta \sigma(k)$ Espessura da *k*-éssima camada atmosférica
- ψ_0 Função de ondeleta
- $\sigma_{{\scriptscriptstyle Tm}}$ Desvio padrão dos valores da ${\scriptscriptstyle Tm}$
- $\sigma_{\rm \scriptscriptstyle GPS}$ Desvio padrão dos valores do IWV-GPS
- $\sigma_{\rm \scriptscriptstyle RSO}$ Desvio padrão dos valores do IWV-RSO
- $\sigma_{\scriptscriptstyle DIF}$ Desvio padrão esperado na diferença ente os valores do IWV-GPS e do IWV-RSO
- Z_w^{-1} Inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água
- $\eta\,$ Parâmetro de tempo adimensional
- \overline{n} Parâmetro de translação para deslocar uma ondeleta no tempo
- $q_{\it obs}^{\,(1)}$ Umidade específica observada
- IWV_{obs} Valores do IWV observado
- Ψ Constante de proporcionalidade entre os valores do Z_{WD} e do IWV
- ρ Densidade do ar
- φ Latitude
- $k_{\scriptscriptstyle I},\,k_{\scriptscriptstyle 2}^{'}$ e $k_{\scriptscriptstyle 3}$ Constantes da refratividade atmosférica
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, ..., \beta_r$. Coeficientes de uma regressão múltipla onde *r* é o número de variáveis

a, b, c e d - Coeficientes de uma regressão múltipla com 3 variáveis de predição

- dif Discrepâncias entre duas medidas comparadas
- DP Desvio padrão
- D_{TROP} Atraso troposférico
- e Pressão parcial do vapor d'água atmosférico
- EMQ Erro médio quadrático
- *g* Aceleração da gravidade
- *h* Altitude
- hg Altitude geopotencial
- $IWV_l(t)$ Valor do IWV no nível considerado l para uma época t
- L1 e L2 Duas das observáveis GPS
- n Número de dados considerado em uma amostra

- *n* Número de iteração
- N Refratividade atmosférica
- P^{l} Percentagem de umidade do perfil total existente no nível l.
- Ps Pressão atmosférica medida na superfície
- q Umidade específica
- r Coeficiente de correlação
- R^2 Coeficiente de determinação
- R_h Constante específica para os gases hidrostáticos
- Rm Razão de mistura
- RMS Root mean square
- R_w Constante específica para o vapor d'água
- s Parâmetro de dilatação para modificar a escala de uma ondeleta
- S Trajetória efetivamente percorrida pelo sinal entre o satélite e o receptor GPS
- S_g Comprimento da trajetória geométrica entre o satélite e o receptor GPS
- t Tempo
- Td Temperatura do ponto de orvalho
- Tm Temperatura média troposférica
- Tmobs Valores da Tm calculados a partir dos perfis das radiossondas
- *Tm_{mol}* Valores da *Tm* obtidos pela aplicação de um modelo proposto
- Ts Temperatura do ar medida na superfície
- Tv Temperatura virtual
- u Componente zonal do vento
- UR Umidade relativa do ar atmosférico
- v Componente meridional do vento
- Viés Medida de tendência obtida pela média aritmética dos erros
- Y Variável resposta em uma regressão múltipla
- $z_1, z_2,...,z_r$ Variáveis de predição em uma regressão múltipla onde r é o número de variáveis
- Z_{HD} Componente hidrostática do atraso zenital troposférico
- Z_{TD}- Atraso zenital troposférico
- Z_{WD} Componente úmida do atraso zenital troposférico
- ε erro aleatório em uma regressão múltipla

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Delimitação do assunto	21
1.2 Objetivos	23
1.3 Conteúdo do trabalho	24
2 ESTIMATIVAS DO IWV UTILIZANDO DADOS DE RECEPTORES GPS EM B	ASES
TERRESTRES	26
2.1 Estimativas do IWV a partir dos dados de receptores GPS em bases terrestres	27
2.2 Temperatura média troposférica	
2.3 Situação atual da utilização das redes ativas para a quantificação do IWV-GPS	
2.4 Previsão numérica de tempo e a assimilação dos valores do IWV	34
2.4.1 Assimilação dos valores do IWV em um modelo de PNT	36
2.4.2 Determinação dos valores do atraso troposférico quase que em tempo real	40
2.4.3 Situação atual da assimilação do IWV-GPS em modelos de PNT	41
3 MODELAGEM DA TEMPERATURA MÉDIA TROPOSFÉRICA PARA ESTIMAT	IVAS
DO IWV-GPS NO BRASIL	46
3.1 Dados disponíveis para a modelagem	47
3.2 Análise fatorial da variabilidade dos dados	48
3.3 Modelagem da <i>Tm</i> utilizando regressão múltipla	52
3.4 Modelagem espaço-temporal da <i>Tm</i>	58
3.5 Avaliação da qualidade da modelagem obtida	59
3.6 Comentários adicionais	63
4 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO IWV-GPS NA REGIÃO AMAZÔNICA	65
4.1 Determinação da incerteza esperada na comparação entre IWV-GPS e IWV-RSO.	67
4.1.1 Experimento de intercomparação de radiossondas	67
4.1.2 Experimento de intercomparação de receptores GPS	73
4.1.3 Incerteza esperada da comparação GPS e RSO	82
4.2 Validação das estimativas IWV-GPS na região Amazônica	83
4.2.1 Instrumentos utilizados na quantificação do IWV na campanha RACCI	84
4.2.2 Processamento dos dados	86
4.2.3 Análise dos resultados	89
4.2.3.1 Análise de tendência dos valores IWV-GPS versus IWV-RS80	94
4.2.3.2 Análise de dispersão dos valores IWV-GPS versus IWV-RS80	102
5 POTENCIALIDADE DE USO DOS VALORES DO IWV-GPS NO BRASIL	104

5.1 Assimilação dos valores do IWV-GPS no modelo de PNT do CPTEC105
5.1.1 Modelo de PNT e o sistema de assimilação de dados do CPTEC106
5.1.2 Experimento de assimilação do IWV-GPS no Brasil
5.1.2.1 Valores IWV-GPS disponíveis e metodologia utilizada na assimilação 109
5.1.2.2 Análise dos resultados obtidos
5.1.2.3 Comentários adicionais
5.1.3 Estimativas do IWV-GPS em tempo real125
5.1.3.1 Experimento para avaliação do tamanho ideal da janela deslizante de dados
GPS126
5.1.3.2 Análise dos resultados
5.1.4 Estudos sobre a assimilação do IWV-GPS provenientes de redes ativas no Brasil
5.1.4.1 Situação atual e futura das redes ativas de receptores GPS no Brasil
5.1.4.2 Configurações de coleta, armazenamento e processamento dos dados GPS,
necessárias para a utilização das redes ativas de receptores GPS na PNT137
5.2. Potencialidade da alta resolução temporal das estimativas do IWV-GPS141
5.2.1 Análise da variabilidade temporal do IWV142
5.2.1.1 Análise da variabilidade do IWV durante o RACCI: exemplificação143
5.2.2 Perfis de umidade com alta resolução temporal152
5.2.2.1 Perfis de umidade com alta resolução temporal no RACCI: exemplificação 153
5.2.3 Estações GPS como pontos de controle dos campos de IWV gerados por satélites
5.3 Novas aplicações para as redes ativas de receptores GPS na Meteorologia brasileira. 157
6 PREDIÇÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL PARA
POSICIONAMENTO GNSS EM TEMPO REAL
6.1 Modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico empregando modelos de PNT 160
6.2 Variabilidade sazonal do atraso zenital troposférico sobre a América do Sul163
6.3 Vantagens e desvantagens da modelagem dinâmica do Z _{TD}
6.4 Avaliação da qualidade das previsões do atraso zenital troposférico168
6.5 Comentários adicionais
7 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES178
7.1 Conclusões
7.2 Recomendações

1 INTRODUÇÃO

É consenso que o vapor d'água integrado na atmosfera (IWV - *Integrated Water Vapor*) desempenha um importante papel nos processos atmosféricos, pois contribui significativamente com o efeito estufa, e sua distribuição está associada com a concentração de nuvens e ocorrência de precipitação. A convecção do ar úmido e a liberação do calor latente, devido às mudanças de fase da água, influenciam a instabilidade vertical da atmosfera e a estrutura e evolução de sistemas atmosféricos.

Ao contrário de outros elementos atmosféricos, o vapor d'água nos trópicos apresenta grande variabilidade temporal e espacial, podendo quantitativamente sofrer uma modificação significativa em um curto período de tempo (HARTMAN, 1994). Essa característica faz com que a quantificação dessa variável, no nível de acurácia exigido pela demanda científica, seja ainda um desafío. Diversos dispositivos, empregando diferentes princípios físicos, têm sido utilizados para medir operacionalmente a variação temporal e espacial do IWV, tais como radiossondas, radiômetros, fotômetros solares, receptores GPS (*Global Positioning System*) e sensores de umidade a bordo de satélites artificiais orbitando a Terra. Cada uma dessas técnicas apresenta diferentes vantagens no que se refere à resolução temporal e espacial fornecida, em cuja escolha deve ser levado em consideração, principalmente, o custo elevado que algumas delas apresentam.

Quanto aos receptores GPS, esses podem ser empregados para a quantificação do vapor d'água de duas formas: a primeira a partir de receptores instalados em bases terrestres e a segunda a partir de receptores a bordo de satélites LEO (*Low Earth Orbits*). Enquanto a primeira é capaz de gerar valores do IWV com alta resolução temporal (BEVIS

et al, 1992; EMARDSON, 1998), a segunda fornece perfis de umidade com boa resolução espacial (WARE et al., 1996; ROCKEN et al., 1997a). O presente trabalho explora a técnica que emprega as observações efetuadas pelas redes de receptores GPS em bases terrestres na quantificação do IWV dentro do território brasileiro, envolvendo instituições de pesquisa na área de Geodésia e de Meteorologia. Como em ambas as áreas de pesquisa existem processos que dependem das informações sobre o IWV, o desenvolvimento desse trabalho, devido à cooperação mútua entre elas, tem sido um bom exemplo de sinergia¹ entre a Geodésia e a Meteorologia com relação ao tema. O objetivo principal almejado é enfatizar as potencialidades apresentadas por essa técnica ao empregar redes ativas de monitoramento contínuo dos sinais GPS, como, por exemplo, a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos satélites GPS) (FORTES, 1997). O aproveitamento da infraestrutura implantada, inicialmente para fins geodésicos, na quantificação do IWV é uma prática que já vem sendo explorada em diversos países, como por exemplo nos EUA (BEVIS et al., 1992; DUAN et al., 1996; WARE et al., 1997; ROCKEN et al., 1997b), na Suécia (EMARDSON, 1998), no Japão (TSUDA et al., 1998), na Alemanha (REIGBER et al., 2001; MAREL 2001) e na Itália (PACIONE et al., 2001a), entre outros. Com as redes ativas de receptores GPS é possível obter de forma contínua, o monitoramento do IWV com alta resolução temporal, como a obtida com os radiômetros de microondas (MWR-Microwave Radiometer), porém com custos relativamente baixos, beneficiando as atividades desenvolvidas nas Ciências Atmosféricas.

¹ **Sinergismo:** do grego *Synergós*: que trabalha junto; Ação cooperativa de duas ou mais ciências, de modo que o efeito resultante é maior que a soma dos efeitos individuais destas.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

1.1 Delimitação do assunto

Atualmente, o contínuo monitoramento da distribuição temporal e espacial do vapor d'água atmosférico no Brasil não é totalmente adequado devido ao número reduzido de estações de coleta dessa informação. O número de estações de radiossondagem, principal técnica utilizada para medir a umidade atmosférica, é insuficiente para cobrir adequadamente todo o território brasileiro. Isso torna os benefícios da utilização das redes de receptores GPS na quantificação do IWV especialmente importantes no país. Esforços para a exploração de todas as fontes disponíveis para a obtenção desse importante elemento atmosférico devem ser realizados para que os efeitos desse problema sejam minimizados. No entanto, para a utilização dessa aplicação GPS no Brasil, alguns pontos mereceram especial atenção devido às características particulares do território brasileiro.

O primeiro se refere à modelagem adequada da temperatura média troposférica no Brasil. Esse tema é importante para minimizar os erros na conversão do atraso zenital troposférico (Z_{TD}) em valores do IWV, pois essa modelagem é a principal aproximação teórica presente nessa técnica (BEVIS et al., 1992).

O segundo trata da validação das estimativas do IWV obtidas a partir de receptores em bases terrestres no Brasil (daqui para frente denominado IWV-GPS), empregando dados provenientes de experimentos de comparação com outras técnicas, bem como de experimentos de intercomparação de radiossondas (SAPUCCI et al., 2005a) e de receptores GPS (MONICO et al., 2005). Nos primeiros experimentos realizados na região Sudeste do Brasil foram obtidos resultados similares aos encontrados na literatura (SAPUCCI, 2001a). No presente trabalho, os dados utilizados para validação do IWV-GPS foram coletados durante o experimento RACCI (*Radiation, Cloud, and Climate*

Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season) (IAG-USP, 2005). Os resultados obtidos trazem uma contribuição significativa ao tema, pois em tal circunstância essa técnica nunca foi avaliada. Associado a isso, o monitoramento do IWV nessa região tem grande importância, pois a alta concentração de umidade proveniente da evapotranspiração da floresta alimenta as nuvens convectivas que, com o escoamento horizontal, realizam um transporte de umidade para outras regiões, e a rede de instrumentos destinados a essa função é pouco densa.

O terceiro ponto considerado nesse trabalho consiste em investigar as potencialidades das estimativas do IWV-GPS no Brasil com ênfase no uso meteorológico desta informação, explorando, principalmente, sua alta resolução temporal. Especial importância é dada à determinação de uma metodologia para assimilação dos valores do IWV obtidos a partir dos dados da RBMC no modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). Nesse sentido, uma avaliação da qualidade das estimativas obtidas em tempo real é realizada.

Associado à PNT está um outro importante ponto a ser considerado, o qual se refere aos benefícios obtidos pela Geodésia nesse sinergismo com a Meteorologia. Trata-se das previsões dos valores do atraso zenital troposférico (Z_{TD}), geradas operacionalmente a partir da PNT, destinadas às aplicações do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que necessitem alta precisão em tempo real. O assunto é bastante atual, sendo que a IAG (*International Association of Geodesy*) estabeleceu um grupo de estudo específico para esse tema.

1.2 Objetivos

Os objetivos gerais deste trabalho são validar os valores do IWV obtidos a partir das observações GPS e investigar aspectos relacionados com a viabilização do uso das redes ativas de receptores em base terrestre, existentes atualmente e futuras, no monitoramento do IWV como suporte às atividades da Meteorologia e Climatologia no Brasil. Especificamente, os objetivos do trabalho podem ser mais bem descritos pelos seguintes tópicos:

- Desenvolver uma modelagem da temperatura média troposférica adequada para aplicações no território brasileiro utilizando informações meteorológicas de altitude;
- Validar a metodologia utilizada na obtenção das estimativas do IWV-GPS a partir de experimentos de comparação com outras técnicas na região Amazônica e de intercomparação tanto de receptores GPS como de radiossondas;
- Investigar as potencialidades dos valores IWV-GPS para a PNT e de sua alta resolução temporal para estudos da variabilidade do IWV no Brasil;
- Propor uma metodologia operacional para a assimilação dos valores do IWV-GPS em modelos de PNT no Brasil;
- Analisar a qualidade dos valores do IWV gerados em simulações de processamento em tempo real ao comparar com valores pós-processados, visando aplicações das redes ativas GPS em sistemas de assimilação de PNT;
- Avaliar a qualidade das previsões do atraso zenital troposférico geradas por PNT e destinadas às aplicações GNSS em tempo real, bem como apontar possíveis inovações e melhorias futuras nesse processo.

Ao atingir tais objetivos e através da sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia, duas grandes áreas da Geociência, espera-se:

- Investigar as potencialidades das estimativas do IWV-GPS para as atividades desenvolvidas nas Ciências Atmosféricas no Brasil;
- Dar subsídios à operacionalização da assimilação dos valores do IWV-GPS provenientes das redes ativas de monitoramento dos sinais GPS em modelos de PNT no Brasil;
- Mostrar os benefícios obtidos pela sociedade brasileira a partir da integração das ciências envolvidas no desenvolvimento do trabalho.

1.3 Conteúdo do trabalho

O presente trabalho é composto por 7 capítulos. No presente capítulo foram apresentados a contextualização e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo traz uma breve revisão bibliográfica a respeito dos principais conceitos envolvidos na estimativa do IWV a partir de receptores em bases terrestres e a situação atual do uso de redes ativas GPS na PNT em outros países. O terceiro capítulo trata da modelagem da temperatura média troposférica adequada para a obtenção dos valores IWV-GPS dentro do território brasileiro. No quarto capítulo são apresentados resultados de experimentos de comparação e intercomparação de técnicas utilizadas para a quantificação do IWV, visando validar os valores do IWV-GPS na região Amazônica. No quinto capítulo são investigadas as potencialidades dos valores do IWV-GPS para as Ciências Atmosféricas, com especial

atenção para assimilação em PNT ao apresentar os resultados dos primeiros testes realizados no Brasil. Nesse capítulo também é apresentada uma avaliação da qualidade das estimativas do IWV-GPS obtidas em experimentos que simularam processamento em tempo real, visando as aplicações na PNT. No sexto capítulo é apresentada uma avaliação da qualidade das previsões do atraso zenital troposférico geradas pela PNT. No sétimo

capítulo são apresentados os comentários finais, as conclusões e as recomendações de futuros trabalhos relacionados ao tema. No apêndice A encontram-se valores dos coeficientes do modelo espaço-temporal para a determinação da temperatura média troposférica a partir de valores medidos na superfície.

Desde os anos 70 do século passado, onde se intensificou a utilização das ondas de rádio para determinação de distâncias, diversas pesquisas foram realizadas com o objetivo de modelar a influência dos gases atmosféricos na propagação de sinais de radiofreqüência (SAASTAMOINEM, 1972; MARINI, 1972; THAYER, 1974). Nesses trabalhos procurava-se modelar a refratividade do ar a partir de valores de variáveis atmosféricas medidas na superfície. Tais modelos eram divididos em duas partes. Uma tratava a influência do vapor d'água, denominada componente úmida, e a outra a influência dos demais gases, denominada componente hidrostática. Esses modelos estavam baseados na correlação entre os valores medidos em diferentes altitudes na atmosfera com os medidos na superfície terrestre. Em Davis et al. (1985) foi apresentada uma modelagem bastante apurada para a componente hidrostática. Askne e Nordius (1987) desenvolveram uma modelagem da componente úmida apresentando uma relação entre o IWV e o atraso zenital gerado por essa componente nos sinais de radiointerferometria.

Ao utilizar o caminho teórico inverso àquele apresentado por Askne e Nordius (1987) e a modelagem da componente hidrostática apresentada por Davis et al. (1985), é possível obter uma estimativa do IWV, se conhecidos os valores do atraso zenital gerado pela troposfera. Esse processo foi apresentado por Bevis et al. (1992) em que estimativas do atraso zenital foram geradas a partir de observações GPS em bases terrestres, depois de minimizados os demais erros presentes nos sinais provenientes dos satélites da constelação GPS. Desde então, diversos trabalhos têm contribuído para a evolução dessa técnica, a

qual, atualmente, tem sido freqüentemente utilizada em diversos experimentos de avaliação da qualidade das medidas de umidade atmosférica (INGOLD et al., 2000; WOLFE e GUTMAN, 2000; REVERCOMB et al., 2003). Detalhes teóricos envolvidos nessa técnica são apresentados a seguir.

2.1 Estimativas do IWV a partir dos dados de receptores GPS em bases terrestres

A variação na refratividade atmosférica (N) causa mudanças na direção e principalmente diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas ao se propagarem na troposfera. Isso gera na trajetória dos sinais GPS uma leve curvatura, se comparada à trajetória geométrica entre um satélite no espaço e um receptor na superfície da Terra (SPILKER et al., 1994). A diferença entre o comprimento da trajetória efetivamente percorrida pelo sinal (S) e o comprimento da trajetória geométrica (S_g) é denominado atraso troposférico (D_{TROP}), dado por:

$$D_{TROP} = S - S_g = 10^{-6} \int N ds \,. \tag{1}$$

Para facilitar a modelagem das variações da refratividade, e, por conseqüência, o atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (DAVIS et al., 1985; NIELL, 1996, 2001 e 2003; BOEHM e SCHUH, 2004). Por intermédio delas, as variações da refratividade em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Desta forma, a refratividade atmosférica pode ser considerada como uma função da temperatura (T), da

densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Assim, tem-se (SPILKER et al., 1994):

$$Z_{TD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho \, dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh \,, \tag{2}$$

sendo Z_{TD} é o atraso zenital troposférico, $R_h = 287,0538 J kg^{-1} K^{-1}$ é a constante específica para os gases hidrostáticos, Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água, $k_1 = 77,60 K hPa^{-1}$, $k_2' = 22,10 K hPa^{-1}$ e $k_3 = 373900 K^2 hPa^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica cujos valores foram determinados experimentalmente (BEVIS et al., 1994).

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, o Z_{TD} é dividido em duas componentes: úmida (Z_{WD}), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (Z_{HD}), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera, podendo assim ser expresso pela equação:

$$Z_{TD} = Z_{HD} + Z_{WD} \quad . \tag{3}$$

A componente hidrostática é modelada pela primeira parcela da equação 2, enquanto a componente úmida é modelada pela segunda parcela dessa equação. Nota-se que o Z_{HD} depende apenas da densidade do ar atmosférico. Por isso, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão atmosférica realizadas na superfície (*Ps*) em hPa, da latitude do local (φ), e da altitude (h) em quilômetros. A expressão para a determinação do Z_{HD} é dada pela equação (DAVIS et al., 1985):

$$Z_{HD} = (2,27671422 x 10^{-3}) \frac{Ps}{(1 - 0,0026 \cos 2 \varphi - 0,00028h)}.$$
 (4)

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

As observáveis básicas GPS são a fase de batimento da onda portadora e a pseudodistância entre o satélite, no instante da transmissão do sinal, e a antena do receptor, no instante da recepção. Do ponto de vista do posicionamento geodésico, o atraso zenital troposférico é um dos fatores que influenciam essas observáveis, gerando erros (MONICO, 2000b). No entanto, para a aplicação GPS tratada neste trabalho, esse atraso no sinal é um parâmetro que traz consigo a concentração do vapor d'água atmosférico. Estimativas dos valores do Z_{TD} são obtidas ao aplicar uma estratégia que minimize os demais erros presentes nas observáveis GPS, como descrito em Sapucci (2001b). Assim, como indica a equação 3, ao tomar o valor do Z_{TD} obtido a partir das observações GPS e subtrair o valor do Z_{HD} , obtido a partir da pressão atmosférica medida na superfície e aplicada na equação 4, chega-se no valor do atraso zenital da componente úmida (Z_{WD}). Os valores do Z_{WD} são convertidos em valores do IWV usando uma constante de proporcionalidade (Ψ), tal que

(BEVIS et al., 1992):

$$IWV = Z_{WD} \Psi, \qquad (5)$$

sendo Ψ dada por:

$$\Psi = \frac{10^{6}}{R_{w} \left[k_{2}' + \frac{k_{3}}{Tm} \right]},$$
(6)

sendo $R_w = (461,5181) Jkg^{-1}K^{-1}$ a constante específica para o vapor d'água. O termo Tm é a temperatura média do perfil troposférico ponderada pela concentração do vapor d'água (DAVIS et al., 1985). Como a acurácia dos valores do IWV-GPS está em função da qualidade dos valores da Tm, a próxima seção aborda os aspectos mais relevantes na sua obtenção.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

2.2 Temperatura média troposférica

A temperatura média da coluna vertical troposférica ao longo da altitude (*h*) varia de acordo com o local e a época do ano, e é dada por (DAVIS et al., 1985):

$$Tm = \frac{\int \frac{e}{T} dh}{\int \frac{e}{T^2} dh},$$
(7)

sendo *e*, *T* e *h* os mesmos definidos na equação 2. Os valores da *Tm* podem ser determinados a partir da análise estatística de perfis de radiossondas aplicados na equação 7, e sua qualidade está relacionada com a quantidade e a distribuição dos perfis estudados. Para que essa aplicação GPS se torne independente das radiossondas, os valores da *Tm* são freqüentemente modelados a partir de medidas realizadas na superfície (BEVIS et al., 1992; ROSS e ROSENFELD, 1997; EMARDSON, 1998) ou empregando modelos de PNT (SCHUELER et al., 2001).

Essa modelagem é a maior aproximação existente na teoria envolvida na conversão dos valores do Z_{TD} em IWV, e um aspecto bastante relevante é conhecer o quanto a incerteza nos valores da *Tm* influencia os valores finais do IWV-GPS. Pela teoria de propagação de variância (WOLF e GHILANI, 1997) ao considerar as equações 5 e 6 chega-se à equação que fornece tal influência:

$$\sigma_{iwv}^{2} = \left[\frac{10^{6} Z_{WD} R_{w} K_{3}}{(R_{w} K_{3} + R_{w} K_{2}^{'} T_{m})^{2}}\right]^{2} \sigma_{Tm}^{2}, \qquad (8)$$

sendo σ_{iwv} o desvio padrão dos valores do IWV e σ_{Tm} o desvio padrão dos valores da Tm. Para regiões de médias latitudes, como a América do Norte e a Europa, onde os valores médios do Z_{WD} são em torno de 0,20 m e o valor médio da Tm é de 273 K, o σ_{Tm} de 4 K produz uma incerteza nos valores de IWV de 0,45 kg m⁻². Com o objetivo de minimizar essa influência nos valores do IWV-GPS, muitos trabalhos foram realizados para investigar modelos adequados tanto em escala local como global.

Através da análise estatística de 8.718 perfis de radiossondas lançadas em um intervalo de 2 anos, em 13 estações de lançamento de radiossondas nos Estados Unidos da América (EUA), entre as latitudes 27° a 65°, foi obtida uma regressão linear da *Tm* a partir da temperatura na superfície (*Ts*). O EMQ (Erro Médio Quadrático) de 4,74 K foi obtido, o que é um erro relativo menor do que 2%. O valor da *Tm* obtido pela aplicação desse modelo, no território dos EUA, pode induzir erros na determinação do IWV, a partir de valores do Z_{WD} menor do que 4%, no pior dos casos (BEVIS et al., 1992).

Para dados coletados na Europa, a aplicação da temperatura média (*Tm*), gerada pelo modelo apresentado por Bevis et al. (1992), na determinação de Ψ , a partir da equação 6, resultou em um EMQ maior do que o gerado para os dados dos EUA (EMARDSON, 1998). Tal resultado é causado pelas diferenças climáticas entre a Europa e os EUA. Esse fato destaca a importância de desenvolver modelos específicos para as regiões onde se deseja empregar as observações GPS na quantificação do IWV (EMARDSON, 1998). Assim, a partir de 128.649 perfis de radiossondas lançadas em 38 locais no continente europeu, durante o período de 1989 a 1997, foram desenvolvidos 4 modelos que relacionam os valores do IWV com os valores do Z_{WD} (EMARDSON, 1998). O valor do EMQ obtido nessa modelagem foi de 3,16 K.

Em escala global, alguns modelos têm sido desenvolvidos utilizando radiossondas lançadas operacionalmente. Um desses modelos está baseado em 23 anos de radiossondagens efetuadas em 53 estações distribuídas globalmente (ROSS e ROSENFELD, 1997) e destaca a importância de modelos regionalizados para o melhor desempenho da técnica. Um outro modelo foi desenvolvido utilizando dados de radiossondas lançadas em 138 locais distribuídos globalmente (MENDES et al., 2000). O modelo global obtido comparado com o modelo desenvolvido para a região da Europa (EMARDSON, 1998) apesar de ter fornecido o mesmo nível de precisão foi observado valores com diferentes tendências.

Uma outra modelagem da Tm, também global, mas utilizando perfis de temperatura preditos por modelos de PNT foi apresentada em Schueler et al. (2001). Esse trabalho apresentou uma análise global do erro na modelagem da Tm a partir das medidas de temperatura realizadas na superfície e a sua variação em função da altura da troposfera. Os modelos para a obtenção da Tm, aqui citados, viabilizaram a aplicação das observações GPS na quantificação do IWV em diversos países, como pode ser observado na próxima seção.

2.3 Situação atual da utilização das redes ativas para a quantificação do IWV-GPS

Diversos trabalhos mostraram a eficiência do GPS na quantificação do IWV ao comparar os valores obtidos com os gerados por outras técnicas, como radiossondas e radiômetros (BEVIS et al., 1992; EMARDSON, 1998; FALVEY et al., 1998; SHOJI et al., 1998; PACIONE et al., 2001a; BOCCOLARI et al., 2001; SAPUCCI 2001a, BOKOYE et

al., 2003). Com a densificação das redes de receptores GPS, essa técnica passou a apresentar grande potencialidade para a quantificação do vapor d'água atmosférico, com boas perspectivas para a Meteorologia e Climatologia. Diversos projetos envolvendo institutos ligados à área de Meteorologia e de Geodésia foram desenvolvidos em vários países.

Nos EUA diversas redes de receptores GPS em bases terrestres foram integradas em uma única, denominada SUOMINET (*Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education*) (WARE et al., 2000a, 2000b). O principal objetivo da SUOMINET é gerar e disponibilizar em tempo real produtos (atraso zenital troposférico, conteúdo total de elétrons (TEC), IWV etc.) obtidos a partir da coleta e do processamento dos dados dessa densa rede de receptores GPS. Atualmente, essa rede integra, não apenas estações GPS localizadas no território dos EUA, mas outras espalhadas por todo o globo. A rede SUOMINET, juntamente com a futura rede de receptores GPS em órbita da Terra, em fase de implantação dentro do projeto COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*) (ANTHES et al., 2000), integra um projeto maior e mais completo que é o denominado GENESIS (*GPS Environmental & Earth Science Information System*) que contém a maior base de dados GPS de receptores em terra, com uma grande variedade de aplicações (NASA, 2005a).

Na Europa, além de outros, dois projetos merecem destaque. O primeiro é o GASP (*GPS Atmosphere Sounding Project*) que foi responsável pela aplicação da densa rede de receptores GPS da Alemanha na PNT (REIGBER et al., 2001). E o outro é o denominado COST-716 (*European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research 716*) que foi responsável pela exploração das redes de receptores GPS em bases terrestres localizados em toda a Europa para Climatologia e previsão de tempo, envolvendo

instituições das áreas de Geodésia e de Meteorologia de 15 diferentes países (MAREL, 2001).

Um outro projeto bastante importante devido a grande densificação da rede envolvida é o que tem sido desenvolvido no Japão, denominado "GPS/MET JAPAN" (TSUDA et al., 1998). Esse projeto tem 3 principais objetivos: criar um sistema de informação da distribuição do IWV em 4 dimensões para previsão numérica de tempo; utilizar esse sistema de informação para minimizar o efeito da troposfera no posicionamento geodésico utilizando observações GNSS; e construir uma base de dados nacional contendo informações do IWV-GPS para uso interdisciplinar. Esse projeto conta com uma rede de quase 1000 estações espaçadas de 15 a 30 km, criada inicialmente para monitoramento de abalos sísmicos (NAITO et al., 1998).

A principal aplicação dos valores IWV-GPS obtidos com o emprego dessas redes de receptores de coleta contínua é a assimilação em modelos de PNT. Diversos experimentos de assimilação de valores do IWV-GPS em modelos de PNT têm sido realizados nos últimos anos, e seus resultados mostram melhoria na qualidade das previsões pluviométricas locais (ZOU et al., 1996; KUO et al., 1996; REIGBER et al., 2001; CUCURULL et al., 2001).

2.4 Previsão numérica de tempo e a assimilação dos valores do IWV

O princípio envolvido na PNT é bastante simples: conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t, se é conhecido o seu estado inicial no instante t_0 . No entanto, a complexidade dos modelos para a obtenção
das previsões é elevada e exige alta capacidade computacional (RICHARDSON, 1922). Apesar do grande desenvolvimento dessa técnica nos últimos anos, gerar resultados confiáveis ainda é um grande desafio científico.

O sucesso na previsão está relacionado à capacidade de modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e descrever com precisão o estado inicial. Para isso, utilizam-se as leis fundamentais da mecânica e da termodinâmica para o ar e a água presentes na atmosfera. Além disso, as especificidades do sistema climático devem ser consideradas, como a esfericidade da Terra, a influência dos raios solares, o papel do relevo, dos oceanos e da vegetação etc. Essa modelagem tão minuciosa gera um sistema extremamente complexo, que leva em consideração a interação de fenômenos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na atmosfera terrestre.

Tal modelagem pode ser traduzida em um sistema de equações que relacionam diversas grandezas meteorológicas, como pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, em diversos níveis da atmosfera, as quais têm forte correlação entre si, além de dependerem de outras variáveis. As suas derivadas com relação ao tempo *t* ou em relação às coordenadas geográficas compõem um sistema de derivadas parciais cuja complexidade impossibilita a obtenção de uma solução exata. Assim, a busca de uma boa aproximação dos valores da solução desse sistema é o único recurso disponível. A solução é obtida por processos numéricos que, apesar de serem muitos, têm como idéia básica discretizar as equações no espaço e no tempo em um número finito de células. Obtém-se, assim, um sistema com equações simplificadas em que o número de incógnitas, apesar de grande, é finito (CHARNEY et al., 1950). Isso permite que a solução possa ser obtida numericamente com o emprego dos supercomputadores.

Os modelos de PNT utilizados atualmente podem ser classificados pela área de abrangência da superfície modelada. Eles podem ser globais ou regionais. Os modelos globais, como o próprio nome diz, cobrem toda a superfície do globo, enquanto os modelos regionais têm uma melhor resolução espacial, abrangendo somente porções da superfície terrestre. Entre os diversos modelos globais pode-se destacar, pela sua sofisticação, o modelo do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) dos EUA e o do centro europeu (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF). Quanto aos modelos regionais destacam-se o modelo ETA (BLACK, 1994), desenvolvido pelo NCEP; o MM5 (*Mesoscale Model 5*) (UCAR, 2005), desenvolvido pela PSU (*Pennsylvania State University*) e pela NCAR/UCAR (*National Center for Atmospheric Research of University Corporation for Atmospheric Research*); e o modelo HIRLAM (*High-Resolution Limited Area Modeling*) (LYNCH et al., 2000), desenvolvido por institutos europeus de Meteorologia.

2.4.1 Assimilação dos valores do IWV em um modelo de PNT

O processo de assimilação em um modelo de PNT é dividido em dois subprocessos: análise objetiva e inicialização de dados. No primeiro, todos os dados adquiridos para uma dada época, proveniente de uma dada rede observacional de superfície e de altitude irregularmente espaçada, são verificados quanto a sua acurácia e convertidos para análises de campos meteorológicos em uma grade espacialmente regular, com níveispadrão de pressão, usando um adequado esquema de interpolação. Os dados depois desse processo contêm ainda ruídos que provavelmente podem ser interpretados como ondas de gravidade² espúrias quando tais dados são utilizados como dados iniciais. No processo de

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

 $^{^{2}}$ **Onda de gravidade:** é a onda que se forma e se propaga no interior de um fluído qualquer ou na interface entre dois fluídos. A força restauradora da perturbação é a gravidade, e a velocidade de propagação depende da profundidade do fluído e da densidade do mesmo.

inicialização, os dados provenientes do primeiro processo são modificados com o objetivo de minimizar o ruído das ondas de gravidade.

Diversas variáveis são freqüentemente assimiladas em um modelo de PNT com o objetivo de obter um estado inicial que melhor represente a realidade física da atmosfera. A assimilação do IWV em um modelo de PNT apresenta um benefício potencial que é corrigir a estrutura vertical do vapor d'água, e, por conseqüência, gerar um melhor estado inicial para o processo.

A metodologia utilizada na assimilação de dados em um modelo de PNT emprega freqüentemente a técnica de inicialização newtoniana (ANTHES, 1974). Segundo essa metodologia, para uma dada variável prognóstica (α), em uma posição *x* e na época *t*, a equação prognóstica do modelo é escrita como (KUO et al., 1993):

$$\frac{dp}{dt}\alpha(x,t) = F(x,t) + G p[\alpha^{obs}(x,t) - \alpha(x,t)], \qquad (9)$$

sendo *F* o termo forçante do modelo normal, α^{obs} é a análise do ponto da grade, *G* é o coeficiente de inicialização e *p* é definido como a diferença de pressão entre a superfície e o topo do modelo (100 hPa). O valor do coeficiente *G* para a assimilação de valores de umidade, freqüentemente utilizado, é de 3 x 10⁻⁴ s⁻¹ (GUO e KUO, 1998). O primeiro termo do lado direito dessa equação (*F*) denota o modelo dinâmico e físico. O segundo termo se refere ao incremento das observações multiplicado por um peso e depende da distância temporal e espacial entre o valor observado e os pontos da grade do modelo.

A variável (α) da equação 9 pode ser uma das prognósticas do modelo, tais como: componente zonal ou a meridional do vento, temperatura ou umidade específica. Porém, nessa equação não podem ser aplicados os valores do IWV diretamente para assimilação, pois essa variável não é uma das prognósticas. No entanto, os valores do IWV têm uma relação direta com o perfil de umidade específica. A idéia básica é fazer com que os valores do IWV inicializados tendam aos valores observados. Para isso, o perfil de umidade específica do modelo é modificado enquanto é mantida a estrutura vertical da umidade ao realizar o seguinte processo iterativo:

– Passo 1: Usa-se o perfil da umidade específica nos k-ésimos níveis do modelo, interpolados para a posição em que foi observado o valor do IWV_{obs} , como a primeira suposição da umidade específica observada ($q_{obs}^{(1)}(k)$);

- Passo 2: Calcula-se o valor do $IWV_{obs}^{(n)}$ da seguinte forma:

$$IWV_{obs}^{(n)} = \frac{p}{g} \sum_{k=1}^{K} q_{obs}^{(n)} \Delta \sigma(k) , \qquad (10)$$

sendo *n* o número das iterações efetuadas (inicialmente n = 1), *g* a aceleração da gravidade, *K* é o número total de camada do modelo, *p* a diferença de pressão entre a superfície e o topo do modelo e $\Delta \sigma(k)$ a espessura da *k-ésima* camada;

- Passo 3: Se

$$\left|\frac{IWV_{obs}}{IWV_{obs}^{(n)}} - 1\right| < 0,01,$$
(11)

o valor de $q_{obs}^{(n)}(k)$ é o valor da umidade específica observada e o processo iterativo finaliza. Caso contrário:

- Passo 4: calcula-se:

$$q_{obs}^{(n+1)}(k) = q_{obs}^{(n)}(k) \frac{IWV_{obs}}{IWV_{obs}^{(n)}}.$$
(12)

O processo acima pode ser utilizado para assimilar valores do IWV das mais variadas fontes, como satélites sondadores de umidade, MWR, fotômetro solar, entre outras. Por exemplo, em Ledvina e Pfaendtner (1995) foram apresentados resultados de um experimento onde valores do IWV provenientes de satélites foram assimilados em modelos de PNT utilizando esse processo. Para o caso específico da assimilação das informações do vapor d'água atmosférico a partir das observações GPS, além da assimilação do valor do IWV (KUO et al., 1993, 1996), é possível assimilar valores do atraso zenital troposférico (ZOU et al., 1995). Nesse caso, o mesmo processo descrito acima pode ser usado, substituindo apenas os valores do IWV pelos valores do Z_{TD} e a equação 10 pela equação 2, com valores da pressão parcial do valor d'água em função da umidade específica. Entre as duas opções, a assimilação dos valores do IWV é a mais recomendável, pois os valores se mantêm totalmente independentes do modelo. No entanto, para isso é necessário que sejam coletadas informações de temperatura e pressão durante a coleta de dados GPS e que se tenha à disposição um modelo adequado para os valores da Tm. Já a assimilação do Z_{TD} tem suas vantagens, pois não necessita da coleta de informações adicionais próximo à antena GPS. No entanto, a imprecisão nos valores de temperatura e pressão do modelo gera ruídos nos valores finais do IWV, resultando em perda de informação da umidade atmosférica. Em ambos os casos, é imprescindível que as estimativas do Z_{TD} sejam determinadas quase que em tempo real.

2.4.2 Determinação dos valores do atraso troposférico quase que em tempo real

Na estimativa do atraso zenital troposférico para conversão em valores do IWV o maior problema está relacionado com os erros nas efemérides (posição dos satélites) e nas correções dos relógios dos satélites GPS a serem utilizadas no processamento em tempo real (ROCKEN et al., 1997b). As opções para solucionar esse problema são basicamente duas. Na primeira opção, as posições dos satélites são preditas a partir do processamento dos dados GPS coletados por receptores pertencentes a redes de monitoramento contínuo. Essas efemérides são utilizadas no processamento em tempo real visando obter as estimativas do Z_{TD} , levando em consideração a época em que foram geradas, pois a qualidade de sua predição é degradada no tempo (ROCKEN et al., 1997b). A segunda opção é através da utilização das efemérides ultra-rápidas disponibilizadas pelos centros de análise GPS (IGS - *International GNSS Service*), as quais foram criadas especialmente para esse fim (NASA, 2005b). Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando avaliar a qualidade das órbitas ultra-rápidas e os resultados obtidos mostram que as elas possuem alta qualidade (REIGBER et al., 2001). Tais resultados tornaram a primeira opção citada acima inviável, sendo por isso pouco utilizada atualmente.

Um outro problema associado às estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real está relacionado às etapas de predição, filtragem e suavização do filtro de Kalman envolvido nesse processo. Essas etapas não são adequadamente executadas em toda a janela de dados utilizada no processo, o que gera um aumento da incerteza dos valores obtidos no início e no final da janela considerada. Enquanto no início esse aumento é devido ao processo de predição, no fim da janela é devido à execução precária do processo de suavização. Esse fato está intimamente ligado à latência das estimativas do atraso zenital troposférico, pois as estimativas mais precisas, em uma determinada época, só estarão disponíveis depois de um certo tempo. Esse tempo é necessário para que o processo de suavização seja executado suficientemente nessa época, aumentando a qualidade final das estimativas. Esse intervalo de tempo está associado com o tamanho da janela de dados utilizado no processamento. Assim, os valores do atraso podem ser estimados com uma latência de 1,5 h (MAREL, 2001), 1 h (REIGBER et al., 2001) e até 30 min ou menos (ROCKEN et al., 1997b), dependendo do tamanho da janela de dados utilizada e da precisão requerida. A determinação do tamanho da janela ideal é algo ainda que está sendo investigado (FOSTER et al., 2005), pois ela está associada com a eficiência do processo e a qualidade final das estimativas do IWV.

2.4.3 Situação atual da assimilação do IWV-GPS em modelos de PNT

Nos mais importantes centros de previsão de tempo, testes com a assimilação dos valores provenientes das observações GPS têm sido realizados nos últimos anos. O objetivo desses testes era verificar o potencial desse tipo de informação na PNT. O desenvolvimento de uma metodologia apropriada para a inclusão de valores do IWV em modelos de PNT de mesoescala (KOU et al., 1993) tornou possível a assimilação dessa informação proveniente das mais variadas fontes, como: satélites sondadores de umidade (SMITH, 1983); o Raman Lidar³ (MELFI et al., 1989); o radiômetro de microondas (HOGG et al., 1983); e valores do IWV-GPS (BEVIS et al., 1992), entre outras.

Com relação aos valores do IWV-GPS, experimentos que simulavam a assimilação em modelos de PNT foram realizados com a inclusão de valores tanto do IWV

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

³ O Raman Lidar é uma técnica altamente sofisticada capaz de gerar perfis de umidade com alta resolução vertical, bem como medir a taxa de concentração de aerossóis e conteúdo de água líquida. Informações adicionais disponíveis em <u>http://ramanlidar.gsfc.nasa.gov/instruments/scanning20raman20lidar/index.htm</u>.

(PACIONE et al., 2001b; REIGBER et al., 2001), como do Z_{TD} (HIGGINS, 1999; CUCURULL et al., 2001). Em outros trabalhos, valores do IWV-GPS foram utilizados para validar sistemas de PNT (YANG et al., 1999; CUCURULL et al., 2000).

Pacione et al. (2001b), utilizando uma rede de 6 estações GPS na Itália, mostraram que estimativas do IWV-GPS assimiladas no modelo MM5 geraram localmente a mesma influência das medidas de umidade das radiossondas. Um impacto positivo na previsão foi observado com a inclusão dessas estimativas, especialmente se medidas de vento e temperatura fossem assimiladas também.

Reigber et al. (2001), usando uma rede de aproximadamente 50 estações na Alemanha, apresentaram uma metodologia em que um primeiro processamento, efemérides dos satélites foram produzidas e, em um segundo, as estimativas do Z_{TD} foram geradas. Os valores do Z_{TD} foram convertidos em IWV-GPS utilizando valores de temperatura e pressão provenientes de uma rede de estações meteorológicas de superfície. Os valores do IWV-GPS foram utilizados para montar um perfil de umidade específica seguindo a estrutura vertical da umidade do modelo. Esses perfis foram tratados no processo de assimilação como um perfil de radiossonda. A contribuição da assimilação desses valores na análise do modelo foi positiva nos campos de precipitação com chuvas severas (TOMASSINI et al., 2002).

Para as estações GPS onde não são disponibilizados valores de temperatura e pressão próximos às antenas, uma alternativa prática para ser empregada na PNT foi a assimilação dos valores do Z_{TD} (HIGGINS, 1999). Apesar de não ser a condição ideal, pois as informações da umidade nesse caso ficam fortemente dependentes dos valores do modelo, os resultados na assimilação sinalizam para uma contribuição positiva. Cucurull et al. (2001), utilizando essa técnica ao empregar 5 estações GPS localizadas na região Nordeste da Espanha, apresentaram os resultados da assimilação no modelo MM5 em um

processo denominado 4-var, no qual também a variação temporal dos valores do Z_{TD} foi considerada. Os resultados mostraram uma contribuição positiva na previsão regional da precipitação.

As estimativas do IWV-GPS, além de serem testadas na assimilação, podem contribuir com a PNT ao validar os modelos numéricos utilizados. O modelo HIRLAM (LYNCH et al., 2000), utilizado operacionalmente em diversos centros de previsão de tempo na Europa, foi validado ao empregar estimativas do IWV-GPS obtidas a partir de redes de estações GPS (YANG et al., 1999; CUCURULL et al., 2000). Esses estudos mostraram que, com a boa resolução temporal de tais estimativas, estas são capazes de detectar flutuações de baixa escala e, portanto, ótimas para avaliar modelos de PNT de alta resolução espacial.

A obtenção das estimativas IWV-GPS quase em tempo real permitiu a inclusão operacional delas em modelos de PNT (ROCKEN et al., 1997b). O IGS (NASA, 2005b) passou a disponibilizar operacionalmente as efemérides ultra-rápidas. Nesse contexto, Ware et al. (2000a, 2000b) mostraram os benefícios da rede SUOMINET, integrada em um sistema de distribuição de dados denominado IDD (*Internet Data Distribution*), para o monitoramento do vapor d'água atmosférico em especial para a PNT. Pesquisadores do Centro de Previsão da FSL-NOAA (*Forestcast System Laboratory-National Oceanic & Atmospheric Administration*), utilizando algumas estações no território dos EUA, evidenciaram os benefícios da assimilação dos valores do IWV-GPS na PNT (SMITH et al., 2000). Nesse experimento foi utilizado um sistema de assimilação 4D-var ao incluir um método de interpolação ótima multivariacional denominado RUC (*Rapid Update Cycle*) (BENJAMIN et al., 1994). Com esse método, *análise* e previsão foram geradas a cada 3 horas. Com os valores do IWV-GPS foram obtidos campos de correções dos valores do IWV do modelo, os quais foram distribuídos verticalmente de acordo com a sua estrutura

vertical da umidade. Os resultados obtidos mostraram um evidente impacto positivo na previsão de curto prazo, tanto dos campos do IWV, quanto da precipitação.

Estudos envolvendo estimativas das efemérides dos satélites GPS e valores do Z_{TD} quase em tempo real foram feitos empregando estações GPS na Europa para mostrar o potencial desse sistema na previsão meteorológica (BAKER et al., 2001). Nesse trabalho a assimilação de valores do IWV-GPS no modelo de PNT do UKMO (*United Kingdom Meteorological Office*) produziu um impacto positivo nos valores de umidade nos baixos níveis do perfil atmosférico. O trabalho de Jupp (2003) apresentou os resultados positivos da assimilação dos valores do Z_{TD} , provenientes das estações do projeto COST 716, no modelo de mesoescala do UKMO.

Nos últimos anos na Europa, com o projeto denominado TOUGH (*Targeting Optimal Use of GPS Humidity Measurements in Meteorology*) (HUANG et al., 2003), onde estão envolvidos 15 institutos europeus de Geodésia e Meteorologia, esforços têm sido feitos para otimizar o uso das estações GPS em bases terrestres para a PNT. Uma contribuição significativa desse projeto é a obtenção de uma rede densa de informações de precipitação sobre o continente europeu, capaz de gerar campos mais realísticos dessa variável. A ausência de tais campos é um dos grandes obstáculos para a avaliação correta da assimilação de valores de umidade em modelos de PNT (VEDEL e HUANG, 2003).

No Japão, estudos têm evidenciado os beneficios que a densa rede de receptores GPS, denominada GEONET (*GPS Earth Observation Network*), pode proporcionar para a PNT (NAITO et al., 1998). Outros pesquisadores têm utilizado essa rede para avaliar modelos de PNT (IWABUCHI et al., 2000) e outros ainda para a assimilação operacional em modelo de PNT (TSUDA et al., 1998).

Como pode ser verificado na metodologia empregada para a assimilação dos valores do IWV-GPS, a forma do perfil de umidade do modelo é preservada, pois nesses

valores não é fornecida nenhuma informação da distribuição vertical do vapor d'água. Uma outra modalidade na determinação do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres tem sido desenvolvida para fornecer informação na distribuição vertical dessa variável. Trata-se da determinação do Z_{TD} na direção inclinada (SIWV- *Slant Integrated Water Vapor*) (WARE et al., 1997; BRAUN et al., 2000). Com o emprego de uma rede bastante densa de receptores (espaçadas de 20 a 50 km) e radiossondagens esporádicas, é possível gerar campos tridimensionais da distribuição do vapor d'água (MACDONALD e XIE, 2000). Apesar dessa modalidade não ser tratada no presente trabalho, as estimativas do IWV na direção inclinada poderão ser exploradas em trabalhos futuros a partir dos resultados apresentados aqui, como, por exemplo, a metodologia utilizada na modelagem da temperatura média troposférica.

Para que a aplicação das redes de receptores GPS na quantificação do IWV no Brasil seja devidamente explorada, é importante que se tenha à disposição um modelo para a determinação da Tm adequado para as diversas regiões do país. Como a concentração de umidade e o valor da *Tm* são mais elevados nas regiões equatoriais do que nas regiões temperadas, a influência da incerteza da Tm nos valores finais também é maior. Nas regiões equatoriais, onde a maior parte do território brasileiro está localizada, uma incerteza nos valores da *Tm* de 4 K aplicada na equação 8 gera uma incerteza de 0,66 kg m⁻², considerando um valor médio do Z_{WD} de 0,30 m e um valor médio da Tm de 287,8 K. Essa influência é 30% maior que a gerada nas regiões de média latitude, que é de 0,45 kg m⁻², como discutido na seção 2.2. Os resultados dos primeiros experimentos de avaliação do IWV-GPS no Brasil já mostravam a importância desse fato (SAPUCCI, 2001b). Nesse capítulo é apresentada a modelagem da Tm obtida ao utilizar um banco de dados históricos de radiossondas lançadas pela Força Aérea Brasileira no período de 1/2/1961 a 25/5/1993. Normalmente, os valores da Tm são modelados apenas a partir dos valores da temperatura medidos na superfície (BEVIS et al., 1992) com o acréscimo de alguns parâmetros de tempo (EMARDSON, 1998). Pretende-se aqui investigar a possibilidade de outras variáveis medidas na superfície contribuírem na modelagem da Tm. Para isso foi utilizada análise fatorial por componentes principais (JOHNSON e WICHERN, 1992) e para a determinação do modelo foi utilizado o método de regressão múltipla.

3.1 Dados disponíveis para a modelagem

O banco de dados pertencente ao Destacamento de Proteção ao Vôo da Força Aérea Brasileira (DPV-FAB) contém um número total de 89.614 radiossondas lançadas em 12 estações de radiossondagem localizadas em aeroportos de algumas cidades brasileiras. A figura 1 mostra a distribuição espacial das estações de radiossondagens utilizadas e na tabela 1 são apresentadas informações adicionais dessas estações, como coordenadas geográficas, número de radiossondas e o período em que os lançamentos foram realizados. Na figura 1 as estações são agrupadas por regiões climáticas e o número total de radiossondas utilizadas em cada região (n) é também apresentado. As datas apresentadas na tabela 1 mostram que o conjunto de dados considerados é apropriado para modelagem, pois o período total de 32 anos torna o conjunto bastante representativo da variabilidade temporal dos valores da *Tm* no Brasil.



Figura 1 - Localização das estações de lançamento das radiossondas utilizadas na modelagem da *Tm* com destaque para as diferentes regiões climáticas consideradas.

Para cada radiossonda considerada foi calculado o valor da Tm aplicando a equação 7 em uma integração numérica dos valores do perfil vertical. Valores medidos pelas radiossondas no primeiro nível dos perfis atmosféricos (medidos na superfície) foram utilizados na modelagem. As variáveis consideradas foram temperatura (Ts), pressão (Ps), umidade relativa (UR), componentes zonal do vento (u) e componente meridional do vento (v).

Cidade – UF	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Número de identificação	Número de lançamentos	Início do período	Término do período
Alta Floresta-MT	-56,1	-9,87	288	82965	771	3/6/1987	5/9/1991
Belém-PA	-48,48	-1,38	14	82193	5952	2/8/1968	31/12/1991
Brasília-DF	-47,93	-15,87	1061	83378	10780	12/5/1966	31/12/1991
Campo Grande-MS	-54,67	-20,47	599	83612	5311	28/10/1966	15/4/1980
Curitiba-PR	-49,17	-25,52	910	83840	10835	13/10/1965	9/12/1990
Fernando de Noronha-FN	-32,42	-3,85	45	82400	2732	16/6/1974	27/10/1990
Rio de Janeiro-RJ	-43,25	-22,82	42	83746	13613	1/2/1961	31/8/1990
Manaus-AM	-59,98	-3,15	83	82332	7577	12/6/1967	25/5/1993
Natal-RN	-35,25	-5,92	42	82599	5426	18/1/1967	27/12/1990
Porto Alegre-RS	-51,18	-30,00	40	83971	13230	8/1/1963	17/8/1991
São Paulo-SP	-46,65	-23,62	802	83780	10351	11/5/1970	29/10/1991
Vilhena-RO	-60,10	-12,70	595	83208	3036	27/3/1967	31/3/1993
Total				12 estações	89614	1/2/1961	25/5/1993

Tabela 1 – Informações sobre as estações de lançamento das radiossondas utilizadas e sobre o período em que os lançamentos foram realizados

3.2 Análise fatorial da variabilidade dos dados

A análise fatorial parte do princípio que, dentro de um conjunto de dados, as variáveis a eles relacionadas podem ser agrupadas pelas suas correlações em grupos denominados fatores (JOHNSON e WICHERN, 1992). Todas as variáveis dentro de cada um dos fatores são correlacionadas entre si, mas com correlação relativamente pequena com as

variáveis presentes nos outros fatores. Com isso, a análise fatorial permite, quando possível, descrever a relação entre um conjunto de variáveis, em termos de um número pequeno de fatores, proporcionando a redução dos dados com a mínima perda de informação e facilitando a interpretação das informações contidas nesse conjunto (análise exploratória).

O primeiro passo na análise fatorial é a escolha das variáveis adequadas aos objetivos que se deseja atingir. A inclusão de variáveis não apropriadas pode gerar flutuações da variância prejudicando a interpretação das informações contidas nos fatores. Como o objetivo dessa análise é definir as variáveis medidas na superfície mais relevantes para a modelagem da Tm, as variáveis relacionadas à posição e ao tempo não foram incluídas. Dessa forma, as variáveis que participaram nessa análise foram: pressão atmosférica (Ps), temperatura (Ts), umidade relativa (UR), componente zonal (u) e meridional (v) do vento (todas essas variáveis medidas na superfície) e temperatura média troposférica (Tm) calculada.

A análise fatorial realizada foi por componentes principais a partir da seguinte matriz de correlação:

Ps	1,0000					7
Ts	0,3568	1,0000				
UR	0,0833	-0,2736	1,0000			
u	0,0253	-0,0856	0,1112	1,0000		
v	0,1932	0,0482	0,0659	-0,0925	1,0000	
Тm	0,3938	0,7660	-0,2008	-0,1361	0,0261	1,0000

O software utilizado nessa análise foi o Minitab (MINITAB, 2005). Na tabela 2 são apresentados os pesos das variáveis nos 4 fatores resultantes da aplicação de uma rotação

varimax⁴. Também são apresentadas nessa tabela as respectivas variâncias e a porcentagem da variabilidade do conjunto explicada por cada um dos fatores.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Ps	0,664	-0,376	-0,292	0,129
Ts	0,888	0,240	0,014	-0,047
UR	-0,149	-0,937	-0,002	0,032
и	-0,057	-0,039	0,055	0,989
V	0,024	-0,011	-0,980	-0,060
Tm	0,908	0,130	0,050	-0,116
Variância	2,082	1,096	1,051	1,016
% Variância	34,7	18,3	17,5	16,9

Tabela 2 - Valores dos pesos dos 4 primeiros fatores gerados por análise fatorial depois de uma rotação varimax

Os 4 fatores explicam 87,4% da variabilidade total do conjunto, o que mostra que o número utilizado pode ser considerado adequado para a análise pretendida. Os pesos de cada uma das variáveis nos fatores, apresentados na tabela 2, mostram que elas podem ser divididas em 4 grupos de correlação. O primeiro grupo, indicado pelo fator um, é formado pela temperatura e pressão na superfície e pela temperatura média troposférica, o qual explica 34,7% das flutuações da variância total do conjunto. A umidade relativa, a componente meridional e zonal do vento formam, individualmente, os 3 outros grupos como indicam os fatores 2, 3 e 4, respectivamente. Os valores dos pesos que orientaram tais afirmações são apresentados em negrito na tabela 2. O agrupamento obtido pela análise dos fatores revela, de forma clara, que, além da temperatura na superfície, os valores de pressão podem contribuir na modelagem pretendida. Por outro lado, essa análise indica que os valores das demais

⁴ Uma rotação varimax é uma transformação ortogonal aplicada na matriz dos pesos dos fatores que maximiza a somatória das variâncias e mantém inalterada as matrizes de covariância e dos resíduos. O objetivo desse procedimento é facilitar a interpretação das características reveladas pelos pesos dos fatores.

variáveis não contribuem significativamente para a obtenção dos valores da *Tm* a partir de medidas realizadas na superfície.

Como os dados utilizados foram coletados em diferentes regiões do Brasil, com características climáticas adversas, se for considerada a sua regionalização, agrupamentos diferentes poderão ser obtidos. Por isso, o conjunto total das radiossondas foi dividido em 5 subconjuntos, um para cada região climática, tendo como critério o local de lançamento. As radiossondas lançadas em Porto Alegre e Curitiba formaram a denominada região Sul, com uma climatologia bastante influenciada pelos sistemas de ar frio provenientes de latitudes médias. As radiossondas lançadas em São Paulo e Rio de Janeiro foram agrupadas representando a região Subtropical Oceânica, enquanto as radiossondas lançadas em Brasília e Campo Grande formaram o conjunto representando a região Subtropical Continental. As lançadas em Natal e Fernando de Noronha foram agrupadas para representar a região Nordeste e a região Amazônica foi formada pelas radiossondas lançadas em Manaus, Belém, Alta Floresta e Vilhena. Na figura 1, um diagrama de cores ilustra as diferentes regiões climáticas consideradas.

Uma análise de componente fatorial, similar à anteriormente apresentada, foi realizada para tais regiões climáticas. Quatro fatores foram gerados com uma rotação varimax. Na tabela 3 são apresentados os valores dos pesos das variáveis dos dois primeiros fatores e as respectivas variâncias e porcentagens explicadas por cada um deles. Nessa tabela também é apresentado o número (n) das radiossondas consideradas em cada uma das regiões climáticas.

Os valores dos pesos das variáveis nos fatores apresentados na tabela 3 mostram que, dependendo da região considerada, os valores de umidade relativa medidos na superfície podem trazer contribuição à modelagem pretendida. Isso é observado nos fatores gerados com os dados provenientes da região Sul, Subtropical Continental e também da região Nordeste. No caso da região Sul e Subtropical Continental os valores de umidade estão provavelmente relacionados com as passagens das massas de ar frio, que nessa região são bastante intensas e fazem com que o perfil de temperatura se modifique consideravelmente. A região Nordeste é influenciada pela umidade proveniente do oceano Atlântico, dada a maritimidade da região onde as estações de Fernando de Noronha e Natal se encontram, e, portanto, a umidade relativa deve conter um sinal dessa influência. Já nas regiões Amazônica e Subtropical Oceânica tal influência é menos freqüente, sendo o valor da pressão na superfície a variável de segunda ordem. A pressão é uma variável associada à altura da estação tendo um importante impacto no valor da *Tm*. Esses resultados foram utilizados para elaborar modelos da temperatura média troposférica específicos para cada uma dessas regiões.

Variáveis	Sul (n=20.464)		Sul Subtropical Subtropical Continental (n=20.464) Subtropical Continental (n=19.710) (n=12.445)		ropical inental 2.445)	Nordeste (n=7.360)		Amazônica (n=12.015)		
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
Ps	0,118	0,967	0,826	-0,304	0,143	0,019	0,045	-0,025	0,867	0,185
Ts	0,927	0,094	0,839	0,353	0,874	-0,218	-0,784	0,345	0,861	-0,334
UR	-0,554	-0,372	-0,132	-0,944	-0,608	-0,576	0,772	-0,419	-0,185	0,954
Zv	-0,076	-0,007	0,041	0,003	0,121	-0,914	0,200	-0,932	-0,158	0,080
Mv	-0,104	0,048	-0,067	-0,082	-0,111	0,037	0,015	-0,08	0,041	-0,007
Tm	0,870	0,035	0,861	0,252	0,796	0,092	-0,871	-0,041	0,758	-0,282
Var	1,775	1,107	1,775	1,108	1,816	1,225	2,013	1,172	2,128	1,142
% Var	29,6	18,5	29,6	18,5	30,3	20,4	33,6	19,5	35,5	19,0

Tabela 3 - Valores dos pesos das variáveis nos dois primeiros fatores gerados por análise fatorial e uma rotação varimax para as diferentes regiões climáticas

3.3 Modelagem da Tm utilizando regressão múltipla

A técnica de regressão múltipla é uma ferramenta estatística destinada a predizer valores de uma variável resposta (dependente) a partir dos valores de um conjunto de variáveis explicativas (independentes). Essa técnica permite conhecer os efeitos de uma

possível variável de predição na variável resposta a ser modelada. No caso da modelagem da temperatura média troposférica a partir dos valores das variáveis medidas na superfície, a utilização dessa técnica pode, além de gerar um modelo, confirmar os resultados obtidos pela aplicação das componentes principais quanto às variáveis que são mais significativas.

Um modelo de regressão linear clássico está baseado na suposição de que uma variável resposta *Y* é composta de um valor médio, o qual depende de maneira contínua de *r* outras variáveis denominadas variáveis de predição z_1 , z_2 ,..., z_r e de um erro aleatório ε . Tal erro é composto pelos erros presentes nos valores das variáveis utilizadas, bem como dos efeitos de outras variáveis não explicitamente consideradas no modelo. Especificamente, um modelo de regressão linear para uma variável resposta pode ser expresso pela equação (JOHNSON e WICHERN, 1992):

$$Y = f(z_1, z_1, ..., z_r) = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + ... + \beta_r z_r + \varepsilon,$$
(13)

sendo que o termo linear refere-se ao fato de que o valor médio da variável resposta é um função linear de parâmetros desconhecidos $\beta_0, \beta_1, \beta_2, ..., \beta_r$. O que se pretende é determinar os valores desses parâmetros, o que pode ser feito aplicando um método que minimize o somatório dos quadrados dos resíduos, isto é, o método dos mínimos quadrados.

A qualidade do modelo obtido pode ser medida pelo chamado coeficiente de determinação (R^2). O valor do R^2 é obtido pela razão entre a variância do modelo e a variância total da amostra. Tal valor é um indicador da proporção da variação total da variável resposta explicada pelas variáveis de predição utilizadas nesse modelo. Esse coeficiente pode ser expresso pela seguinte equação:

$$R^{2} = \frac{\operatorname{var} f(z_{1}, z_{2}, ..., z_{r})}{\operatorname{var} Y} = \frac{\operatorname{var} Tm_{mol}}{\operatorname{var} Tm_{obs}} = \frac{\sum (Tm_{mol} - \overline{T}m_{mol})^{2}}{\sum (Tm_{obs} - \overline{T}m_{obs})^{2}},$$
(14)

sendo Tm_{obs} os valores da Tm calculados a partir dos perfis das radiossondas e Tm_{mol} valores obtidos pela aplicação do modelo proposto. Se o valor de R^2 é próximo a 1 (ou 100%) indica que o modelo é altamente eficaz. Por outro lado, o valor de R^2 é próximo de zero se $\beta_0 = 0, \beta_1 = 0,..., \beta_r = 0$, e nesse caso, as variáveis de predição $z_1, z_2,...,z_r$ não têm nenhuma influência na variável resposta.

A técnica foi aplicada (*software* Minitab) tomando *Tm* como a variável resposta e as variáveis medidas na superfície como as variáveis explicativas. As possíveis combinações das variáveis medidas na superfície foram testadas para avaliar quais as variáveis mais eficientes nessa modelagem e se algumas das combinações produziam benefício. Os resultados gerados são apresentados na tabela 4.

Regressão Linear	R^2
$Tm = 109,558 + 0,596 \ Ts$	64,5%
Tm = 251,646 + 0,0344 Ps	18,2%
$Tm = 288,889 - 0,0502 \ UR$	3,4%
Tm = 284,702 - 0,146 Zv	1,8%
Tm = 284,949 - 0,0325 Mv	0,1%
Tm = 284,702 - 0,016 Mz - 0,145 Zv	1,9%
$Tm = 107,833 + 0,600 \ Ts + 0,00606 \ UR$	64,5%
$Tm = 254,679 + 0,0364 \ Ps - 0,0633 \ UR$	23,5%
$Tm = 110,578 + 0,558 \ Ts + 0,0105 \ Ps$	65,9%
Tm = 111,136 + 0,556 Ts + 0,0107 Ps - 0,00192 UR	65,9%

Tabela 4 - Regressões lineares dos valores da Tm envolvendo combinações das variáveis medidas na superfície e respectivos R^2

Nos valores do R^2 apresentados na tabela 4, observa-se que as variáveis relacionadas com o vento (componentes zonal e meridional) não apresentam benefícios à modelagem da *Tm*, mesmo quando as duas variáveis estão presentes simultaneamente. Esse resultado mostra que os campos de vento na superfície estão relacionados com os campos de mesoescala. Se esses campos representassem os de grande escala, tais resultados seriam diferentes, pois esses estão associados ao fluxo de umidade na atmosfera, o qual tem um fator de impacto nos valores da *Tm*. Os resultados obtidos com relação à pressão são coerentes, pois quanto maior a pressão, mais profunda é a camada atmosférica com contribuição da parte mais quente e, portanto, maior o valor da *Tm*.

Entre as regressões com apenas uma variável de predição testadas, a variável Ts é a que apresentou o melhor resultado (R^2 de 64,5%), seguido pela variável Ps (R^2 de 18,2%). A regressão que envolveu as variáveis Ts e Ps foi a que gerou o maior R^2 , sendo esse o modelo mais adequado. Portanto, no modelo resultante desse processo os valores da Tm são dados pela equação:

$$Tm = 0,558Ts + 0,0105Ps + 110,578.$$
⁽¹⁵⁾

Por propagação de covariância verifica-se que incertezas de 0,5 K nos valores de Ts e de 0,5 hPa nos valores de Ps acarretam uma incerteza de 0,279 K nos valores de Tm ao utilizar a equação 15. Como o modelo acima apresentado foi obtido ao utilizar todas as radiossondas, ele pode ser aplicado em qualquer local do território brasileiro, sendo por isso denominado aqui por Modelo Brasileiro da Tm. Esse modelo está coerente com os indicativos dados pela análise fatorial apresentada na seção anterior, os quais mostraram que os valores de temperatura e pressão estão mais correlacionados com os valores da Tm do que as demais variáveis. Como o acréscimo da variável umidade relativa (UR) nesse modelo não trouxe nenhuma contribuição (ver tabela 4) ela não foi considerada, pois o benefício resultante não justifica a utilização dessa variável.

Aplicando a técnica da regressão múltipla nos subconjuntos das radiossondas lançadas nas diferentes regiões climáticas foram gerados modelos específicos para cada uma

dessas regiões. Porém, as variáveis de predição dos valores da *Tm* nesse caso não foram testadas, mais sim escolhidas de acordo com os resultados obtidos na análise fatorial. A equação geral de tais modelos pode ser explicitada da seguinte forma:

$$Tm = a \cdot Ts + b \cdot Ps + c \cdot UR + d, \qquad (16)$$

sendo os valores dos coeficientes a, b, c e d, para cada uma das regiões climáticas, apresentados na tabela 5, bem como os respectivos valores do coeficiente de determinação. Os valores nulos apresentados nessa tabela indicam que a variável multiplicadora do respectivo coeficiente não participa da regressão.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes da regressão linear dada pela equação 16, do coeficiente de determinação e variância para as diferentes regiões climáticas consideradas

Região Climática	Número de	С	oeficientes da	a equação 16		varTm _{obs}	
Regiuo eminarioa	radiossondas	а	b	С	d	ven 11100s	
Sul	24.065	0,61390	0	0,020243	102,815	26,64	59,0%
Subtropical Oceânica	23.964	0,55843	0,012718	0	108,149	18,04	60,2%
Subtropical Continental	16.091	0,44330	0	-0,032011	155,717	10,96	42,4%
Nordeste	8.158	0,36278	0	-0,050706	183,95	2,94	4,6%
Amazônica	17.336	0,52286	0,004765	0	126,612	6,05	35,6%

Os valores do coeficiente de determinação apresentados na tabela 5 indicam que nos modelos das regiões Sul e Subtropical Oceânica as porcentagens da variabilidade total da Tmsão similares (R^2 de 59,0% e 60,2%, respectivamente) e maiores do que a dos modelos das demais regiões. No entanto, não são nessas regiões que os modelos geram os melhores resultados, pois na análise dos valores do coeficiente de determinação deve-se considerar a variância total dos valores de Tm calculados a partir das radiossondas ($varTm_{obs}$). Comparando tais valores (tabela 5), observa-se que nas regiões mais ao sul apesar de apresentarem coeficientes de determinação elevados a variabilidade da Tm é alta. Nota-se que na região Sul a variância é de 26,6 K², o que pode ser traduzido em um desvio padrão maior que 5 K. Por outro lado, nas regiões próximas do equador apesar do coeficiente de determinação ser baixo, a modelagem da Tm, a partir de valores na superfície, é mais eficiente pois a variância da Tm é bastante reduzida. Esse fator é significante na região Nordeste onde o coeficiente de determinação foi de apenas 4,6%, mas como a variância total é de apenas 2,9

 K^2 (desvio padrão de 1,7 K) nessa região os melhores resultados são esperados.

Na elaboração dos modelos apresentados, o fato de não ter sido considerada a variabilidade temporal da *Tm* deve ser salientado. Como a sazonalidade é mais acentuada nas regiões tropicais e subtropicais do que nas equatoriais, os valores da *Tm* para as regiões próximas ao equador apresentam uma menor oscilação sazonal do que as regiões brasileiras de maior latitude. Isso pode ser observado na figura 2, onde valores da *Tm* são plotados em função do dia do ano para as radiossondas lançadas em Porto Alegre-RS e Natal-RN. Dentre as estações de radiossondagem consideradas, esses locais são os mais próximos dos extremos do território brasileiro no sentido meridional. Os valores da *Tm* em Porto Alegre (figura 2a) apresentam uma variação sazonal e com maior dispersão durante o inverno do que o observado em Natal (figura 2b). Tais resultados reforçam a importância de se considerar a variabilidade temporal dos valores da *Tm*. Para isso, um modelo numérico da *Tm* é apresentado, o qual considera simultaneamente a variação temporal e espacial dessa variável.



Figura 2 - Valores da temperatura média troposférica em função do dia do ano para as radiossondas lançadas em (a) Porto Alegre-RS e (b) Natal-RN.

3.4 Modelagem espaço-temporal da Tm

Para considerar a variação temporal e espacial dos valores da Tm, o conjunto das radiossondas foi dividido em subconjuntos, tendo como critérios os locais de lançamento e o mês do ano. Os coeficientes da equação 16 foram obtidos para cada um desses subconjuntos. Nesse processo foi aplicada uma técnica de ajustamento das observações pelo método paramétrico baseada nos mínimos quadrados. Foram empregados os valores de temperatura (*Ts*), pressão (*Ps*) e umidade relativa (*UR*) medidos na superfície e os valores de temperatura média troposférica (*Tm*). Além do modelo representado pela equação 16, modelos polinomiais de segunda e terceira ordens foram testados nesse processo. Os resíduos resultantes indicaram que os modelos lineares são mais apropriados, pois os modelos de ordem maior apresentaram resíduos muito elevados. No final desse processo, valores dos coeficientes *a*, *b*, *c* e *d* da equação 16 foram gerados para cada estação de lançamento e para cada mês do ano, os quais são apresentados no Apêndice A. Para ilustrar o comportamento dos coeficientes para todos os meses do ano para Curitiba-PR.



Figura 3 - Valores dos coeficientes da equação 16 em função dos meses do ano para Curitiba-PR.

Na modelagem espaço-temporal da *Tm* propõe-se que os coeficientes da equação 16 devam ser obtidos para uma determinada localização e época do ano por interpolação espacial das coordenadas das estações de lançamento das radiossondas e interpolação temporal dos valores dos coeficientes (apresentados no Apêndice A). Há diversos métodos de interpolação que podem ser utilizados para isso. Com relação à interpolação espacial, um método que merece destaque é o chamado de krigagem (KRIGE, 1951; CAMARGO, 1997), o qual envolve geoestatística (VICENTE, 2004). Para a interpolação temporal, o método que emprega *spline* cúbica (GREEN e SILVERMAN, 1994) mostra-se bastante apropriado. Esses métodos não serão avaliados aqui para não desviar o foco principal do trabalho, mas tais avaliações poderão ser feitas no futuro, em trabalhos posteriores a esse.

3.5 Avaliação da qualidade da modelagem obtida

A avaliação dos modelos apresentados aqui é feita empregando os próprios dados utilizados na modelagem. Essa avaliação é realizada em termos de tendência e dispersão, bem como da medida resultante das duas: acurácia. A medida de tendência utilizada foi o erro médio (viés) e a de dispersão em torno da média foi o desvio padrão (DP), enquanto que para a acurácia foi utilizado o erro médio quadrático (EMQ)⁵ no qual são consideradas simultaneamente as duas medidas anteriores. No próximo capítulo, um conjunto independente de radiossondas é utilizado para avaliar os modelos propostos.

⁵ O valor do viés é obtido ao calcular o erro médio, enquanto o desvio padrão, pela aplicação da fórmula $DP = \sqrt{\sum \frac{(dif - vies)^2}{n-1}}$. Os valores do EMQ foram obtidos pela equação EMQ = $\sqrt{vies^2 + DP^2}$.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

O primeiro modelo a ser avaliado é o da regressão linear dada pela equação 15 ao considerar todas as radiossondas indistintamente. Os valores dos indicadores de qualidade desse modelo são apresentados na tabela 6.

Locais	Número de radiossondas	viés (K)	DP (K)	EMQ (K)
Alta Floresta-MT	771	0,616	2,208	2,292
Belém-PA	5.952	0,051	1,763	1,764
Brasília-DF	10.780	0,971	1,677	1,938
Campo Grande-MS	5.311	-0,055	1,947	1,948
Curitiba-PR	10.835	-0,394	2,265	2,299
Fernando de Noronha-FN	2.732	-0,460	1,626	1,690
Rio de Janeiro-RJ	13.613	0,069	2,214	2,215
Manaus-AM	7.577	0,397	1,662	1,709
Natal-RN	5.426	-0,281	1,538	1,563
Porto Alegre-RS	13.230	0,435	2,801	2,835
São Paulo-SP	10.351	0,231	2,127	2,140
Vilhena-RO	3.036	-0,470	2,132	2,183
Todos	89.614	0,019	2,146	2,146

Tabela 6 - Indicativos da qualidade dos valores da Tm gerados pelo modelo brasileiro

Analisando os valores do viés apresentados na tabela 6, pode-se observar que em alguns locais o modelo apresentou maior tendência do que em outros. Enquanto para as radiossondas lançadas em Brasília o viés foi de quase 1 K positivo, no Rio de Janeiro, em Campo Grande e em Belém os valores do viés indicam, praticamente, ausência de tendência. Nas demais cidades os valores do viés ficaram entre +0,60 K e -0,60 K, e ao considerar todas as radiossondas utilizadas na modelagem, o viés foi de apenas 0,15 K. Os valores do desvio padrão mostrados na tabela 6 indicam que os resultados obtidos em Natal apresentaram a menor dispersão em torno do viés (DP de 1,53 K) e a maior dispersão foi gerada com relação às radiossondas lançadas em Porto Alegre. Com relação aos valores do EMQ, em Natal foi o menor (1,56 K) e em Porto Alegre o maior (2,84 K). Embora a maior tendência apresentada tenha sido em Brasília, o EMQ gerado em comparação com as radiossondas lançadas nessa cidade não merece destaque, pois a dispersão foi pequena. O valor do EMQ, ao considerar todas as radiossondas, foi de 2,15 K.

As regressões lineares regionalizadas apresentadas na tabela 5 são também avaliadas ao comparar seus resultados com os valores da *Tm* provenientes das radiossondas utilizadas na modelagem. Os valores dos indicadores de qualidade de tais modelos são apresentados na tabela 7. Pode-se verificar nessa tabela que a regionalização do modelo proporcionou uma diminuição na tendência na maioria dos locais avaliados, com exceção de Belém e de Campo Grande, onde o modelo brasileiro não havia apresentado tendência. A contribuição da regionalização do modelo na dispersão foi mais modesta do que na medida de tendência. Houve pequena melhoria na dispersão na maioria dos locais considerados, com aumento no valor do DP em Belém, Curitiba e Manaus, porém com diferenças também pequenas. Com exceção de Belém, em todos os outros locais os valores do EMQ obtidos na avaliação do modelo regionalizado foram menores do que os obtidos no modelo brasileiro.

Locais	Número de radiossondas	Viés (K)	DP (K)	EMQ (K)
Alta Floresta-MT	771	0,614	2,199	2,283
Belém-PA	5.952	-0,225	1,772	1,786
Brasília-DF	10.780	0,766	1,677	1,843
Campo Grande-MS	5.311	-0,897	1,924	2,123
Curitiba-PR	10.835	0,114	2,296	2,299
Fernando de Noronha-FN	2.732	-0,185	1,572	1,583
Rio de Janeiro-RJ	13.613	0,010	2,214	2,214
Manaus-AM	7.577	0,198	1,677	1,688
Natal-RN	5.426	-0,004	1,529	1,529
Porto Alegre-RS	13.230	-0,096	2,748	2,750
São Paulo-SP	10.351	-0,019	2,126	2,126
Vilhena-RO	3.036	-0,206	2,102	2,112
Todos	89.614	0,032	2,143	2,142

Tabela 7 - Indicativos da qualidade dos valores da *Tm* gerados pelas regressões lineares regionalizadas

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

No caso da modelagem espaço-temporal da *Tm*, uma avaliação similar às anteriores foi realizada, na qual os valores dos indicadores de qualidade foram obtidos em função dos meses do ano. Como foi desenvolvido um modelo específico para cada mês do ano e cada estação, o viés foi sempre nulo. Por esse motivo, o desvio padrão foi o único indicador de qualidade utilizado nesse caso. Os valores do desvio padrão em função dos meses do ano são plotados na figura 4. Da análise dos valores apresentados na figura 4 observa-se, que nos locais mais ao sul (Porto Alegre e Curitiba), as maiores dispersões estão concentradas no inverno. Os valores da dispersão em função do tempo variam mais nos locais onde a população de radiossondas disponíveis foi menor, como é o caso de Alta Floresta e Fernando de Noronha. O resultado mais importante fornecido por esses valores é a significativa melhoria da qualidade dos resultados obtidos em Porto Alegre, principalmente no verão. O desvio padrão nesse local, que sempre foi o maior dentre os locais avaliados, passou de 2,8 K para 2,5 K no inverno e 2,0 K no verão.



Figura 4 - Desvio padrão dos valores da *Tm* provenientes da modelagem espaçotemporal em função do tempo para todas as estações avaliadas.

3.6 Comentários adicionais

O fato de utilizar valores da pressão atmosférica na obtenção dos valores da *Tm* traz uma contribuição significativa à técnica que emprega dados GPS na quantificação do IWV, pois essa variável carrega consigo as influências das diferenças de altitude nos valores da temperatura média troposférica. Tais influências foram objeto de pesquisa de trabalhos anteriores (SCHUELER et al., 2001).

Os resultados obtidos nessa modelagem confirmam os resultados apresentados em estudos realizados utilizando perfis de temperatura e umidade distribuídos globalmente provenientes de modelos de PNT (SCHUELER et al., 2001) e de radiossondas (ROSS e ROSENFELD, 1997). Nesses trabalhos foram apresentadas estimativas para os indicadores da qualidade dessa modelagem para regiões do território brasileiro. Tais estimativas são similares aos resultados obtidos pela modelagem proposta, pois segundo essas estimativas os valores do EMQ na ordem de 2 a 3 K deveriam ser obtidos (o EMQ gerado pelos modelos propostos aqui foi de 2,15 K), sendo que os melhores resultados são encontrados na região equatorial (foi encontrado um EMQ de 1,5 K em Natal-RN e 2,7 em Porto Alegre-RS).

Os valores do EMQ aplicados na equação 8 fornecem uma indicação da incerteza esperada nos resultados finais do IWV-GPS gerada ao aplicar a modelagem proposta para a obtenção da Tm. Na tabela 8 são apresentados os valores dessa incerteza para as diferentes localidades consideradas na modelagem. Os valores médios do Z_{WD} e da Tm foram calculados utilizando todas as radiossondas disponíveis em cada uma das localidades.

Locais	Número de radiossondas	EMQ (K)	Z_{WD} médio (m)	<i>Tm</i> médio (K)	Incerteza (kg m ⁻²)
Alta Floresta-MT	771	2,283	0,266	285,560	0,340
Belém-PA	5.952	1,786	0,271	288,108	0,271
Brasília-DF	10.780	1,843	0,168	283,136	0,173
Campo Grande-MS	5.311	2,123	0,186	285,412	0,222
Curitiba-PR	10.835	2,299	0,135	281,559	0,174
Fernando de Noronha-FN	2.732	1,583	0,243	288,994	0,215
Rio de Janeiro-RJ	13.613	2,214	0,214	286,495	0,265
Manaus-AM	7.577	1,688	0,291	287,248	0,275
Natal-RN	5.426	1,529	0,234	289,039	0,200
Porto Alegre-RS	13.230	2,750	0,161	283,592	0,248
São Paulo-SP	10.351	2,126	0,154	282,801	0,184
Vilhena-RO	3.036	2,112	0,221	285,372	0,262
Todos	89.614	2,142	0,196	284,930	0,235

Tabela 8 – Incerteza nos valores finais do IWV-GPS gerada pela incerteza nos valores da *Tm* obtidos pelo modelo regionalizado

A incerteza nos valores finais do IWV-GPS foi maior em Alta Floresta, influenciada pelo valor elevado do EMQ, devido ao número reduzido de radiossondas consideradas. Os melhores resultados podem ser esperados em Brasília e Curitiba, pois a incerteza foi de apenas 0,17 kg m⁻². As regiões equatoriais, onde os valores médios do Z_{WD} são maiores, a incerteza nos valores finais do IWV-GPS não seguiu essa tendência, porque os valores da *Tm* obtidos pelos modelos nessas regiões foram mais precisos. A incerteza final nos valores do IWV-GPS considerando todas os locais é de 0,23 kg m⁻², que em termos percentuais é menor que 1%.

65

4 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO IWV-GPS NA REGIÃO AMAZÔNICA

Como já apresentado na seção 2.3, diversos experimentos para a validação dos valores do IWV-GPS têm sido realizados em diversos países. No Brasil, já foram realizados nos últimos anos alguns experimentos com o mesmo objetivo, envolvendo pequenos conjuntos de radiossondas lançadas na região Sudeste (SAPUCCI, 2001a). Os valores do EMQ resultantes nesses experimentos foram em torno de 1,8 kg m⁻², os quais são compatíveis com os relatados na bibliografia (EMARDSON, 1998). No entanto, quando se trata de medidas do vapor d'água atmosférico no Brasil, o grande desafio é a região Amazônica, pois é uma das regiões mais úmidas do planeta e possui especial interesse para as Ciências Atmosféricas. Essa região é caracterizada pela grande variabilidade dos campos de umidade devido aos freqüentes e intensos processos convectivos, associados ao grande potencial de umidade gerado pelas altas temperaturas. Atualmente, o impacto das mudanças do uso da terra no funcionamento climatológico, ecológico, bioquímico e hidrológico da Amazônia está sendo investigado, bem como as interações entre a floresta Amazônica e o clima global. Alguns pesquisadores defendem a hipótese de que o crescimento das áreas de desflorestamento para atividades agrícolas e pecuárias poderá afetar o ciclo do IWV e o regime de chuvas em diversas áreas do planeta, com graves conseqüências para o clima global (NOBRE et al., 1991; MANZI e PLANTON, 1996; CORREIA, 2005). Considerando tais fatos, a validação dos valores do IWV-GPS nessa região passa a ter especial importância, não só para se conhecer a qualidade das estimativas obtidas com essa técnica, mas também para contribuir com a avaliação das medidas do IWV em regiões com alta concentração de umidade (SAPUCCI et al., 2005b).

Para a validação dos valores do IWV-GPS na região Amazônica foram utilizadas as informações referentes à umidade atmosférica coletadas durante o experimento RACCI (IAG-USP, 2005), realizado em 2002 no estado de Rondônia. O período em que esse experimento foi realizado compreende a fase de transição da estação seca para a úmida, com coleta intensiva de informações físicas e químicas da atmosfera. Tal experimento está incluído no LBA, acrônimo de Experimento de Larga Escala da Atmosfera-Biosfera da Amazônia (INPA, 2005). O principal objetivo do experimento RACCI foi conhecer os processos físicos e químicos que controlam a estação de transição no sudoeste da floresta Amazônica e o efeito regional gerado pela queima de biomassa, prática muito comum nessa região no fim da estação seca.

Para a quantificação do IWV no experimento RACCI foram empregados receptores GPS, radiossondas RS80, fotômetro solar e sensores de umidade a bordo de satélite. O objetivo dessas medidas foi fornecer subsídios para avaliar a influência dos aerossóis na modificação dos processos associados com a sazonalidade do IWV na região Amazônica. Tais medidas foram aqui utilizadas para validar a qualidade dos valores do IWV-GPS.

Ao contrário das outras técnicas, a radiossondagem é a única baseada em medidas diretas da umidade, e, como as radiossondas foram lançadas em todas as estações onde houve coleta de dados GPS no RACCI, essa técnica tem especial importância na presente validação. Na comparação dos valores gerados por essas duas técnicas é importante conhecer a incerteza da diferença de tais valores, a qual pode ser determinada a partir da precisão obtida nas duas técnicas individualmente. Experimentos de intercomparação de radiossondas e receptores GPS de diferentes fabricantes são utilizados para determinar essa incerteza, os quais são apresentados a seguir.

4.1 Determinação da incerteza esperada na comparação entre IWV-GPS e IWV-RSO

Os valores da incerteza esperada na comparação de diferentes técnicas de quantificação de qualquer grandeza são de grande importância para a análise dos resultados obtidos. Essa incerteza está associada à precisão das técnicas avaliadas, e diferenças menores que seu valor não podem ser utilizadas para sustentar afirmações quanto a tendências e grau de dispersão de uma ou outra técnica. Esse tema passa a ter uma especial importância quando se trata de medidas relacionadas com o vapor d'água atmosférico, pois é uma variável atmosférica cuja medida ainda é um problema não solucionado, sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores (FUJIWARA et al., 2003; REVERCOMB et al., 2003; WECKWERTH et al., 2004). Nessa seção pretende-se determinar a incerteza da diferença entre os valores do IWV-GPS e os obtidos a partir de perfis de umidade das radiossondas (daqui para frente IWV-RSO).

4.1.1 Experimento de intercomparação de radiossondas

No contexto mundial, as radiossondas são os dispositivos mais usados para medir operacionalmente o perfil vertical da umidade. Globalmente distribuídas, existem atualmente 900 estações operacionais de radiossondagem e aproximadamente 51% delas utilizam radiossondas fabricadas pela Vaisala Oyj, 10 % pela Sippican/VIZ, outros 10 % pela Shang, 19 % fabricadas pela Mars/MRZ e 10 % provenientes de outros fabricantes (WANG et al., 2003b). Diversos experimentos de intercomparação de radiossondas, envolvendo esses diferentes fabricantes, foram realizados para avaliar a qualidade das medidas de umidade

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

geradas por essa técnica em regiões temperadas (IVANOV et al., 1991; YAGI et al., 1996; SCHIMIDLIN, 1998).

Um experimento de intercomparação promovido pela WMO (*World Meteorology Organization*) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foi realizado no Brasil em 2001 (SILVEIRA et al., 2003). Esse experimento foi denominado por RSO (*WMO RadioSOnde Intercomparison*) e contou com a cooperação de diversas organizações nacionais e internacionais de pesquisa. Os fabricantes que participaram desse experimento foram: Graw Radiosondes GmbH & Co. KG da Alemanha (DFM-97), MODEM da França e InterMet Sys dos EUA (GL-98), Sippican Inc. dos EUA (MKII) e a Vaisala Oyj da Finlândia (RS80 e RS90). O sensor de umidade Meteolabor *Snow White* da Suíça (SW) também foi utilizado, pois esse sensor tem uma nova técnica de quantificar a umidade. O objetivo desse experimento foi avaliar a performance dos diferentes sensores de umidade em uma região tropical ao considerar aspectos do uso operacional. Essa avaliação foi mais ampla do que apenas para os valores do conteúdo integrado do vapor d'água, pois também a distribuição vertical da umidade foi avaliada ao considerar diferentes camadas atmosféricas e diferentes períodos do dia. Os resultados dessas comparações são apresentados com mais detalhes em Sapucci et al. (2005a).

O experimento RSO foi realizado no Centro de Lançamento de Foguetes (CLA) da Força Aérea Brasileira (FAB), na cidade de Alcântara - MA, o qual está localizado na latitude 2°18'S e longitude 44°22'W a 49 m de altitude. O período do experimento foi de 21 de maio a 7 de junho de 2001 com lançamentos realizados às 0:00⁶, 6:00, 12:00 e 18:00 horas UTC em um total de 43 lançamentos. Conjuntos de 3 ou 4 radiossondas foram lançados fixos em uma

⁶ Como nesse trabalho horários são bastante utilizados no texto, convencionou-se utilizar a forma "hh:mm" para denotá-los, negligenciando os indicadores de hora e de minuto. Dessa forma, utiliza-se 10:20 ao invés de 10h20min.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia



estrutura de tubos de PVC em um mesmo balão, como mostra a figura 5. Detalhes adicionais das características técnicas desse experimento podem ser obtidos em Silveira et al. (2003).

Figura 5 – Estrutura de tubo de PVC utilizada para o lançamento simultâneo de 3 radiossondas (a) e 4 radiossondas (b).

Devido à ausência de um sensor de umidade que pudesse ser considerado como referência na intercomparação, a performance dos sensores é apresentada em função dos valores da RS80. Essa radiossonda foi escolhida porque ela é a mais utilizada operacionalmente (WANG et al., 2001), e muitas pesquisas têm sido feitas para reduzir e eventualmente remover erros presentes em seu sensor de umidade (WANG et al., 2003a, 2003b). Além disso, ela participou de todos os vôos realizados no experimento.

Os valores do IWV foram obtidos através de uma integração numérica dos valores da umidade relativa medidos pelas diferentes radiossondas. Grande discordância nos valores da umidade relativa foi verificada nas camadas mais elevadas da atmosfera, como relatado em Sapucci et al. (2005a). Porém, os valores do IWV gerados pelos diferentes sensores foram próximos uns dos outros, pois nas camadas mais elevadas a concentração de umidade é menor e por isso tais camadas são menos significantes para o conteúdo total integrado. Para tornar mais apurada a análise dos valores do IWV gerados nesse experimento, o perfil atmosférico foi dividido em camadas. A primeira camada inicia-se na superfície até atingir 3 km de altura (baixos níveis da troposfera), a segunda entre 3 e 8 km de altura (contem os altos níveis médios da troposfera), a terceira camada entre 8 e 15 km de altura (contém os altos níveis da

troposfera) e a quarta e última entre 15 km de altura até o término do perfil avaliado (em torno de 30 km) (contendo as demais camadas percorridas pelas radiossondas).

A figura 6 mostra um diagrama de dispersão entre os valores do IWV das diferentes radiossondas em função dos valores do IWV da RS80, para as diferentes camadas avaliadas, bem como os valores do coeficiente de correlação (r) de cada comparação. Como ocorreu na análise dos valores da umidade relativa apresentada em Sapucci et al. (2005a), a dispersão dos valores é gradativamente maior nas camadas mais elevadas. Nota-se que nessa figura a escala dos diferentes diagramas é diferente para facilitar a análise.



Figura 6 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV provenientes das radiossondas em função dos valores da RS80.

Os valores do r indicam que a correlação entre os valores do IWV é significantemente alta, principalmente nas três primeiras camadas. Os valores do r ficam
acima de 0,9 nas primeiras três camadas, com exceção da radiossonda MKII que apresenta a mais baixa correlação. Na quarta camada, o valor do *r* indica uma baixa correlação entre a RS80 e as radiossondas MKII, GL-98 e o sensor SW. Somente na comparação da RS80 com a RS90 e a DFM-97 foi obtida uma boa correlação nessa camada (*r* de 0,9 em ambas as comparações).

Devido à ausência de uma outra técnica que pudesse ser utilizada como referência para a avaliação das radiossondas, a importância dos valores da dispersão em torno da média (desvio padrão) deixa de ser significativa. Nesse caso, a quantificação da dispersão total da amostra é uma medida mais apropriada. Por esse motivo, e para simplificar a presente análise, os valores do DP não foram calculados. Foram utilizados como medidas de tendência o viés e de dispersão os valores do RMS⁷ (*root mean square*). Na tabela 9 são apresentados os valores dos indicadores estatísticos do IWV gerados pelas radiossondas avaliadas em função da RS80. Os valores presentes nessa tabela mostram que os sensores de umidade da RS90 e da RS80 apresentaram valores muito similares, principalmente na primeira camada onde a concentração de umidade é maior. Nessa camada, os valores do viés e do RMS entre essas radiossondas foram de +0,7 e 1,1 kg m⁻², respectivamente. O sensor de umidade da MKII apresentou a maior discordância com relação ao sensor da RS80, como já indicavam os valores do *r*. Pode-se notar uma grande tendência e grande dispersão entre essas radiossondas, principalmente nas duas primeiras camadas. Considerando todo o perfil, o RMS entre a RS80 e a MKII foi de 4,6 kg m⁻², o qual é três vezes maior do que a dispersão resultante da

⁷ Como os valores do desvio padrão não foram calculados, os valores do RMS foram obtidos nessa análise aplicando a equação $RMS = \sqrt{\frac{\sum (dif)^2}{n}}$, sendo dif as discrepâncias nos valores do IWV das diferentes radiossondas e n é o número de pares de dados comparados. É fácil ver que RMS é igual ao EMQ, porém o termo RMS é utilizado, nesse trabalho, para diferenciar a forma como a medida de acurácia é obtida, sendo EMQ obtido a partir dos valores do DP e RMS pela equação citada. comparação entre a RS80 e a RS90, nessa mesma circunstância (1,3 kg m⁻²). As radiossondas GL-98, DFM-97 e o sensor SW, na comparação com a RS80, apresentaram uma performance intermediária ao considerar os dois casos extremos citados. Tais sensores apresentaram valores com alta correlação (figura 6) e RMS relativamente pequeno, ou seja, 2,20, 2,41 e 2,56 kg m⁻² para os sensores GL-98, SW e DFM-97, respectivamente. O sensor da GL-98 apresentou a menor tendência na primeira camada com relação à RS80.

	NI/	Medida estatística		Contoúdo total			
Radiossondas	vôos		1^{a} camada (38,46 kg m ⁻²)*	2^{a} camada (8,74 kg m ⁻²)*	3^{a} camada (0,25 kg m ⁻²)*	4^{a} camada (0,01 kg m ⁻²)*	$(47,46 \text{ kg m}^{-2})^*$
	18	Viés (kg m ⁻²)	+0,787	-0,186	-0,012	+0,003	+0,591
R \$90		Viés (%)	+2,05	-2,13	-4,72	+37,50	+1,25
Royo		RMS (kg m ⁻²)	1,124	0,387	0,041	0,005	1,271
		RMS (%)	2,92	4,43	16,14	62,50	2,68
	33 -	Viés (kg m ⁻²)	+3,497	-0,159	-0,113	0	+3,229
MKII		Viés (%)	+9,09	-1,82	-44,49	0	+6,80
MIXII		RMS (kg m ⁻²)	4,158	1,972	0,218	0,007	4,605
		RMS (%)	10,81	22,56	85,83	87,50	9,70
	20	Viés (kg m ⁻²)	+0,578	+0,187	+0,064	-0,004	+0,822
GI -98		Viés (%)	+1,50	+2,14	+25,20	-50,00	+1,73
GE-70		RMS (kg m ⁻²)	1,696	0,542	0,073	0,006	2,202
		RMS (%)	4,41	6,20	28,74	75,00	4,64
	16 -	Viés (kg m ⁻²)	-1,979	-0,279	+0,006	+0,057	-2,194
DFM-97		Viés (%)	-5,15	-3,19	+2,36	+712,50	-4,62
DI M-97		RMS (kg m ⁻²)	2,198	0,547	0,029	0,112	2,565
		RMS (%)	5,72	6,26	11,42	1400,00	5,40
SW		Viés (kg m ⁻²)	+1,725	-0,197	+0,062	+0,025	+1,607
	16	Viés (%)	+4,49	-2,25	+24,41	+312,50	+3,39
	10	RMS (kg m ⁻²)	2,186	0,594	0,08	0,047	2,413
		RMS (%)	5,68	6,80	31,50	587,50	5,08

Tabela 9 - Indicativos da qualidade dos valores IWV com relação à radiossondaRS80 nas diferentes camadas do perfil atmosférico

* Valor médio do IWV em cada camada.

Em uma análise dos valores do IWV obtidos nos períodos diurno e noturno, utilizando RS80 e radiômetro de microondas, foi observado que essas radiossondas lançadas durante o dia são tipicamente 3% a 4% mais secas do que radiossondas lançadas durante a noite (TURNER et al., 2003). Como o experimento RSO não dispunha de medidas independentes, a partir de outras técnicas, como MWR ou receptores GPS, esse tipo de comparação não pôde ser realizado. No entanto, se forem consideradas as diferenças entre o método utilizado nas radiossondas convencionais e as medidas do sensor SW, o qual utiliza uma técnica completamente diferente, pode-se verificar um comportamento mais seco durante o dia de 5,9% da RS80, 4,5% da RS90, 1,4% da MKII e 7,1% da GL-98.

Se for considerado todo o perfíl, os resultados mostram que os valores do IWV obtidos pela RS80 tendem a subestimar a umidade. Os valores médios do viés e do RMS da RS80 em relação aos outros sensores de umidade foram de -0,81 e 2,61 kg m⁻². O sensor SW e a radiossonda RS90, as quais possuem tecnologias mais sofísticadas para a sensibilidade da umidade atmosférica, apresentaram boa performance nas camadas onde a concentração de umidade era elevada. Resultados similares com relação ao sensor SW foram relatados por Fujiwara et al. (2003) e Wang et al. (2003) e com relação à RS90 por Paukkunen et al. (2001). Se apenas esses sensores forem considerados, dada a comprovada superioridade da tecnologia neles envolvida, os valores médios do viés e do RMS da RS80 tornam-se: -1,09 (-2,32%) e 1,84 kg m⁻² (3,88%), respectivamente.

4.1.2 Experimento de intercomparação de receptores GPS

O experimento de intercomparação de receptores GPS na quantificação do IWV foi realizado no Laboratório de Geodésia Espacial da Universidade Estadual Paulista (LGE-UNESP), em Presidente Prudente - SP (latitude 22°07'S, longitude 51°24'W e 435 m de altitude). O período de coleta foi de 11 a 25 de novembro de 2002, sendo utilizados receptores de diferentes fabricantes para avaliar a precisão das medidas do IWV-GPS. Os receptores utilizados foram: um da marca ASHTECH, modelo ZXII (antena modelo ASH70070C); dois da marca TOPCON, modelo Legacy (antena modelo LEGANT-E) e um receptor da marca

Trimble, modelo 4000SSI (antena modelo ROGUE-T, do tipo *Choke Ring*). Tais receptores serão daqui para frente tratados por ZXII, LEG1, LEG2 e 4000SSI, respectivamente. Esse último pertence à RBMC e está instalado no LGE em uma das estações dessa rede, a qual é denominada por UEPP. As antenas foram instaladas em um tripé (ZXII) e em pilares de concreto sobre o LGE (LEG1 e LEG2). Detalhes do local onde as antenas foram instaladas são mostrados na figura 7. Na tabela 10 são apresentadas informações relacionadas aos receptores envolvidos no experimento de intercomparação, visando facilitar a análise dos resultados obtidos.



Figura 7 – Disposição das antenas sobre o Laboratório de Geodésia Espacial (LGE-UNESP).

Os dados coletados pelos diferentes receptores foram processados de forma idêntica, considerando apenas algumas características específicas para cada antena, como, por exemplo: o centro de fase e a altura acima dos pilares. O software utilizado foi o GOA-II (*GIPSY: GPS Inferred Positioning SYstem; OASIS: Orbit Analysis and SImulation Software II*) (GREGORIUS, 1996). Os detalhes do método de processamento usado são apresentados na tabela 11.

Denominação	Marca	Modelo (receptor)	Modelo (antena)	Estação GPS no RACCI [*]
ZXII	ASHTECH	ZXII	ASH70070C	ABRA
LEG1	TOPCON	Legacy	LEGANT-E	GJMI
LEG2	TOPCON	Legacy	LEGANT-E	PTVE
4000SSI	TRIMBLE	4000SSI	ROGUE-T	

Tabela 10 – Informações dos receptores envolvidos no experimento de intercomparação de receptores GPS e no experimento RACCI^{*}

^{*} Informações sobre o experimento RACCI e essas estações são apresentadas na seção 4.2

As medidas de temperatura e pressão disponíveis para esse experimento foram coletadas em uma estação meteorológica de superfície, pertencente ao INMET, localizada ao lado do LGE. Porém, tais coletas foram feitas manualmente em apenas 10 horários durante todo o dia.

Devido à ausência de valores de temperatura e pressão atmosférica na mesma taxa em que as estimativas do Z_{WD} foram geradas, essas estimativas foram convertidas em IWV utilizando um valor constante para o Z_{HD} e também para a *Tm*. Isso foi feito para evitar que os erros, gerados no transporte dos valores de pressão para a altura de cada antena, exercessem influência nos resultados finais. O valor da *Tm* utilizado foi o valor médio sugerido por Sapucci (2001a) para essa região, que é de 276,38 K. O valor do Z_{HD} utilizado nesse processo foi de 2,187 m, o qual foi determinado pela média dos valores sugeridos pelo GOAII para as alturas das diferentes antenas. A figura 8 mostra um diagrama de dispersão dos valores do IWV para as possíveis combinações dos receptores GPS.

Itens considerados	Configuração utilizada		
Software utilizado	GOA-II		
Efemérides dos satélites GPS	JPL (Jet Propulsion Laboratory)		
Método de posicionamento	Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)		
Desvio padrão das coordenadas	1 metro		
Intervalo de processamento	30 segundos		
Ângulo mínimo de elevação dos satélites	10°		
Processo estocástico para estimar o Z _{WD}	Random Walk		
Sigma do processo dinâmico	$5,0mm/\sqrt{h}$		
Função de mapeamento	Niell		
Valor inicial do Z_{WD}	0,25m		
Desvio padrão do Z_{WD}	0,20m		
Taxa das estimativas do Z_{WD}	5 minutos		
Conversão dos valores do Z_{WD} em IWV	Equações 5 e 6		

Tabela 11 - Detalhes da configuração utilizada no processamento dos dados GPS para a estimativa dos valores do Z_{WD} e obtenção dos valores do IWV

Na figura 8 os valores do IWV gerados pelos diferentes receptores apresentaram uma boa concordância. Os valores do r apresentados nessa mesma figura confirmam esses resultados, pois eles estão acima de 0,97 em todas as comparações. A comparação entre o 4000SSI e o ZXII apresentou a menor correlação (r de 0,976), e, por outro lado, a comparação entre os dois receptores TOPCON apresentou um coeficiente de correlação muito próximo de um (r de 0,994). Os valores do coeficiente angular das retas que melhor se ajustam aos dados nas diferentes comparações (variando de 0,96 a 1,02) sugerem que os valores do IWV provenientes dos receptores GPS apresentam alta sensibilidade reciprocamente. O melhor coeficiente linear dessa mesma reta foi o obtido na comparação entre o ZXII e o 4000SSI (-0,56) e o pior na comparação do LEG2 com o ZXII (-1,78).



Figura 8 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV nas possíveis combinações dos receptores GPS avaliados.

Assim como foi feito no experimento de intercomparação de radiossondas, e pelos mesmos motivos, os valores do DP também não foram calculados nessa análise. Por isso, os valores do RMS foram utilizados como medidas de dispersão. Na tabela 12 são mostrados os valores das medidas de tendência (viés) e dispersão (RMS) gerados na comparação entre os diferentes receptores GPS. O número de pares de dados considerados em cada comparação é relativamente alto, em torno de 3.000, o que torna os resultados gerados nesse experimento estatisticamente significativos.

Comparação	Desnível entre as antenas (m)	Número de pares de dados considerados	Viés (kg m ⁻²)	RMS (kg m ⁻²)
4000SSI – ZXII	-1,759	2.676	-0,411	1,038
LEG1 – ZXII	+0,371	3.167	-1,146	1,362
LEG2 – ZXII	+0,568	3.199	-1,472	1,689
LEG1 – 4000SSI	+2,130	3.269	-0,728	1,018
LEG2 – 4000SSI	+2,327	3.302	-1,082	1,299
LEG2 – LEG1	+0,197	3.794	-0,348	0,602

Tabela 12 – Valores dos indicadores da qualidade dos valores do IWV obtidos na comparação entre os receptores GPS

Tomando o receptor ZXII como referência, os valores do viés apresentados na tabela 12 mostram que o 4000SSI, LEG1 e o LEG2 geraram valores do IWV com um viés negativo (viés de -0,41, -1,15 e -1,47 kg m⁻², respectivamente). Esse resultado sugere que o ZXII tende a superestimar os valores do IWV com relação aos outros receptores. Os valores do RMS mostram que a maior dispersão foi gerada com relação ao LEG2 (RMS de 1,69 kg m⁻²), o qual indica a maior dispersão dentre todas as comparações avaliadas. Por outro lado, tomando o LEG2 como referência (para isso os valores considerados do viés devem ser os opostos aos apresentados na tabela 12), pode-se observar que esse receptor apresentou um viés positivo ao ser comparado com os demais receptores (viés de +1,47 kg m⁻² com relação ao ZXII, +1,08 kg m⁻² com relação ao 4000SSI e de +0,35 kg m⁻² com relação ao LEG1). Esses valores sugerem que esse receptor apresenta uma tendência de subestimar os valores do IWV com relação aos outros receptores avaliados.

Os demais receptores tiveram um comportamento intermediário aos anteriores mencionados. Tomando-se como referência o 4000SSI, pode-se observar que a menor tendência é observada com relação ao receptor ZXII (+0,41 kg m⁻²) e a menor dispersão com relação ao LEG1 (1,02 kg m⁻²). Considerando como referência os valores do LEG1, os resultados mais importantes obtidos são os valores reduzidos, tanto do viés como do RMS, com relação ao LEG2, os quais foram de -0,35 e 0,60 kg m⁻², respectivamente. Esse resultado

indica que tais receptores geraram os resultados mais similares. Isso era de se esperar, pois são receptores da mesma marca e de mesmo modelo.

Os valores médios do RMS gerado nesse experimento de intercomparação foram de 1,36, 1,12, 0,99 e 1,20 kg m⁻², para os receptores ZXII, 4000SSI, LEG1 e LEG2, respectivamente, os quais em termos percentuais foram de 3,06%, 2,71%, 2,41% e 2,90% (ao considerar 41,3 kg m⁻²como valor médio do IWV nesse experimento).

Como se pode observar na figura 7, as antenas não estavam dispostas em um mesmo nível, de forma que o perfil de umidade sobre cada uma delas apresenta uma pequena diferença. O desnível entre elas é apresentado na tabela 12. Apesar de não ser possível quantificar a influência desse fato nos resultados, isso deve ser levado em consideração na análise. Esse desnível é capaz de explicar uma pequena parte da tendência apresentada pelo LEG2 em subestimar a umidade e a menor tendência entre os receptores da TOPCON, pois essa antena estava acima das demais e o menor desnível registrado foi entre as antenas do LEG1 e do LEG2, de apenas 0,20 m. No entanto, o desnível em nada justifica a tendência apresentada pelo ZXII em superestimar os valores do IWV, pois a antena do 4000SSI estava 1,80 m abaixo da antena do ZXII e gerou resultados menores. Isso reforça a suspeita de que o ZXII superestima os valores do IWV.

Uma análise das variações dos valores do viés e do RMS em função das horas do dia foi feita para verificar o comportamento das discrepâncias durante esse período. A figura 9 apresenta os valores do viés e do RMS em função das horas do dia (UTC), para todas as 6 possíveis combinações entre os receptores avaliados. No cálculo desses valores foram considerados todos os dias do experimento. As falhas nos valores entre 22:00 e 24:00 nos gráficos das comparações que o Z-XII participa são devidas à interrupção na coleta ocorrida durante a descarga dos dados no PC.



Figura 9 – Valores do viés e do RMS obtidos nas 6 possíveis combinações entre os receptores em função das horas do dia.

Um resultado importante revelado na figura 9 é o aumento da dispersão das estimativas do IWV nas épocas iniciais e finais do processamento dos dados. Como se pode notar em todos os gráficos da figura 9, os valores do RMS nas primeiras épocas é bastante alto e depois diminui com o decorrer do tempo. O mesmo ocorre nas últimas épocas, em que o RMS cresce gradativamente, tendo o máximo nas últimas épocas. Esse comportamento se justifica pelo tipo de ajustamento utilizado no processamento dos dados GPS. No processo utilizado pelo GOA-II é empregado um filtro de Kalman modificado, que, em suas etapas de predição e suavização, faz com que as informações anteriores e posteriores a uma determinada época, influenciem a estimativa dos parâmetros nessa época. Como as épocas iniciais e finais do período processado tais informações não estão disponíveis, a qualidade das estimativas nessas épocas é prejudicada. Esse fato tem especial importância para o presente trabalho, pois é algo que deve ser levado em consideração ao disponibilizar as estimativas do IWV para aplicações em PNT. Esse assunto é retomado na seção 5.1.2.

Nas comparações feitas com relação ao ZXII foi observada uma maior oscilação durante as horas do dia do que aquelas comparações que o ZXII não participou. Com relação ao ZXII, os valores do RMS variaram entre 0,5 a 2,3 kg m⁻², sendo que os valores menores foram obtidos por volta das 11:00 UTC (8:00 horas locais) e os valores máximos por volta da 6:00 UTC (3:00 locais) e das 18:00 UTC (15:00 locais). Apesar de oscilante, o ZXII apresentou os melhores resultados na comparação com o 4000SSI e os piores com relação ao LEG2. Nas comparações em que o ZXII não participou, não se observa uma variação semelhante, pois os valores do viés e do RMS não apresentaram variações que estivessem relacionadas com as horas do dia, mostrando valores médios em concordância com os valores apresentados na tabela 12. Se for tomado o receptor 4000SSI como referência, pode-se observar que as oscilações durante o dia, tanto nos valores do viés como no RMS, são maiores na comparação com o ZXII do que com os receptores LEG1 e LEG2. Entre as fontes de erros nas observáveis GPS, o fator que apresenta uma oscilação significativa da sua influência no sinal GPS durante diferentes horas do dia é a Ionosfera (MATSUOKA e CAMARGO, 2004). Esses resultados sugerem que o ZXII apresenta maior susceptibilidade às perturbações diárias nos sinais GPS, onde a Ionosfera ocupa uma posição de destaque como fonte dessas perturbações.

4.1.3 Incerteza esperada da comparação GPS e RSO

A incerteza esperada na diferença entre os valores do IWV provenientes de radiossondas e receptores GPS (σ_{DIF}) pode ser obtida aplicando a teoria de propagação de covariância, através da seguinte fórmula (WOLF e GHILANI, 1997):

$$\sigma_{DIF} = \sqrt{\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{RSO}^2}, \qquad (17)$$

sendo σ_{GPS} e σ_{RSO} as incertezas nos valores do IWV provenientes dos receptores GPS e radiossondas, respectivamente. Se for assumido que as incertezas dessas técnicas são iguais aos valores médios do RMS obtidos dos experimentos de intercomparação, uma boa estimativa da incerteza esperada na comparação pode ser obtida. Para que os valores aqui apresentados possam ser utilizados em diferentes regiões, onde a concentração de umidade pode também ser bastante diferente, os valores da incerteza esperada para os diferentes receptores são apresentados em termos percentuais. Na tabela 13 são apresentados os valores dessa incerteza com relação à radiossonda RS80, pois todas as radiossondas utilizadas no experimento RACCI foram dessa marca.

Receptor	$\sigma_{\scriptscriptstyle G}$	PS	$\sigma_{\scriptscriptstyle RSO}$	$\sigma_{\scriptscriptstyle D\!I\!F}$
Avaliado	kg m ⁻²	(%)*	kg m ⁻² (%))** (%)
ZXII	1,36	3,06	1,84 3,8	88 4,94
4000SSI	1,11	2,71	1,84 3,8	4,73
LEG1	0,99	2,41	1,84 3,8	4,57
LEG2	1,20	2,90	1,84 3,8	4,84

Tabela 13 - Incerteza esperada na diferença entre os valores do IWV-GPS e os provenientes dos perfís de umidade da radiossonda RS80 em termos percentuais

* O valor médio do IWV considerado no experimento de intercomparação de receptores GPS foi de 41,3 kg m⁻².
** Foi considerado 47,46 kg m⁻² como valor médio do IWV no experimento de

** Foi considerado 47,46 kg m⁻² como valor médio do IWV no experimento de intercomparação de radiossondas.

Analisando os valores mostrados na tabela 13, pode-se observar que a maior incerteza da diferença GPS e a radiossonda RS80 é esperada na comparação com o receptor ZXII (4,94 %) e a menor é com o receptor LEG1 (4,57 %). Pode-se observar também que a precisão do IWV-GPS foi melhor que a precisão dos valores do IWV provenientes das radiossondas RS80 (daqui para frente IWV-RS80). Como ambos os experimentos de intercomparação não contaram com uma técnica de quantificação do IWV que pudesse ser considerada como referência, não é possível avaliar a acurácia dessas diferentes técnicas.

4.2 Validação das estimativas IWV-GPS na região Amazônica

O LBA envolve diversas instituições nacionais e internacionais de pesquisa, cujos resultados são de grande interesse à comunidade científica de todo o mundo, preocupada com o impacto das mudanças dos usos da terra na floresta Amazônica e o sistema biogeofísico global da Terra. Os objetivos do LBA estão centrados em torno de uma questão principal que se refere ao modo como as mudanças dos usos da terra e do clima afetarão o funcionamento biológico, químico e físico da Amazônia. Nessa problemática está incluída a sustentabilidade da região e a influência dessas mudanças no clima global.

Visando contribuir nessa questão, em meados do segundo semestre de 2002 foi realizada a campanha denominada RACCI, tendo como objetivo geral entender os processos físicos que controlam a estação de transição na região sudoeste da Amazônia. Mais especificamente, as principais questões científicas que motivaram a realização dessa campanha estão ligadas: aos efeitos no clima produzidos pelos aerossóis oriundos da queima de biomassa no início da estação chuvosa; à questão sobre os processos de realimentação

entre a Amazônia e o clima global; e à possibilidade da heterogeneidade da superficie influenciar os movimentos verticais e os processos de formação de nuvens. (IAG-USP, 2005). Diversos equipamentos empregando diferentes técnicas foram utilizados para a quantificação do IWV durante esse experimento, os quais são utilizados aqui para validar as medidas obtidas por receptores GPS.

4.2.1 Instrumentos utilizados na quantificação do IWV na campanha RACCI

O experimento RACCI foi composto por 5 sítios de coleta, localizados em diversas cidades do estado de Rondônia. Esses sítios levam o nome das cidades onde estavam localizados, sendo, portanto denominados: Vilhena, Rebio Jaru, Ouro preto do Oeste (sítio também conhecido por Fazenda Nossa Senhora ou também Abracos), Porto Velho e Guajará Mirim. Apenas nos 3 últimos sítios houve a coleta de dados GPS, os quais são denominados aqui por ABRA, PTVE e GJMI, respectivamente. A figura 10 mostra a distribuição geográfica dessas estações dentro do estado de Rondônia.



Figura 10 – Distribuição geográfica das estações do RACCI no Estado de Rondônia.

Os instrumentos utilizados para a quantificação do IWV no RACCI foram:

– Radiossondas: Todas as radiossondas utilizadas nesse experimento foram da marca
 Vaisala, modelo RS80-15G. O número de radiossondas lançadas durante esse experimento foi
 de 214 na estação ABRA, 143 em GJMI e 110 em PTVE;

– Receptores GPS: os receptores utilizados nesse experimento foram os mesmos utilizados no experimento de intercomparação apresentado na seção 4.1.2, ou seja, 1 receptor da marca ASHTECH, modelo ZXII (denominado ZXII e instalado na estação ABRA); e 2 da marca TOPCON, modelo Legacy (denominados LEG1 na estação GJMI e LEG2 na estação PTVE). Informações adicionais sobre esses receptores são apresentadas na tabela 10;

– Fotômetro solar: na estação ABRA foi instalado um fotômetro da marca CIMEL, modelo CE-318, pertencente à rede AERONET (*AErosol RObotic NETwork*), gerando valores do IWV em várias épocas durante o dia (HOLBEN et al., 1998). Os dados disponíveis nesse experimento pertencem ao nível 2.0, no qual a eliminação da contaminação dos resultados pela presença de nuvens é assegurada;

– Satélite sondador de umidade: os valores do IWV provenientes do Sensor de Umidade Brasileiro (HSB - *Humidity Sounder for Brazil*) (LAMBRIGTSEN e CALHEIROS, 2003) a bordo do satélite AQUA (NASA, 2005c) foram também utilizados nessa avaliação. Esse sensor foi projetado para detectar radiância na banda de 150 e 185 GHz, com menor susceptibilidade à radiofreqüência do que outros sensores (ROSENKRANZ, 2001; SOUZA et al., 2004). O sensor HSB é composto de 3 canais na banda de absorção do vapor d'água (em torno de 183,31 GHz) e um outro com 150 GHz. A resolução vertical do HSB é em torno de 14 km na direção nadir. Na escolha dos dados provenientes do HSB utilizados nesse experimento foram considerados apenas aqueles em que a taxa de cobertura por nuvens no momento da observação era menor do que 30%. O número de valores do IWV resultante nesse processo foi somente 24, considerando todas as 3 estações (5 em ABRA, 11 em GJMI e 8 em PTVE).

O período de coleta dos dados de cada técnica considerada nas diferentes estações não foi igual devido a fatores relacionados com a operacionalidade da instalação e desinstalação dos dispositivos envolvidos. A tabela 14 apresenta o período de coleta de cada uma das técnicas consideradas, bem como as coordenadas geográficas de cada uma das estações GPS do RACCI.

Tabela 14 – Localização das estações do RACCI e o período de coleta de cada instrumento utilizado na quantificação do IWV

Estação	Latitude	Longitude	Período de coleta	Lançamento de radiossondas	Receptores GPS	Sensor HSB	Fotômetro solar
ABRA	10°45'S	62°21'W	Início Fim	12 de Set. 3 de Nov.	21 de Set 3 de Nov.	12 de Set. 3 de Nov.	1 de Set. 15 de Nov.
PTVE	08°42'S	63°53'W	Início Fim	20 de Set. 29 de Out.	18 de Set. 29 de Out.	12 de Set. 3 de Nov.	
GJMI	10°45'S	65°18'W	Início Fim	15 de Set. 28 de Out.	15 de Set. 28 de Out.	12 de Set. 3 de Nov.	

4.2.2 Processamento dos dados

Os valores do IWV das radiossondas foram obtidos ao aplicar uma integração numérica dos valores do perfil de temperatura do ponto de orvalho ao longo da coluna vertical atmosférica. A altura mínima da coluna atmosférica considerada nesse processo foi de 8 km e as radiossondas que não atingiram essa altura foram descartadas da análise.

O processamento dos dados GPS coletados na campanha RACCI foi realizado com o mesmo software e a mesma configuração utilizada no experimento de intercomparação dos receptores, como descritos na seção 4.1.2 e detalhada na tabela 11. Como as estações utilizadas não tinham coordenadas conhecidas, a primeira etapa do processamento foi realizada com esse objetivo. Nessa primeira etapa, os dois últimos itens da tabela 11 não

2618591,163

2773932,271

GJMI

PTVE

foram aplicados, pois eles se referem à obtenção dos valores do IWV. As coordenadas das estações GPS do RACCI, referenciadas no ITRF94, são apresentadas na tabela 15, juntamente com o respectivo desvio padrão. Nota-se que a dispersão obtida no posicionamento nessas estações foi muito pequena.

referenciadas ao ITRF94 Coordenadas (m) Desvio Padrão (m) Estação DP_x DP_{v} DP_z Х Ζ Y ABRA 2907307,152 -5551752,332 -1183383,166 0,0053 0,0061 0,0042

-1182087,908

-960064,646

0,0046

0,0054

0,0061

0,0063

0,0032

0,0036

-5693785,344

-5662109,221

Tabela 15 - Relação das coordenadas das estações GPS do experimento RACCI

O processamento dos dados GPS para a determinação do atraso zenital troposférico, em uma segunda etapa, foi feito de forma similar à descrita na seção 4.1.2 e resumida na tabela 11. Utilizando essa configuração foi gerado, para cada um dos dias da coleta de dados nas três estações, um arquivo contendo a soma dos valores do atraso zenital da componente úmida, com os resíduos da componente hidrostática, em intervalos de 5 minutos. Os valores de temperatura e pressão atmosférica utilizados na conversão das estimativas do Z_{TD} em valores do IWV foram obtidos por sensores instalados próximos das antenas GPS nos 3 sítios. Para a escolha do modelo da Tm mais apropriado, entre os 3 propostos no capítulo 3, uma análise da qualidade deles foi realizada. As radiossondas lançadas nesse experimento foram utilizadas nessa análise e contribuíram com a avaliação desses modelos, efetuada na seção 3.5, entrando no processo como um conjunto independente. Os valores dos indicadores de qualidade resultantes dessa avaliação são apresentados na tabela 16. O número de radiossondas utilizadas nessa análise foi diferente do número dos lançamentos realizados nos sítios do RACCI, pois durante algumas radiossondagens houve falha na coleta das informações de temperatura e pressão atmosférica na superfície.

87

Analisando os valores apresentados na tabela 16, pode se verificar que tanto o modelo brasileiro quanto o modelo regionalizado geraram resultados melhores em GJMI e PTVE, do que em ABRA. O valor do EMQ gerado pela comparação com o modelo brasileiro em ABRA (RMS de 2,8 K) foi maior do que o registrado ao comparar com as radiossondas lançadas em Vilhena (2,1 K, como apresentado na tabela 6), enquanto que nas demais estações os valores desse indicador foram menores.

Estação	Número de radiossondas	Modelo avaliado	Viés (K)	DP (K)	EMQ (K)
ABRA	133	Brasileiro Regionalizado Numérico	1,693 1,669 1,297	2,242 2,079 2,504	2,810 2,667 2,820
GJMI	105	Brasileiro Regionalizado Numérico	0,726 0,673 0,289	1,880 1,805 3,112	2,015 1,926 3,126
PTVE	82	Brasileiro Regionalizado Numérico	1,462 1,418 1,318	1,472 1,434 2,918	2,075 2,017 3,202

Tabela 16 - Indicativos da qualidade dos valores da Tm considerando asradiossondas lançadas no RACCI

Comparando os valores gerados pelo modelo regionalizado com os gerados pelo modelo brasileiro, nota-se que, tanto na dispersão quanto na tendência, a regionalização do modelo trouxe melhorias na qualidade dos resultados. Nas medidas de tendências tais benefícios foram mais significativos.

Com relação ao modelo numérico nota-se que os resultados obtidos foram piores do que os demais modelos nos 3 sítios do experimento. Apesar de apresentar a menor tendência, se comparado com os demais modelos, os valores do EMQ indicam que esse modelo foi, em GJMI e PTVE, 1,0 K mais disperso do que os outros. Ao contrário dos modelos brasileiro e regionalizado, os melhores resultados desse modelo foram obtidos em ABRA. Esse fato se justifica pelo pequeno número de radiossondas consideradas em Vilhena, na qual foram determinados os valores dos parâmetros do modelo numérico utilizados nessa avaliação. Nesse caso, a representatividade das variações da região por essa amostra fica prejudicada e a influência da distância na qualidade dos resultados é significativa. É por isso que os melhores resultados gerados pelo modelo numérico foram obtidos em ABRA, pois é o sítio mais próximo de Vilhena. Com base nos resultados apresentados nessa avaliação foi escolhido o modelo regionalizado para gerar as estimativas do IWV-GPS nas estações do RACCI.

Os valores do IWV obtidos com o uso do sensor HSB foram determinados ao empregar um método baseado na combinação linear de seus canais (LIMA e MACHADO, 2005). O coeficiente de correlação entre a temperatura de brilho e os valores do IWV foram obtidos a partir de simulações usando as radiossondas lançadas no experimento RACCI.

O fotômetro solar CIMEL ao ser apontado para o sol, baseando-se nos cálculos das efemérides solares e um sensor solar ativo, realiza medidas da luz direta no canal do espectro para a banda de absorção do vapor d'água (PLANA-FATTORI et al., 1998; SCHMID et al., 1999). O algoritmo CIMEL padrão foi utilizado para a obtenção dos valores do IWV a partir das medidas realizadas por esse instrumento, no qual estiveram envolvidos a técnica de *Langley-Plot* modificada e o modelo de transferência radiativa de LOWTRAN 7 (SCHMID et al., 2001).

4.2.3 Análise dos resultados

Várias comparações foram feitas entre as diferentes técnicas de quantificação do IWV disponíveis no experimento RACCI. Os valores do IWV-GPS foram comparados com os provenientes do fotômetro solar CIMEL, do sensor HSB e das radiossondas. Os valores do IWV gerados pelo CIMEL foram também comparados com os gerados pelas radiossondas. A comparação entre o HSB e o CIMEL não foi feita, pois o número de pares de dados disponíveis era de apenas 3. Os valores provenientes do sensor HSB e das radiossondas também não foram comparados porque essas participaram do processo de obtenção dos valores do IWV desse sensor.

Comparação GPS versus fotômetro solar CIMEL: A figura 11 apresenta um diagrama de dispersão entre os valores do IWV-GPS e os provenientes do fotômetro solar CIMEL. No gráfico (a) dessa figura a curva de ajuste das discrepâncias em função dos valores do IWV mostra que os receptores GPS fornecem resultados satisfatórios com relação ao fotômetro solar CIMEL (diferences entre -5 e +2 kg m⁻², sempre menor que 10%) para um largo domínio dos valores do IWV. No entanto, na figura 11b, pode-se observar que os receptores GPS tendem a gerar valores menores do que os gerados pelo fotômetro solar (viés de -2,33 kg m^{-2} ou 4,5%). Observa-se que tal tendência cresce quando os valores do IWV ficam maiores. Quando os valores são menores do que 42 kg m⁻² a tendência da discrepância é inicialmente positiva e cresce cruzando a linha zero tornando-se negativa no final. Esse comportamento não ocorre para valores maiores do que 42 kg m^{-2} , nos quais essa tendência é sempre negativa. A possível razão desse fato é o crescimento da taxa de cobertura de nuvens quando cresce a umidade atmosférica. Sabe-se que na presença de nuvens a performance do fotômetro solar é degradada (INGOLD et al., 2000). Em experimentos anteriores foi observado que os valores do IWV gerados pelo fotômetro solar são em torno de 6,8 % mais úmidos que o MWR (SCHMID et al., 2001). Emardson et al. (2000), comparando 141.864 pares de dados, mostraram que valores do IWV-GPS são 2,5 % mais úmidos do que o IWV-MWR. Esses resultados sugerem que os valores do IWV-GPS são 4,3 % mais seco do que os valores gerados pelo fotômetro CIMEL, o qual é um resultado muito próximo ao encontrado nessa comparação (4,5 %).



Figura 11 – Valores das discrepâncias (a) e os valores do IWV-GPS (b) em função dos valores do IWV gerados pelo fotômetro solar CIMEL.

Comparação HSB versus GPS. Os resultados obtidos na comparação entre os valores do IWV-GPS e o sensor HSB são apresentados no diagrama de dispersão da figura 12. Nessa figura pode ser visto que os valores IWV-HSB apresentam pequena tendência (viés de 1,0 kg m⁻² ou 2 %), o qual indica que são mais úmidos do que os valores do IWV-GPS. No entanto, a dispersão é alta (desvio padrão de 4,15 kg m⁻² ou 8,1 %) e cresce quando a umidade atmosférica é baixa. Essa tendência é similar aos resultados obtidos por Wolfe e Gutman (2000) usando valores do IWV provenientes do satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) comparados com valores do IWV-GPS, porém não na mesma magnitude, pois o valor do viés gerado foi de 2,3 kg m⁻², ou em torno de 10 %. Quanto à dispersão, o valor do DP com a utilização dos dados do GOES (2,3 kg m⁻²) foi menor do que o gerado na comparação do HSB. O valor do coeficiente angular da reta que melhor se ajusta no diagrama de dispersão (0,68) revela que os valores do IWV-HSB apresentam pequena sensibilidade aos valores do IWV-GPS, enquanto que o coeficiente linear dessa reta é bastante elevado (14,2 kg m⁻²). Tais resultados são justamente os opostos aos obtidos na comparação entre o GPS e o fotômetro CIMEL, porque a dispersão cresce quando os valores do IWV são maiores, o valor do coeficiente angular é próximo de um e o coeficiente linear é baixo (1,66

kg m⁻²). Como a quantidade de pares de dados utilizados nessa comparação é pequena (apenas 24 pares de dados), esses resultados são estatisticamente pouco representativos.



Figura 12 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV-HSB em função do IWV-GPS.

Comparação fotômetro CIMEL versus radiossondas RS80. A figura 13 apresenta o diagrama de dispersão de 38 pares de dados provenientes da comparação entre o fotômetro solar CIMEL e radiossondas RS80 na estação ABRA. Pode-se observar uma superestimativa dos valores do IWV derivado do CIMEL quando comparados com os valores gerados pela RS80. O valor do desvio padrão (2,0 kg m⁻²) é muito menor que o valor do viés (+6,5 kg m⁻²), o que sugere que erros sistemáticos existem nas técnicas envolvidas. Os valores dos coeficientes reforçam a suspeita da presença desses erros, pois o coeficiente de correlação entre os valores dessa comparação é próximo de um (*r* de 0,93), os valores apresentados pelo CIMEL mostraram-se sensíveis aos valores IWV-RSO (coeficiente angular de 1,03) e o valor do coeficiente linear é próximo do valor do viés (+5,24 kg m⁻²). Schmid et al. (2001) mostraram que os valores do IWV gerados pelo fotômetro CIMEL são em torno de 6,8 % mais úmidos do que os valores IWV-MWR, o qual, por sua vez, é em torno de 2,0 % mais

úmido do que os valores da IWV-RS80 (EMARDSON et al., 2000). Esse resultado sugere que o CIMEL superestima a umidade em torno de 9% quando comparado com valores IWV-RS80. O viés encontrado no experimento RACCI (+12,7 %) é maior que esse resultado. A razão para isso é que, segundo Ingold et al. (2000), a performance de fotômetros solar é melhor em condições com luz direta sob céu claro, e essa condição foi bastante escassa durante o período do experimento RACCI.



Figura 13 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV gerados pelo fotômetro CIMEL em função do IWV-RS80.

Comparação receptor GPS versus radiossondas RS80. A figura 14 mostra um diagrama de dispersão dos valores IWV-GPS como função dos valores do IWV-RS80. Como a radiossondagem é a única técnica que mede a umidade de forma direta, essa análise será feita em duas etapas: a primeira é uma análise de tendência e a segunda é uma análise de dispersão.



Figura 14 – Diagrama de dispersão dos valores do IWV-GPS em função dos valores do IWV-RS80.

4.2.3.1 Análise de tendência dos valores IWV-GPS versus IWV-RS80

O diagrama de dispersão da figura 14 mostra que os valores IWV-GPS gerados nesse experimento apresentam uma tendência de superestimar a umidade com relação os valores das radiossondas. O viés gerado foi de +3,2, +3,3 e +1,7 kg m⁻² (ou +6,3, +6,5 e +3,4 %), nas

estações ABRA, GJMI e PTVE, respectivamente. Além disso, existe uma substancial diferença na sensibilidade nas diferentes estações, como indicado pelos valores do coeficiente angular da linha de melhor ajuste. Na estação GJMI, onde o valor do viés é menor, o coeficiente angular (0,95) foi mais próximo de um do que o gerado na estação PTVE (0,68), na qual o viés foi menor. Em diversos outros experimentos realizados para avaliar a qualidade das medidas de umidade atmosférica tem sido observado que as radiossondas apresentam a mesma tendência de subestimar a umidade, no entanto em magnitudes menores. Emardson et al. (2000), usando 1.726 radiossondas, mostraram que os valores do IWV-GPS foram +0,8 kg m⁻² mais úmidos que os valores gerados pelas radiossondas, e Ingold et al. (2000) encontraram a mesma tendência, mas o valor do viés foi de +1,76 kg m⁻².

A influência da Ionosfera pode ser uma razão para as diferenças entre os valores do viés obtidos no experimento RACCI com os obtidos nos trabalhos anteriores mencionados. Os eletrons livres na Ionosfera afetam a propagação dos sinais GPS (MONICO, 2000b), gerando um avanço na fase da onda portadora e um atraso na velocidade de grupo da modulada (LEICK, 1995). A magnitude desse avanço é similar ao atraso, a qual é diretamente proporcional ao conteúdo total de eletrons (TEC) ao longo do caminho entre um satélite GPS e o receptor e inversamente proporcional a freqüência do sinal. O TEC está em função principalmente do fluxo de radiação solar incidente e é afetado por diversos fatores, tais como: número de manchas solares, rotação da terra, campo magnético da Terra, localização e sazonalidade (SPILKER, 1994). Seeber (1993) descreveu essa relação como uma série de potência do inverso da freqüência da onda portadora, na qual os termos de ordem maior que a primeira são freqüentemente ignorados. A negligência desses termos no processamento dos dados GPS pode resultar em erros residuais nos valores do Z_{TD} durante períodos de alta atividade solar (BRUNNER e GU, 1991).

Dentre os fatores que influenciam a atividade ionosférica, dois foram mais significativos: a localização das estações do RACCI e o ciclo das manchas solares. As estações GPS do RACCI estavam localizadas próximas ao equador geomagnético, onde a energia solar incidente é maior do que nas outras regiões do globo e o período em que foi realizado o experimento pertence a um período de máxima do número de manchas solares, o que intensifica a ionização da atmosfera terrestre (KUNCHES, 2001). A influência da quantidade de manchas solares nas observações GPS pode ser observada na série temporal do TEC. A figura 15 mostra uma série temporal do valor da média global do TEC obtida a partir das estações do IGS, produzida pelo Centro de determinação de órbita na Europa (CODE – *Center for Orbit Determination in Europe*) (AIUB, 2005), na qual o período em que foi realizado o RACCI é destacado. Nota-se que apesar de o RACCI não ter sido realizado no pico do período de máxima do ciclo das manchas solares (setembro de 2001 a março de 2002), os valores da média global do TEC durante esse experimento (valor médio de 40 10^{16} el m⁻²) foi bastante elevado, sendo quatro vezes maior que no período de mínima do número de manchas solares (valor médio de 10 10^{16} el m⁻²).



Figura 15 - Série temporal da média global do TEC para o período de 1 de janeiro de 1995 a 31 de setembro de 2005 (Adaptado de IAUB, 2005). Os valores observados são mostrados em vermelho e as estimativas em azul.

97

Com o objetivo de analisar a correlação entre a influência direta da Ionosfera nos sinais GPS e os valores do viés da comparação IWV-GPS versus IWV-RS80, a figura 16 mostra os valores médios do TEC na direção satélite-receptor em função das horas locais, os quais são comparados com as medidas estatísticas do IWV-GPS geradas na diferentes estações do RACCI. Os valores do TEC foram obtidos aplicando uma combinação linear dos valores do código do sinal GPS nas duas freqüências (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). Nesse processo, a máscara de elevação utilizada foi de 10 graus, pois foi essa a utilizada no processamento dos dados GPS. As medidas estatísticas foram apresentadas nessa figura em função dos horários sinóticos⁸ porque são os de maior interesse para propósitos operacionais. Os valores médios do TEC variaram substancialmente durante as horas do dia no experimento RACCI. O pico de máxima do TEC foi por volta das 14 horas locais e o de mínima às 6 horas locais. Resultados similares foram reportados em Matsuoka e Camargo (2004), estudando a Ionosfera em regiões equatoriais. Durante o dia, o TEC cresce induzido pela energia solar e a noite ele é reduzido por causa da combinação dos eletrons livres com os ions.

Como é claramente visto na figura 16, os valores do viés são maiores durante o período onde a atividade ionosférica é elevada. O valor do viés gerado ao considerar as radiossondas lançadas às 12:00 UTC (+3,88, +4,07 e +2,42 kg m⁻² nas estações ABRA, GJMI e PTVE, respectivamente) e às 18:00 UTC (+4,27, +4,09 e +3,32 kg m⁻², respectivamente) é quase duas vezes maior que o viés das radiossondas lançadas as 0:00 UTC (+1,86, +2,66 e +1,15 kg m⁻², respectivamente) e às 6:00 UTC (+1,14, +2,28 e -0,23 kg m⁻², respectivamente).

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

⁸ Sinótico é relativo a sinóptico; resumido (Do gr. synoptikós, "que de um só golpe de vista abrange várias coisas"). Os horários sinóticos são aqueles que resumem as diferentes situações ocorridas durante o dia. São eles: 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00.

Note-se que a melhor concordância é encontrada nas radiossondas lançadas às 6:00 UTC (2 horas locais) e a pior ao considerar as radiossondas lançadas às 18:00 UTC (14 horas locais).



Figura 16 – Valores médios do TEC na direção satélite-receptor em função do tempo (hora local) e medidas estatísticas da comparação GPS versus RS80 em função do tempo (horas sinóticas UTC).

Um outro ponto, tão importante quanto a influência da Ionosfera nos valores do viés, é o fato da RS80 apresentar uma tendência de subestimar os valores da umidade durante o período diurno (TURNER et al., 2003). Isso foi confirmado no experimento de intercomparação de radiossonda apresentado na seção 4.1.1, ao comparar com os resultados gerados pelo sensor SW (SAPUCCI et al., 2005a). A RS80 apresentou um comportamento mais seco durante o dia de 5,9% ou 2,9 kg m⁻²(considerando os valores médios do IWV durante o experimento RACCI de 50,6 kg m⁻²). Na figura 16, se forem tomados os valores do GPS como referência, observa-se que as radiossondas RS80 apresentam uma tendência de gerar valores do IWV mais secos durante o dia. O viés diurno com relação às radiossondas lançadas durante a noite foi de -2,47, -1,61 e -2,07 kg m⁻² nas estações ABRA, GJMI e PTVE, respectivamente.

O período mais provável em que a alta atividade ionosférica poderia gerar superestimativa nos valores do IWV-GPS coincidiu com o período onde as radiossondas apresentam uma tendência de subestimar a umidade. A combinação desses efeitos foi responsável pelas discordâncias entre os valores do viés obtidos no RACCI com os encontrados nos trabalhos anteriores. Se forem consideradas somente as radiossondas lançadas no período noturno (onde a atividade ionosférica é menor e a RS80 apresenta menor tendência de subestimar a umidade), o valor do viés é similar aos resultados encontrados por Emardson et al. (2000) e Ingold et al. (2000). O mesmo não ocorre se forem consideradas as radiossondas lançadas no período diurno. A ausência de uma outra técnica de quantificação do IWV com boa resolução temporal nos sítios do RACCI não permitiu que a influência de cada um desses fatores fosse isolada. Os resultados apresentados mostram a importância de que novos experimentos no futuro sejam realizados na Amazônia com a inclusão de uma outra técnica, além das utilizadas aqui, como um radiômetro. Como mostra a figura 15 é bastante apropriado que tais experimentos sejam realizados no período de baixa atividade ionosférica (ano de 2006 ou 2007) para verificar o comportamento dos valores do IWV-GPS nessas circunstâncias.

Em ABRA, em contraste com outras estações do RACCI, o número de radiossondas lançadas durante o período diurno (106 radiossondas) foi muito maior do que durante o período noturno (61 radiossondas). Conseqüentemente, a influência dos resíduos da modelagem ionosférica e do viés diurno da RS80, nos valores finais do viés, foi mais significativa do que nas outras estações. Para confirmar essa suspeita foi feita uma análise onde apenas os pares de valores IWV-RSO e IWV-GPS simultâneos nas três estações foram considerados. O número de pares de dados resultante foi de 61. Nessas circunstâncias, o valor

do viés na estação ABRA passou de +3,2 para +2,3 kg m⁻², enquanto que nas demais estações o viés manteve-se praticamente inalterado (o viés em GJMI passou para +3,2 kg m⁻² e em PTVE para +1,5 kg m⁻²), como era esperado.

Um outro resultado na análise de tendência que deve ser discutido são as diferentes magnitudes do viés gerado em PTVE (+1,71 kg m⁻²) e nas outras estações GPS do RACCI (em torno de +3,2 kg m⁻² em ABRA e GJMI). As diferenças entre os valores do viés gerados em ABRA e PTVE podem ser explicadas por dois fatores, os quais estão relacionados com os resultados obtidos no experimento de intercomparação dos receptores GPS. O receptor utilizado em ABRA (ZXII) foi o que apresentou a tendência de superestimar a umidade, enquanto o utilizado em PTVE (LEG2) apresentou uma tendência de subestimar. O segundo fator está relacionado ao fato do receptor ZXII ter apresentado uma maior susceptibilidade às perturbações dos efeitos da Ionosfera nos sinais GPS do que o LEG2, como discutido na análise dos indicadores de qualidade em função das horas do dia (seção 4.1.2). Como o efeito da Ionosfera nos sinais GPS apresentou-se bastante significativo durante o experimento, essa susceptibilidade pode ter influenciado os resultados gerados por esse receptor.

Com relação às diferenças nos valores do viés em GJMI e PTVE, a causa mais provável é o efeito do multicaminho [maiores detalhes sobre esse efeito podem ser obtidos em HOFMANN-WELLENHOF et al.(2001)] na recepção dos sinais GPS, pois como os receptores usados nessas estações foram idênticos, os quais geraram resultados bastante similares no experimento de intercomparação, o problema estaria associado com o local onde foram instalados. Para verificar essa possibilidade, os valores do multicaminho foram calculados utilizando o software TEQC (*Translation Edit Quality Check*) (ESTEY e MEERTENS, 1999). A figura 17 mostra os valores médios do multicaminho, nas duas portadoras (L1 e L2), para intervalos de 5 minutos (dia 22/10/2002).



Figura 17 – Valores médios do multicaminho na L1 (a) e L2 (b) em intervalos de 5 minutos para o dia 22/10/2002 nas estações GPS do RACCI.

Observa-se na figura 17 que apesar dos valores terem sido similares durante grande parte do dia, houve um período onde os valores do multicaminho em GJMI foram bastante elevados, tanto na L1, onde foram mais freqüentes, quanto na L2, onde os valores foram mais intensos. Esse período encontra-se no início do dia e coincide com o período de mínima da atividade ionosférica e onde a RS80 apresenta menor tendência em subestimar a umidade. Como conseqüência disso, o valor do viés em GJMI permaneceu relativamente alto durante esse período, enquanto nas demais estações foi bastante reduzido. Com relação às radiossondas lançadas às 6:00 UTC o valor do viés em GJMI foi de +2,28 kg m⁻², enquanto em ABRA foi +1,14 kg m⁻² e em PTVE foi -0,23 kg m⁻². Por isso, o viés diurno da RS80 foi menos perceptível em GJMI do que nas demais estações, pois nessa estação o valor desse viés foi -1,61, enquanto nas demais ficou acima de -2,0 kg m⁻².

4.2.3.2 Análise de dispersão dos valores IWV-GPS versus IWV-RS80

O ponto que mais chama a atenção na figura 14 é e grande dispersão entre os valores do IWV-GPS e os gerados pelas radiossondas, principalmente nas estações ABRA e GJMI (EMQ de 4,0 kg m⁻² em ambas). Os valores do IWV da estação PTVE apresentaram menor dispersão (EMQ foi de 2,9 kg m⁻²), mas o r (de 0,79) revela que a correlação entre os valores comparados nessa estação é pior do que nas demais (r de 0,86 e 0,90 em ABRA e GJMI, respectivamente).

Os valores da incerteza esperada na comparação IWV-GPS e IWV-RS80 (apresentados na tabela 13) são capazes de explicar apenas uma pequena parte da dispersão observada na figura 14. A razão provável desse fato é que o resíduo da modelagem ionosférica no experimento de intercomparação dos receptores GPS não foi considerado, pois devido à proximidade entre os receptores, a influência da Ionosfera foi idêntica, e por isso cancelada na comparação. Se forem consideradas somente as radiossondas lançadas durante o período de baixa atividade ionosférica (radiossondas lançadas às 6:00 UTC) os valores presentes na tabela 13 são capazes de explicar quase toda a dispersão gerada (EMQ em torno de 2,30, 3,10 e 1,10 nas estações ABRA, GJMI e PTVE, respectivamente). Na estação GJMI, o efeito de multicaminho é a causa provável dos valores do EMQ terem sido maiores do que a incerteza esperada nessa circunstância. As incertezas apresentadas na tabela 13 proporcionam uma boa estimativa da incerteza esperada na comparação dos valores do IWV entre receptores e radiossondas na região Amazônica sob circunstâncias de baixa atividade ionosférica e reduzido multicaminho.

Os valores do desvio padrão foram similares nas três estações do RACCI (em torno de 4,5 % ou 2,3 kg m⁻²) e relativamente melhores do que os apresentados em trabalhos anteriores. Emardson et al. (2000), usando 1.726 radiossondas lançadas em regiões da Europa

(valor médio do IWV de 20 kg m⁻²), encontraram um desvio padrão de 7,5 % (1,5 kg m⁻²). Na figura 16 pode-se notar que para as diferentes horas de lançamento das radiossondas os valores do desvio padrão permanecem constantes (em torno de 2 kg m⁻²), mesmo sobre alta atividade ionosférica. Esse resultado é importante, porque o desvio padrão está associado com os erros estocásticos. Esse valor reduzido indica que a metodologia empregada na quantificação do IWV a partir das radiossondas e dos receptores GPS foi apropriada. É claro que os valores do viés, os quais estão associados com erros sistemáticos (como o efeito do multicaminho, efeitos da alta atividade ionosférica e outros não modelados adequadamente), afetam significativamente os valores do EMQ. Na ausência desses efeitos, os valores do EMQ devem ser similares aos valores do desvio padrão, e, conseqüentemente, muito próximos da incerteza esperada nessa comparação.

5 POTENCIALIDADE DE USO DOS VALORES DO IWV-GPS NO BRASIL

A quantificação do vapor d'água atmosférico tem especial relevância para a previsão de tempo, pois o comportamento dessa variável está correlacionado com a ocorrência de diversos fenômenos atmosféricos. Por isso, nos países aonde as redes ativas de receptores GPS já vem sendo exploradas para o monitoramento do IWV, a principal aplicação é na PNT (ZOU et al., 1996; KUO et al., 1996; REIGBER et al., 2001; CUCURULL et al., 2001). Associado a isso, os valores do IWV-GPS possuem uma característica que nenhuma outra técnica apresenta: a alta resolução temporal com custo relativamente baixo. Essa alta resolução temporal integrada aos resultados de outras técnicas pode gerar produtos com grande potencial para as Ciências Atmosféricas. Nesse capítulo pretende-se destacar as potencialidades dos valores do IWV obtidos com o emprego das redes ativas de receptores GPS no Brasil. Para isso, são apresentados os resultados dos primeiros experimentos de assimilação no modelo de PNT do CPTEC, um estudo sobre a operacionalização do processo de assimilação desses valores utilizando tais redes e uma investigação sobre o potencial dessas redes para aplicações que necessitem informações da umidade na atmosfera com alta resolução temporal.

5.1 Assimilação dos valores do IWV-GPS no modelo de PNT do CPTEC

O vapor d'água atmosférico é responsável pelo transporte de boa parte da energia da superfície para os níveis mais elevados da atmosfera, absorvendo o calor latente de evaporação na superfície e liberando-o na alta troposfera. Portanto, conhecer sua distribuição auxilia na determinação do estado da atmosfera de forma mais realística, o que é bastante importante para a PNT.

Os valores que quantificam a umidade na atmosfera advêm de medidas relativamente onerosas e por isso escassas em diversas partes do globo. A solução que se apresenta mais eficaz ao minimizar essa escassez é a utilização de satélites sondadores de umidade. Com eles se obtêm boa resolução espacial e cobertura global, fatores bastante relevantes para a assimilação em modelos de PNT. Entretanto, a disponibilidade de informações independentes, como os valores do IWV-GPS, tem também significativa contribuição nesse processo. Sendo várias as fontes de informações, evita-se a dependência do processo de uma ou outra técnica, minimizando os prejuízos causados pela eventual descontinuidade das informações, fator que também é bastante relevante no processo de assimilação da PNT.

Nessa seção é investigada a operacionalização da assimilação dos valores do IWV obtidos a partir de redes de receptores GPS de coleta contínua no Brasil. Para isso são apresentados detalhes sobre o sistema de assimilação e o modelo de PNT do CPTEC, resultados de um experimento onde valores do IWV-GPS foram assimilados e uma avaliação da qualidade das estimativas do IWV-GPS obtidas quase que em tempo real.

5.1.1 Modelo de PNT e o sistema de assimilação de dados do CPTEC

Segundo Kalnay (2003), dois componentes básicos são necessários na PNT. O primeiro é uma condição inicial da atmosfera que represente da forma mais fiel possível o seu estado em um dado instante. O segundo é um modelo baseado nas leis físicas que governam o movimento dos fluídos na atmosfera de modo que possa ser integrado no tempo através de um processo numérico. O responsável pelo primeiro componente é o sistema de assimilação e pelo segundo o Modelo de Circulação Geral (MCG). A eficiência do MCG ao gerar previsões confiáveis depende demasiadamente do primeiro componente desse processo. Gerar uma condição inicial realística depende, por sua vez, da disponibilidade de observações meteorológicas provenientes de fontes convencionais (estações meteorológicas de superfície e de altitude) ou não convencionais (satélites em geral).

Apesar de atualmente existirem diversos centros de previsão de tempo com modelos de PNT sendo executados operacionalmente, são poucos aqueles que possuem sistemas de assimilação funcionando nas mesmas condições. Freqüentemente, executa-se o modelo de PNT utilizando a condição inicial gerada nos grandes centros de previsão, como o NCEP e o ECMWF.

A operacionalização de um sistema de assimilação representa a autonomia da PNT e é um grande desafio que vem sendo enfrentado pelo CPTEC. Desde 2002 (HERDIES et al., 2002), está em fase de teste a adaptação e implementação do sistema de assimilação de dados do CPTEC, baseado no *Physical-space Statistic Analysis System* (PSAS) (DA SILVA e GUO, 1996; COHN et al., 1998), desenvolvido no *Data Assimilation Office / National Aeronautics and Space Administration* (DAO/NASA). Atualmente, esse sistema de assimilação, denominado de PSAS-CPTEC, encontra-se operacional, apesar da quantidade de dados
assimilados ser menor do que a quantidade disponível, principalmente no que se refere aos dados de satélites obtidos na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do CPTEC.

O MCG em uso no CPTEC tem sua origem em um modelo usado pelo (NCEP) (CPTEC, 2005). Operacionalmente, a previsão numérica de tempo iniciou-se no CPTEC em 1994, tendo sido implementada uma versão do MCG modificada pelo *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA), com adaptações às necessidades operacionais do CPTEC. Essa versão foi denominada CPTEC/COLA. Atualmente, esse modelo é executado operacionalmente nas resoluções T62L28, T126L28 e T213L42, em que L se refere ao número de camadas na vertical e T, à resolução horizontal; T62, T126 e T213 equivalem a resoluções aproximadas, próximo à linha do Equador, de 200x200 Km, 100x100 Km e 63x63 Km, respectivamente. O período de integração (período para o qual as previsões se destinam) é de quinze dias para as duas primeiras resoluções e 7 dias para a última, com as previsões sendo geradas para os horários sinóticos.

O modelo regional atualmente em operação no CPTEC é o modelo ETA (BLACK, 1994), que possui uma resolução horizontal de 40 km com 38 camadas no perfil vertical, cujo domínio cobre a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. As previsões são geradas duas vezes ao dia, uma com condição inicial às 0:00 e outra às 12:00 UTC. A condição inicial utilizada é proveniente da *análise* do NCEP e as condições de contorno lateral são provenientes das previsões do modelo global do CPTEC e atualizadas a cada 6 horas. A integração desse modelo é de 7 dias. Há uma outra versão semelhante a essa, porém utiliza a *análise* gerada pelo PSAS regional. Encontra-se em fase experimental uma versão com resolução horizontal de 20 km.

Para a inclusão de dados no modelo de PNT do CPTEC utiliza-se a técnica denominada assimilação intermitente de dados (HERDIES et al., 2004) que consiste em um

procedimento cíclico (rodada⁹), em que os resultados de uma integração curta, tipicamente de 6 horas, são usados como uma estimativa inicial (*first guess - FG*), a qual combinada com as últimas observações disponíveis, formam o estado inicial da atmosfera a ser utilizado na próxima integração do modelo. O resultado da combinação do FG com as observações assimiladas é comumente denominado "*análise*", a qual, estatisticamente, é o estado ótimo que melhor representa a realidade física dada as limitações da resolução numérica dos modelos. Essa combinação é utilizada como condição inicial para a integração do modelo físico (MCG). A obtenção de uma condição inicial realística é um dos maiores e mais importantes problemas associados à previsão de tempo (LORENC, 1986).

Na figura 18 é apresentado um diagrama que ilustra o fluxo de dados em uma rodada cíclica do processo de PNT do CPTEC. Note-se que os dados observacionais assimilados constituem o único conjunto de dados externo ao ciclo. Todos os demais são produzidos internamente, exceto no início do processo, no qual além dos dados observacionais, necessita-se de um *first-guess* gerado por um outro modelo de PNT. Para mais informações sobre o fluxo de dados nesse processo deve-se consultar Ferreira (2003).



Figura 18 – Diagrama ilustrativo do fluxo de dados em uma rodada cíclica na versão global do modelo de PNT do CPTEC.

⁹ Na Previsão Numérica de Tempo é utilizado o termo "rodada" ao se referir a uma execução cíclica do modelo de PNT, ao fazer alusão ao movimento completo de uma roda. Esse termo também será utilizado no presente trabalho, devido ao seu aspecto prático.

5.1.2 Experimento de assimilação do IWV-GPS no Brasil

Para o experimento de assimilação dos valores do IWV-GPS no modelo de PNT do CPTEC, o ideal seria empregar os resultados advindos das estações da RBMC. No entanto, devido à ausência de valores de temperatura e pressão para a conversão dos valores do Z_{TD} em IWV nessas estações, optou-se em utilizar os dados gerados na campanha RACCI. Tratam-se dos mesmos dados que foram utilizados na seção 4.2 para a validação dos valores do IWV-GPS na região Amazônica. O fato de ter sido realizada uma validação desses dados, ao comparar com outras técnicas, também pesou nessa escolha, pois com isso foi evitado que valores espúrios fossem utilizados. O objetivo desse experimento é evidenciar que com a assimilação dos valores do IWV-GPS no PSAS-CPTEC pode-se obter uma condição inicial que melhor represente a realidade física do ponto de vista do vapor d'água integrado na atmosfera. Para isso, são realizadas comparações das condições iniciais obtidas com e sem a assimilação dos valores do IWV-GPS.

5.1.2.1 Valores IWV-GPS disponíveis e metodologia utilizada na assimilação

A metodologia utilizada na obtenção dos valores do IWV-GPS nas estações do RACCI foi apresentada na seção 4.2. Na escolha do período utilizado no experimento de assimilação foram excluídos aqueles em que houve falhas na coleta de dados de superfície em uma das três estações GPS do RACCI (ABRA, GJMI ou PTVE). Tanto na estação ABRA, quanto em GJMI, houve descontinuidade na coleta das medidas de pressão atmosférica e temperatura. A exclusão desses períodos foi feita para garantir a boa qualidade dos valores assimilados. Com isso, o período em que foi realizado o experimento abrange apenas 6 dias, do dia 25 (às 0:00 UTC) ao dia 30 (às 18:00 UTC) de setembro de 2002. Apesar dos valores

estarem disponíveis com uma taxa de 5 minutos, somente aqueles que se referiam aos horários sinóticos foram efetivamente utilizados nesse processo, em um total de 24 valores assimilados em cada uma das 3 estações GPS do RACCI.

O sistema de assimilação utilizado nesse experimento foi o PSAS (versão 2003). Essa versão conta com algumas correções de imperfeições existentes nas versões anteriores e um sistema de execução paralelizado, o que diminui o tempo de processamento. A versão global, denominada GPSAS, foi utilizada nesse experimento, pois a versão regional (RPSAS) encontra-se ainda em fase de testes.

Inicialmente foi rodado o modelo MCG sem a inclusão dos valores IWV-GPS com o objetivo de verificar as diferenças geradas pela assimilação desses dados. Essa rodada, denominada controle, teve início no dia primeiro de setembro de 2002, com o período total de 30 dias. Para essa rodada foram disponibilizados para o sistema de assimilação valores de diversas variáveis com abrangência global e de diferentes fontes. Tais arquivos foram cedidos pelo DAO-NASA, já no formato ODS (*Observation Data Stream*) (REDDER e DA SILVA, 2001), que é uma estrutura específica para disponibilizar informações destinadas à assimilação em modelos de PNT. Os dados disponibilizados para esse processo foram:

Temperatura proveniente dos satélites NOAA, do tipo ATOVS [*Advanced TIROS* (*Television Infrared Observation Satellite*) Operational Vertical Sounder] (FERREIRA et al., 2004) e convertidos em valores de altitude geopotencial;

Medidas das componentes zonal e meridional do vento sobre os oceanos, provenientes do satélite Titan II, missão QuickScat (*Nasa's Quick Scatterometer*);

Água precipitável do SSM/I (*Special Sensor Microware/Imager*) do Programa RSS
(*Remote Sensing Systems*) da NASA (LEDVINA e PFAENDTNER, 1995);

 Valores de altitude geopotencial, temperatura, pressão, umidade específica, vento zonal e meridional proveniente do GTS (*Global Telecommunication System*). Devido à descontinuidade dos dados dentro do período avaliado, em alguns horários as informações disponíveis foram bem distribuídas sobre a América do Sul enquanto que em outros foram bastante escassas. A figura 19 mostra, através de um esquema de cores, a distribuição espacial das informações disponíveis para a *análise* do dia 26/09/2002 às 12:00 UTC, e a figura 20 para o caso da *análise* das 18:00 UTC do mesmo dia. As observações assimiladas foram aglomeradas em células de 3x3° (caixas nas figuras 19 e 20) independente do nível a que se referem, da origem e do tipo de informação. A figura 19 é um exemplo de razoável cobertura de dados sobre a América do Sul, enquanto a figura 20 exemplifica o caso contrário. Como a análise dos resultados é feita a partir do campo de IWV, a figura 21 apresenta um campo típico dessa variável para o período em que foi feito o experimento, com o objetivo de mostrar a distribuição espacial do vapor d'água atmosférico.



Figura 19 – Concentração das informações assimiladas pelo GPSAS na rodada de controle para a *análise* das 12:00 UTC do dia 26/9/2002.



Figura 20 - Concentração das informações assimiladas pelo GPSAS na rodada de controle para a *análise* das 18:00 UTC do dia 26/9/2002.



Figura 21 – Diagrama de cores do campo de IWV sobre a América do Sul da *análise* gerada para as 18:00 UTC do dia (27/9/2002) na rodada de controle do GPSAS-CPTEC.

Para verificar o comportamento dos resultados gerados na rodada de controle com relação aos valores observados, na figura 22 são apresentados ambos os valores em função do tempo, nas 3 estações do RACCI. Os valores são pontuais e por motivos óbvios as posições dos pontos considerados nessa análise são as mesmas das estações GPS do RACCI. A comparação é feita para facilitar a análise da contribuição gerada com a assimilação dos valores do IWV-GPS.



Figura 22 – Valores do IWV da *análise* gerada na rodada de controle e a série temporal do IWV-GPS nas 3 estações do RACCI.

Os valores apresentados na figura 22 mostram que a rodada de controle tende a subestimar a umidade na região onde estão localizadas as estações do RACCI, com períodos

onde essa tendência se acentua e poucos onde ela se anula. Em uma análise mais minuciosa dessa tendência nas diferentes estações pode-se observar que:

- Na estação ABRA, no início do período, as discrepâncias são pequenas e oscilam entre valores positivos e negativos até no dia 26 às 12:00 UTC. A partir das 18:00 UTC do dia 26 em diante as discrepâncias ficam maiores, e o controle apresenta a tendência de subestimar a umidade. O pico das discrepâncias chega a 17 kg m⁻² às 6:00 UTC do dia 27;
- Na estação GJMI, o período onde as discrepâncias são oscilantes é mais prolongado do que em ABRA, chegando até na metade do período total avaliado. Na segunda metade do período há uma tendência similar à observada em ABRA, porém mais discreta;
- Na estação PTVE, apesar de menor no início, o controle apresenta uma tendência em subestimar a umidade em todo o período, com exceção de apenas uma época: às 12:00 UTC do dia 26. O comportamento dos valores do IWV gerados pela rodada de controle, com relação às observações, é semelhante ao verificado na estação ABRA, inclusive o valor do pico das discrepâncias às 6:00 UTC do dia 27.

A versão atual do PSAS-CPTEC não está apta a assimilar os valores diretos do IWV provenientes de estações terrestres, apenas os provenientes de satélites sobre superfícies oceânicas. Para que isso seja possível no futuro, novas classes de observações atmosféricas estão sendo implementadas. Nesse processo, a incerteza dos valores do IWV-GPS, obtidas nesse trabalho (seção 4.2), será utilizada para compor uma matriz de variância e covariância (MVC) específica para esse tipo de observação. Por esse motivo, a assimilação dos valores do IWV-GPS foi efetuada ao empregar uma técnica que envolve os chamados *pseudo-temps* (DE MATTOS, 2005). Os *pseudo-temps* são perfis das variáveis prognósticas retirados da condição inicial de um modelo de PNT e assimilados em outros, com o objetivo de suprir a ausência de informações em determinadas áreas do globo. Esses perfis são também conhecidos como *pseudo-observed* (REIGBER et al., 2001).

Com a utilização dos *pseudo-temps*, os valores do IWV-GPS foram assimilados no GPSAS em um processo cíclico, iniciando na rodada das 0:00 UTC do dia 25/9/2002, da seguinte forma:

- A partir do arquivo do *first guess* destinado a essa primeira rodada, o qual foi gerado na rodada das 18:00 do dia 24/9/2002 (controle), foram retirados os valores das variáveis prognósticas do modelo para as coordenadas das 3 estações GPS do RACCI. Nesse processo foram obtidos perfis de umidade específica (q), temperatura virtual (Tv) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, além de valores de temperatura (Ts), pressão (Ps) e altitude geopotencial (hg) na superfície;
- Os perfis foram limitados inferiormente para a altitude de cada estação, e os valores de q, Tv, u e v foram interpolados para essas altitudes considerando o valor da pressão na superfície;
- O perfil atmosférico de 28 níveis, proveniente do *First Guess*, foi convertido para os 15 níveis pré-definidos, onde as observações são assimiladas pelo PSAS;
- 4. Os valores da temperatura virtual foram convertidos em temperatura e valores da umidade específica foram utilizados para obter um perfil de razão de mistura (*Rm*);
- 5. Com os valores de razão de mistura foram obtidos os valores do IWV e as suas parcelas em cada uma das 15 camadas consideradas pelo modelo;
- 6. Foram calculados os valores percentuais da distribuição vertical do IWV no perfil. Os valores do IWV-GPS foram distribuídos no perfil vertical segundo essas percentagens;
- As parcelas do IWV-GPS distribuídas no perfil foram convertidas em valores de *Rm* e temperatura do ponto de orvalho (*Td*);
- Foi montado um arquivo no mesmo formato dos dados provenientes de uma radiossonda (*pseudo-temps*) contendo o perfil de *Td*, *Rm* (ambos modificados pela inclusão do IWV-GPS) e demais dados extraídos do *First Guess*.

 Essas pseudo-radiossondas foram convertidas para o formato ODS e assimiladas no GPSAS, rodando em seguida o MCG. Com o *First Guess* gerado nessa rodada retorna-se à etapa 1, fechando o processo cíclico.

Com a utilização dessa metodologia, os valores do IWV-GPS foram assimilados, bem como os dados disponíveis para a rodada de controle. Como a assimilação dos valores IWV-GPS foi a única diferença entre essa rodada e a de controle, ao comparar as *análises* obtidas em ambas, pode-se verificar o impacto gerado nos resultados pela inclusão desses valores.

5.1.2.2 Análise dos resultados obtidos

A análise dos resultados gerados pela inclusão dos valores do IWV-GPS foi feita de duas formas: uma primeira pontualmente e uma outra através do campo de valores do IWV provenientes das *análises* geradas pelo modelo para o território brasileiro. Na pontual, os valores do IWV-GPS assimilados (considerados nessa análise a "verdade") foram comparados com os valores gerados na rodada de controle e com os gerados na rodada com assimilação IWV-GPS, similar a comparação feita na figura 22. Na figura 23 os valores gerados na rodada de controle e na rodada com a assimilação dos valores IWV-GPS apenas na estação ABRA são comparação, os valores do IWV-GPS nas estações GJMI e PTVE são utilizados como valores independentes na avaliação da contribuição dos valores IWV-GPS assimilados apenas na estação ABRA.



Figura 23 – Valores do IWV gerados nas rodadas de controle e na rodada com assimilação IWV-GPS somente em ABRA comparados com a série temporal do IWV para as 3 estações do RACCI.

Numa análise superficial dos valores apresentados na figura 23, observa-se que nas estações GJMI e PTVE, a rodada com a assimilação dos valores do IWV-GPS apenas em ABRA gerou na maioria das épocas consideradas uma condição inicial mais próxima dos valores observados do que na rodada de controle. Em uma análise por estação verifica-se que:

- Em ABRA, onde foram assimilados os valores do IWV-GPS, observa-se que no período inicial, em que as discrepâncias entre os valores do controle e as observações foram pequenas, a contribuição dos valores assimilados foi modesta. Porém, no período onde essas discrepâncias eram elevadas e havia a tendência do controle em subestimar a umidade, a contribuição dos valores assimilados foi muito significativa. As discrepâncias entre os valores observados e os gerados na rodada com a assimilação do IWV-GPS foram reduzidas drasticamente com relação às discrepâncias geradas na rodada de controle, principalmente durante o dia 27.

- Em GJMI, as diferenças entre os valores gerados na rodada com a assimilação do IWV-GPS em ABRA e os da rodada de controle no início do período avaliado foram muito pequenas (dias 25 e 26). No entanto, durante o dia 27 a contribuição da assimilação dessa observação foi negativa, gerando valores maiores do que os observados nessa estação, em conseqüência dos valores elevados do IWV assimilados em ABRA nesse período. Por outro lado, nos dias posteriores ao dia 27, a contribuição foi positivamente muito expressiva, fazendo com que a análise resultante se aproximasse da verdade nessa estação;
- Em PTVE, na maioria das épocas avaliadas, a contribuição da assimilação do IWV-GPS em ABRA foi positiva, gerando valores mais corretos do que os valores observados do que a rodada de controle. Em 6 épocas, a assimilação do IWV-GPS em ABRA não foi sentida na estação de PTVE, e em apenas 2 a contribuição foi ligeiramente negativa (dia 25 às 18:00 e dia 26 às 0:00 UTC).

A contribuição significativamente negativa verificada na estação GJMI pela assimilação do IWV-GPS apenas em ABRA poderia ser menor se o número de valores assimilados fosse maior e mais próximo dessa estação. A distância entre essas duas estações é de aproximadamente 300 km. Por isso, uma outra rodada foi realizada, onde os valores do IWV-GPS foram assimilados nas 3 estações do RACCI. Na figura 24 são comparados os valores gerados na rodada de controle e na rodada com a assimilação dos valores IWV-GPS nas 3 estações do RACCI com a série temporal dos valores IWV-GPS.



Figura 24 – Valores do IWV gerados nas rodadas de controle e na rodada com assimilação IWV-GPS nas 3 estações do RACCI comparados com a série temporal do IWV.

Analisando os valores mostrados na figura 24 com relação à estação GJMI, observase que a contribuição negativa gerada pela assimilação dos valores do IWV-GPS apenas em ABRA (figura 23) foi minimizada pela inclusão do valor observado nessa estação. Por outro lado, em outros pontos, pequenas imperfeições surgiram. Como se trata de um modelo não linear,essas imperfeições são decorrentes do período inicial de ajuste para adequar as novas observações. Em uma análise mais minuciosa, os seguintes aspectos podem ser destacados:

 Em ABRA, os benefícios obtidos com a assimilação do IWV-GPS apenas nessa estação foram mantidos quando assimilados os valores nas demais estações, com exceção das duas primeiras épocas consideradas e às 12:00 UTC do 26 e 29, onde é observada uma contribuição ligeiramente negativa da assimilação dos novos valores;

- Em GJMI, os erros gerados pela assimilação do IWV-GPS apenas em ABRA foram corrigidos em alguns pontos e minimizados em outros, e os benefícios foram mantidos. A diferença mais significativa foi no início do período avaliado, onde os resultados do modelo com assimilação foram mais próximos do observado nessa estação. Esse ajuste é responsável pelas pequenas imperfeições que surgiram na estação ABRA, no início do período;
- Em PTVE, quase que em todas as épocas, houve uma pequena melhora nos resultados com a assimilação dos valores do IWV-GPS. Com exceção das duas primeiras épocas onde os resultados foram piores do que os obtidos com a assimilação do IWV-GPS apenas em ABRA. Isso é devido à influência dos valores assimilados em GJMI, como o ocorrido em ABRA.

Como os valores IWV-GPS assimilados nas 3 estações tornaram-se correlacionados pela ação do PSAS, uma avaliação em termos do campo do IWV gerado pode mostrar a contribuição resultante da combinação dos valores nele incluídos. Nessa avaliação, o campo dos valores do IWV da condição inicial gerada na rodada com a assimilação dos valores do IWV-GPS foi subtraído do campo de IWV da *análise* gerada pela rodada de controle. Com isso foi gerado um campo contendo as diferenças nos valores do IWV, que expressam o impacto da inclusão dos valores do IWV-GPS nos resultados do modelo. Dos campos gerados no período avaliado, os dois últimos dias (29 e 30/9/2002) foram os mais significativos, como já observado nas análises anteriores. Na figura 25 são mostrados, através de diagrama de cores, os campos para as 4 rodadas do dia 29/9/2002 e na figura 26 para o dia 30/9/2002.



Figura 25 – Diagrama de cores mostrando a diferença (rodada com a assimilação menos o controle) dos campos do IWV sobre o território brasileiro para a *análise* gerada na rodada das (a) 0:00 UTC, (b) 6:00 UTC, (c) 12:00 UTC e (d) 18:00 UTC do dia 29/9/2002 (valores em kg m⁻²).

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia



Figura 26– Diagrama de cores mostrando a diferença (rodada com a assimilação do IWVGPS menos o controle) dos campos do IWV sobre o território brasileiro para a *análise* gerada na rodada das (a) 0:00 UTC, (b) 6:00 UTC, (c) 12:00 UTC e (d) 18:00 UTC do dia 30/9/2002 (valores em kg m⁻²).

Nos campos do IWV mostrados nas figuras 25 e 26 nota-se que a inclusão dos valores do IWV-GPS foi capaz de influenciar significativamente os campos de umidade sobre

regiões da Amazônia brasileira e boliviana (figura 25a, 25b e 25c), bem como a região Centro-Oeste (figura 26a e 26b), Sudeste (figura 25d e 26d) e até a região Sul (figura 25d), porém essa última de forma sutil. A inclusão dos valores do IWV-GPS gera também pequenas oscilações sobre praticamente todos os campos do IWV apresentados nas figuras 25 e 26, as quais são desconsideradas nessa análise.

Um fato bastante relevante mostrado nos campos do IWV gerados nesse experimento é que os valores assimilados no dia 30/9/2002 (figura 26) foram bem mais úmidos do que os da rodada de controle, e para o PSAS adequar o campo do IWV da *análise* aos valores do IWV-GPS assimilados foi preciso secar drasticamente regiões próximas (figura 26a a 26d). Para manter o equilíbrio de massa, a umidade foi deslocada para a região onde os valores foram assimilados. A região escolhida (norte da região Centro-Oeste do Brasil) foi provavelmente a mais próxima que permitiu um ajuste para as observações assimiladas. Como nessa região não foram assimilados valores de umidade, é provável que tenha sido gerada uma subestimativa dessa variável nesses locais com a inclusão dos valores IWV-GPS. Esse resultado evidencia a importância da boa resolução espacial das observações a serem assimiladas na PNT.

5.1.2.3 Comentários adicionais

A utilização da versão regional do sistema de assimilação, ao invés da global, pode determinar de forma mais precisa a contribuição obtida com a inclusão do IWV-GPS. Na grade do modelo global utilizado, os pontos são equidistantes por aproximadamente 100 km (no equador), enquanto o modelo regional essa distância é de 40 km para a versão operacional no CPTEC, ou 20 km em uma versão que se encontra em fase de teste. Com as resoluções do modelo regional, pequenas concentrações de umidade podem ser mais bem dimensionadas e

localizadas espacialmente. Isso é relevante para a assimilação dos valores de umidade devido à sua alta variação temporal e espacial. No entanto, isso também requer valores do IWV com resolução espacial compatível com a do modelo. Para os valores do IWV-GPS, isso resultaria na necessidade de uma densificação das redes ativas de receptores.

Uma limitação da versão atual do GPSAS-CPTEC é o número de níveis em que as informações são assimiladas na baixa troposfera. Tais níveis são pouco densos nessa camada, na qual se concentra a maior parte do vapor d'água atmosférico. Ao interpolar o perfil de razão de mistura proveniente do *Fisrt Guess* para esses níveis, os valores do IWV resultante são diferentes, pois não é possível representar adequadamente o perfil original com os valores obtidos na interpolação. Na figura 27 são mostrados ambos os perfis para destacar o fato citado. Esse número de níveis em que as informações são assimiladas no GPSAS tem sido um gargalo do processo, e uma nova versão com um número maior de níveis na troposfera está sendo implementada. A utilização de um modelo regional provavelmente resolveria o problema, pois nesse caso o número de níveis em que as informações são assimiladas é 38, enquanto na versão global é 15.

A inclusão dos valores de IWV-GPS na forma original, ao invés de perfis de umidade, tornaria o processo de assimilação mais eficiente, pois dessa forma não há a necessidade de um pré-processamento como o realizado nesse experimento. Com isso, a distribuição dos valores do IWV-GPS no perfil atmosférico seria feita internamente no sistema de assimilação, da forma como foi descrita na seção 2.4.1. Além disso, a incerteza desses valores seria considerada no processo de assimilação, tornando-o mais robusto estatisticamente. Pelo fato de os valores do IWV-GPS terem sido assimilados como se fossem radiossondas, a incerteza desses valores foi considerada pequena, o que ajudou a evidenciar a sua contribuição na condição inicial gerada. Como não houve modificação na distribuição vertical da umidade, mantendo as proporções do perfil do *First Guess*, e como os valores do

IWV-GPS são compatíveis com os gerados a partir das radiossondas, a metodologia aqui aplicada é válida, apesar de menos prática que assimilar o IWV de forma direta.



Figura 27 – Perfil de razão de mistura original do *First Guess* e o perfil interpolado para os 15 níveis em que as informações são assimiladas no GPSAS.

Atualmente, no Brasil, a alta resolução temporal dos valores do IWV-GPS não pode ser explorada pelos sistemas de assimilação existentes. No entanto, com as versões em fase de implementação, envolvendo filtragem de Kalman, valores com resolução temporal de 30 minutos poderão ser assimilados em um processo contínuo. Esse processo apresenta grande potencial em melhor representar o estado inicial da atmosfera, e assim contribuir com a melhoria dos resultados da previsão de tempo.

5.1.3 Estimativas do IWV-GPS em tempo real

Para que seja obtida maior eficiência ao descrever o estado inicial da atmosfera terrestre, o maior número possível de informação sobre as variáveis atmosféricas deve ser

126

disponibilizado ao sistema de assimilação no momento em que ele é inicializado. Nisso está envolvido o que é conhecido por "latência" das informações. A latência pode ser definida como o período compreendido entre o instante em que uma informação está disponível para um determinado processo e o instante ao qual ela se refere. No caso das informações para a PNT, os fatores responsáveis pela latência estão relacionados com o tempo necessário para a coleta, o armazenamento e a transferência dos dados das estações coletoras para os centros de previsão de tempo. Para o caso dos valores do IWV-GPS, além dos fatores já mencionados, existe também o tempo necessário para o processamento dos dados para obter as estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real (ROCKEN et al., 1997b). Para que tais valores tenham a menor latência, é necessário que o processamento seja otimizado, de forma que o melhor resultado seja obtido com o menor custo computacional (SAPUCCI et al., 2005c). Para atingir essa otimização, deve-se definir qual é o tamanho ideal da chamada janela deslizante (do inglês *sliding window*) de dados GPS envolvidos no processo. Ela deve ser a menor possível e que forneça o melhor resultado. O objetivo dessa seção é avaliar a qualidade das estimativas em tempo real e identificar qual é o tamanho ideal da janela deslizante que otimize o processo de obtenção de tais estimativas.

5.1.3.1 Experimento para avaliação do tamanho ideal da janela deslizante de dados GPS

Para determinar o tamanho ideal da janela deslizante de dados, realizou-se um experimento onde diferentes tamanhos foram testados. Os critérios utilizados para a avaliação dos diferentes casos testados estão relacionados com a otimização do processo, ou seja, melhor qualidade com o menor tempo de processamento (menor latência). Na avaliação da qualidade, os resultados obtidos numa simulação de um processamento em tempo real são comparados com valores obtidos no pós-processamento.

Os dados GPS utilizados nesse experimento são provenientes da estação UEPP, (já descrita na seção 4.1.2). O receptor foi configurado para disponibilizar as observações GPS em arquivos contendo uma hora de dados. O período de coleta dos dados utilizados foi de 1°/6/2004 a 30/6/2004.

As efemérides utilizadas na simulação do processamento em tempo real foram as do tipo ultra-rápida produzida pelo JPL. Essas efemérides diferem das fornecidas por outros centros em dois aspectos. Elas não apresentam predição para épocas futuras àquela em que foram disponibilizadas e as coordenadas dos satélites e o erro do relógio são disponibilizados com uma taxa de 5 minutos. Para o pós-processamento dos dados as efemérides utilizadas foram as do tipo precisa, também produzidas pelo JPL.

O software utilizado para o processamento dos dados GPS, tanto em tempo real como pós-processados, foi o GOA-II (GREGORIUS, 1996). A configuração empregada é a mesma utilizada na seção 4.1.2 (tabela 11), apenas as efemérides precisas foram substituídas pelas efemérides ultra-rápidas para o processamento quase que em tempo real. Para a conversão dos valores do ZTD em valores do IWV foram utilizados valores constantes para a Tm e para o Z_{HD} , da mesma forma e pelos mesmos motivos apresentados no experimento de intercomparação de receptores GPS (seção 4.1.2). Os tamanhos da janela testados nesse experimento foram de 1, 3, 6 e 12 horas de dados GPS.

A metodologia utilizada nesse experimento consiste basicamente no processamento de um conjunto de dados de diferentes tamanhos, utilizando efemérides ultra-rápidas, e comparando com os resultados obtidos com o processamento convencional pós-processado usando efemérides precisas e arquivos de dados de 24 horas. Esse procedimento pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Os arquivos de dados GPS no formato RINEX contendo observações coletadas num período de uma hora foram concatenados formando arquivos maiores. Com isso, foram gerados 24 arquivos por dia para cada uma das janelas avaliadas;
- Para simular o processamento em tempo real, as efemérides ultra-rápidas obtidas via ftp (do endereço: *sideshow.nasa.gov.br*) foram organizadas de forma que, para o processamento de cada um dos arquivos obtidos na etapa 1, elas contivessem as mesmas características da versão obtida em tempo real;
- 3. Para as diferentes janelas de dados consideradas foi feito um processamento utilizando as efemérides ultra-rápidas do JPL. Um processo automático foi implantado para que fossem processados todos os 30 dias considerados na campanha, gerando um total de 720 processamentos para cada uma das janelas testadas;
- Os valores do Z_{TD} obtidos nesses processos, quer seja os considerado em tempo real, como os pós-processados, foram convertidos em valores do IWV da forma descrita na seção 4.1.2 (tabela 11).

5.1.3.2 Análise dos resultados

A análise dos resultados obtidos foi feita de tal forma que os indicadores da qualidade estivessem relacionados com o tempo de latência das estimativas obtidas. Para isso, os valores das medidas da tendência (viés), da dispersão em torno do viés (DP) e da acurácia (EMQ) foram calculados em função do tempo de latência. Tais valores foram determinados para cada época em que os valores IWV-GPS foram gerados (taxa de 5 minutos) ao considerar 720 pares de dados. Nas figuras 28, 29, 30 e 31 são mostrados os valores dos indicadores da qualidade obtida com as janelas deslizantes de dados de 1, 3, 6 e 12 horas, respectivamente.



Figura 28 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 1 hora.

Os resultados mostrados na figura 28 indicam que, ao considerar uma janela de 1 hora, tanto os valores do viés como o do desvio padrão independem da latência, permanecendo constantes. Além disso, essa configuração apresenta um viés positivo e relativamente pequeno (+1,0 kg m⁻²). Porém, o resultado mais relevante é a alta dispersão (9,0 kg m⁻²). O melhor resultado é obtido no início da janela, onde há uma leve diminuição, tanto no viés como no desvio padrão.



Figura 29 - Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 3 horas.

Com uma janela deslizante de 3 horas (figura 29) verifica-se que a qualidade das estimativas melhora significativamente em relação à janela de 1 hora. Há praticamente a

ausência de viés, independentemente da latência considerada, e a dispersão mostra-se variante dentro do período considerado (1,95 a 2,25 kg m⁻²), com o pico de mínima na latência de 30 minutos.



Figura 30 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 6 horas.

Nos valores apresentados na figura 30, observa-se que com a utilização da janela de 6 horas de dados, os valores do viés apresentam-se crescentes com a latência, sendo praticamente nulo no fim do período considerado (latência nula) e 0,5 kg m⁻² no início (latência de 6 horas). Já os valores do desvio padrão indicam que a dispersão é maior nas extremidades da janela e menor nas épocas intermediárias. O pico de mínima dispersão é de 1,3 kg m⁻² com aproximadamente 1 hora de latência, época onde os melhores resultados são obtidos utilizando essa janela de dados.



Figura 31 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 12 horas.

Com a utilização da janela de 12 horas (figura 31) os resultados foram semelhantes aos obtidos com uma janela de 6 horas. Os valores do viés foram também crescentes com a latência, diferenciando apenas pelos valores maiores no início e no fim da janela considerada, pois, nesse caso, no início da janela foi de 0,3 kg m⁻² e no final de 0,6 kg m⁻². Já a medida de dispersão em função da latência, verifíca-se que os valores do desvio padrão são mais influenciados pelos processos de predição no início da janela e de suavização no final. Nesses períodos, a dispersão (DP de 2,3 kg m⁻²) é maior do que a observada no interior (DP de 1,3 kg m⁻²). No entanto, pode-se observar que, além do pico de mínima não ser significativamente menor do que o registrado com a janela deslizante de 6 horas, a latência é bem maior. Com uma janela de dados de 12 horas, a menor dispersão (1,27 kg m⁻²) é obtida com uma latência de 2 horas.

Na tabela 17 são apresentados quantitativamente os valores dos indicadores de qualidade do IWV-GPS obtidos em tempo real, resumindo os melhores resultados apresentados nas figuras 28, 29, 30 e 31. Os resultados presentes nessa tabela sugerem que a melhor qualidade (EMQ de 1,295 kg m⁻²) das estimativas IWV-GPS em tempo real é obtida com uma latência de 2 horas ao utilizar uma janela de dados de 12 horas. No entanto, se a análise for feita do ponto de vista da otimização do processo, a configuração que empregou 6 horas de dados gerou os melhores resultados, pois o valor do EMQ foi praticamente o mesmo obtido com 12 horas, porém com uma latência de 55 minutos menor. Para outras aplicações em que a precisão das estimativas do IWV não é fundamental, a melhor opção é fornecida com a utilização de uma janela de dados de 3 horas, pois com uma latência de 35 minutos são obtidos valores do IWV-GPS melhores que 2 kg m⁻².

131

Janela de dados	Número de dados considerados	Latência (minutos)	Viés (kg m ⁻²)	Desvio padrão (kg m ⁻²)	EMQ (kg m ⁻²)
1 hora	720	60	+0,772	8,844	8,878
3 horas	720	35	+0,025	1,958	1,958
6 horas	720	70	+0,153	1,305	1,314
12 horas	720	125	+0,259	1,269	1,295

Tabela 17 – Latência dos valores do IWV-GPS de melhor qualidade obtidos quase que em tempo real comparados com valores pós-processados

Como os valores de referência utilizados nessa análise foram os pós-processados, os resultados devem ser ponderados pelos apresentados na seção 4.2. Como visto na comparação com as radiossondas, os valores do IWV-GPS tendem a ser maiores do que os gerados por essa técnica. Nos valores do IWV-GPS obtidos em tempo real, essa tendência é ainda maior, pois como pode ser observado na tabela 17, o viés, mesmo que pequeno, foi sempre positivo em todas as janelas consideradas. Por outro lado, as efemérides utilizadas nesse processo são fornecidas a cada 5 minutos, e com o uso dessas em um processo sistemático podem-se obter estimativas do IWV com alta resolução temporal, quase que em tempo real (latência de 70 minutos). Esses resultados são animadores, se for considerado o potencial que eles podem gerar para a PNT e outras aplicações associadas às redes ativas de receptores GPS. Apesar de não serem testados aqui, outros softwares de processamento podem gerar resultados semelhantes, como, por exemplo, o GAMIT (KING e BOCK, 1996) e o BERNESE (ROTHACHER e MERVART, 1996), bem como a utilização das efemérides ultra-rápidas do IGS.

5.1.4 Estudos sobre a assimilação do IWV-GPS provenientes de redes ativas no Brasil

Os valores do IWV-GPS obtidos em tempo real geram benefícios imediatos para as Ciências Atmosféricas quando aplicados na PNT. No Brasil, bem como em toda a América do Sul, a utilização de redes ativas GPS tem grande potencial para essa aplicação, haja vista a deficiência na coleta de informações de umidade nessas regiões. O presente estudo tem o objetivo de definir a configuração de coleta, armazenamento e processamento dos dados GPS que permite explorar essa aplicação, baseando-se, para isso, na situação atual e nas tendências futuras da PNT no Brasil. Com o objetivo de tornar esse estudo mais amplo, além dos receptores pertencentes à RBMC, nele estão incluídos os pertencentes a outras redes existentes, em fase de implantação, ou ainda em fase de planejamento.

5.1.4.1 Situação atual e futura das redes ativas de receptores GPS no Brasil

Como visto nos resultados da seção 5.1.2, um fator importante para a assimilação dos valores de umidade é a densificação das informações disponíveis. A RBMC, desde o início da fase operacional, tem sido densificada, mesmo que de forma lenta, com a inclusão de algumas estações GPS no Brasil. Com a inclusão recente dos receptores da Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG), essa rede conta hoje com 20 receptores em operação (IBGE, 2005). Atualmente, está em fase de implantação, algo em torno de 6 receptores do SIVAM (Serviço de Vigilância da Amazônia), os quais também serão integrados à RBMC. Um desses receptores, instalado em Macapá, já se encontra em fase de teste. No final desse processo, a RBMC contará com 26 receptores os quais estarão distribuídos da forma como é mostrada na figura 32.



Figura 32 - Distribuição geográfica das estações GPS da RBMC, (Fonte: IBGE, 2005).

A inclusão das estações do SIVAM na RBMC é crucial para o melhor desempenho dessa rede na PNT, pois, com a configuração atual, a região Amazônica não é devidamente contemplada. Como já foi discutido, nessa região ocorre a maior variabilidade do IWV e é também onde a deficiência de medidas de umidade é maior. Considerando todas as estações da RBMC em funcionamento, a assimilação dos valores do IWV-GPS obtidos a partir dessa rede poderá contribuir na melhoria dos campos de umidade sobre o território brasileiro. A inclusão de apenas uma estação já proporcionou contribuição local positiva na *análise* gerada (mostrada na figura 23 e discutida na seção 5.2.1). Melhores resultados são esperados com a utilização dos valores de umidade gerados pelas estações dessa rede.

Além da RBMC, há outros receptores GPS que se encontram funcionando operacionalmente no Brasil mas não integrados em uma mesma rede, os quais também podem ser utilizados na PNT. Duas estações GPS nessa categoria pertencem a Universidade Politécnica de São Paulo (POLI-USP) e estão localizadas em Cananéia e Ubatuba, no litoral do Estado de São Paulo. Uma outra é do Departamento de Transportes da USP em São Carlos, instalada nessa mesma cidade. Há ainda uma outra estação localizada em Cachoeira Paulista, onde está instalado um receptor pertencente ao JPL. Em fase de implantação, há cinco outras estações GPS a serem implantadas no Estado de São Paulo, cujos receptores pertencem à UNESP de Presidente Prudente e as localidades ainda estão sendo definidas. Todas essas redes poderão ser integradas em uma mesma rede, formando uma única para o monitoramento contínuo dos sinais GPS no Estado de São Paulo, ou ainda serem integradas à RBMC. A figura 33 ilustra a distribuição geográfica dessa futura rede no Estado de São Paulo.



Figura 33 – Distribuição geográfica das estações GPS localizadas no Estado de São Paulo pertencentes a diferentes redes ativas (atuais e futuras).

A rede formada pelas estações GPS disponíveis no Estado de São Paulo em conjunto com as da RBMC, forma uma rede mais densa e, portanto, mais apropriada para a assimilação no modelo global, com benefícios mais diretos para a região sudeste do Brasil. Quanto aos modelos regionais, para a verificação dos benefícios dessa rede estudos adicionais são necessários. Os resultados obtidos com o modelo global sugerem que contribuições semelhantes poderão ser obtidas com a assimilação em um modelo regional. Além das destacadas, há outras redes operacionais que não são consideradas aqui por trabalharem com receptores de simples freqüência, os quais não atendem aos requisitos básicos para a estimativa do Z_{TD} (MONICO, 2000b). Um exemplo dessa rede é a pertencente ao INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) que possui atualmente diversos receptores em todo o território nacional. Esforços recentes estão sendo concentrados para convertê-la em uma rede com receptores de dupla freqüência, a qual nesse caso poderá contribuir significativamente ao tema. Há outras ainda que foram criadas para fins comerciais e por isso também não são consideradas nesse estudo. Um exemplo desse tipo de rede é a denominada SCNET (*Santiago & Cintra Network*) que possui 32 receptores em operação no Brasil.

Não é tarefa fácil determinar a densidade ideal dos pontos de observação para uma dada resolução do modelo, pois quanto maior a quantidade de informação, melhor é o resultado final ao representar a realidade física. No processo de assimilação, as observações disponíveis em uma grade irregular são ajustadas em um campo formado por essa grade, e incrementos para a grade regular são gerados. Logo, a resolução do modelo utilizado não altera a necessidade de uma rede densa de informações. Essa densidade está mais relacionada com a variabilidade temporal e espacial da variável medida. Para o caso do IWV, diversos fatores estão relacionados como latitude, cobertura do solo, relevo, entre outros, o que torna essa discussão mais ampla.

Como visto, a densidade das estações da RBMC, mesmo ao considerar as estações adicionais, está muito longe daquela que poderia solucionar a deficiência das informações de umidade no país, dada a grande variabilidade espacial dessa variável. No entanto, esses pontos de informações, relativamente bem distribuídos, podem contribuir com a minimização dessa deficiência, entrando no sistema de assimilação como mais uma fonte independente. A densidade das estações dessa rede, como foi observada nos últimos anos, tem sido constantemente ampliada, devido à sua característica multifinalitária. Ela, em conjunto com outras fontes, pode fazer com que, no futuro, essa deficiência se torne ínfima.

5.1.4.2 Configurações de coleta, armazenamento e processamento dos dados GPS, necessárias para a utilização das redes ativas de receptores GPS na PNT

Para que uma determinada estação GPS seja empregada na PNT, há duas exigências principais quanto à configuração utilizada na coleta, armazenamento e processamento dos dados. A primeira é que as estimativas do Z_{TD} devem ser obtidas quase que em tempo real e a segunda é que, para os valores do IWV serem obtidos com alta qualidade, devem ser feitas observações de temperatura e pressão atmosférica, próximo à antena GPS. A taxa de coleta dessas informações deve ser igual à taxa com que se deseja obter os valores do IWV.

No processamento em tempo real a preocupação é quanto à latência final dos valores do IWV, e, nesse aspecto, diversos pontos devem ser considerados, o que pode resultar em modificações na forma de coleta, armazenamento e processamento dos dados GPS. Um primeiro ponto é a definição da estratégia de processamento. A janela deslizante de dados escolhida nesse estudo foi a de 6 horas, pois os resultados obtidos na seção 5.1.3 mostram que essa janela é a mais apropriada. Nesse estudo, a estratégia de processamento considerada é a mesma descrita na seção 4.1.2.

A configuração necessária para que uma estação GPS seja utilizada de forma operacional na PNT no CPTEC pode ser sintetizada nos seguintes tópicos, nos quais é pressuposto que haja um centro de processamento dos dados GPS:

– Os dados das estações GPS devem ser disponibilizados ao centro de processamento em arquivos contendo uma hora de dados. Se medidas de temperatura e pressão forem realizadas junto às estações GPS os valores devem também ser disponibilizados. Uma conexão de Internet com bom fluxo de dados deve estar disponível, pelo menos nos períodos de transferência dos arquivos;

– No centro de processamento deve estar disponível um sistema de busca automática dos arquivos de dados e valores de pressão e temperatura nas estações GPS, bem como das efemérides ultra-rápidas compatíveis com o software utilizado. No caso do GOA-II as efemérides devem ser as do JPL as quais são disponibilizadas de forma restrita através de acordo institucional. Os arquivos de dados GPS devem ser concatenados para formar as janelas deslizantes contendo 6 horas de coleta;

No processamento dos dados pelo método de posicionamento por ponto preciso (MONICO, 2000a), as diferentes estações podem ser processadas simultaneamente, porém de forma independente. O tempo de processamento deve ser considerado nesse processo. Para a janela deslizante de dados de 6 horas o tempo de processamento com uma máquina dedicada (*Personal Computer* com processador de 1.8 GHz) é de 30 segundos. Assim, para o processamento dos dados provenientes de uma rede de 20 estações, o tempo de máquina é de 10 minutos. Com o uso de processadores mais rápidos, esse intervalo pode reduzir. Como mostrado na tabela 17, o tempo de latência para a obtenção da melhor qualidade das estimativas IWV-GPS com a janela de 6 horas e de 70 minutos. Logo, o processamento dos arquivos contendo as últimas 6 horas de dados GPS deve ser inicializado as 1:10, 7:10, 13:10 e 19:10 (UTC) para que as estimativas de melhor qualidade estejam disponíveis nos horários sinóticos;

– Se for alocado um período de 10 minutos para transferência e processamento dos dados, a latência final seria de 80 minutos. Para as estações em que valores de temperatura e pressão estiverem disponíveis, as estimativas do Z_{TD} poderão ser convertidas em valores do IWV. No final desse processo, os valores do IWV, ou estimativas do Z_{TD} , podem ser disponibilizados para o CPTEC ou outros centros de previsão de tempo neles interessados.

Se a escolha da estratégia de processamento for com o emprego da janela de 12 horas, pequenas modificações nos tópicos acima serão necessárias. Nesse caso, os arquivos devem ser concatenados no centro de processamento de forma que as últimas 12 horas de dados coletados estejam contidas no arquivo a ser processado. A segunda modificação é nos horários em que deve ser inicializado o processamento dos dados. Como a latência obtida nessa configuração é de 125 minutos, os horários para iniciar o processamento devem ser: 2:05, 8:05, 14:05 e 20:05 UTC.

Atualmente, as rodadas dos modelos operacionais do CPTEC são inicializadas 3 horas após os horários sinóticos, ou seja, 3:00, 9:00, 15:00 e 21:00 UTC. Esse período de espera é destinado ao processo de coleta, processamento e transferência das informações meteorológicas para o CPTEC. Como a latência do IWV-GPS obtida com a configuração proposta é de 80 minutos, há uma folga relativamente grande (100 minutos) que pode ser útil para que eventuais falhas no processamento e transferência não prejudiquem a assimilação desses valores. No entanto, pretende-se, no futuro, que rodadas de integração curta sejam inicializadas mais cedo do que as convencionais, privilegiando as previsões de curto prazo. Tais rodadas serão inicializadas com um período de espera de 2 horas, para as quais também esses valores do IWV-GPS estarão disponíveis, e uma folga de 40 minutos ainda será mantida. Porém, a utilização da janela deslizante de dados de 12 horas seria inviável para essas rodadas de integração curta, pois a latência nesse caso (125 minutos) é maior que o período de espera.

Com relação à coleta das informações de temperatura e pressão, a configuração ideal é que os sensores sejam instalados próximos à antena GPS e que sejam providos de sistemas apropriados de leitura automática e disponibilizados de forma contínua. Cuidados especiais devem ser tomados quanto ao local de instalação do barômetro, o qual deve ser colocado no mesmo nível da antena GPS. As estações da rede SUOMINET são providas desses sensores e exemplificam bem essa configuração ideal (NASA, 2005a). Os receptores mais atuais já possuem kits de sensores meteorológicos integrados, ou permitem que tais sensores sejam neles acoplados, e os valores gerados são disponibilizados em arquivos com formato RINEX, específicos para essas informações. As outras opções para a obtenção das informações de superfície consistem em:

- utilizar valores coletados pelas plataformas de coleta de dados (PCDs) pertencentes à rede do CPTEC, à Agência Nacional de Águas (ANA) ou ao INMET;
- usar as informações pertencentes ao Banco de Dados Meteorológicos (BDM) disponível para a PNT no CPTEC;
- usar os valores do *first guess* disponíveis nos modelos numéricos de PNT.

Todas essas 3 opções podem gerar perda da qualidade dos resultados finais dos valores IWV-GPS e devem ser evitadas. O ideal seria a instalação de sensores na estação GPS. No entanto, entre essas opções alternativas, as PCDs são as que mais se aproximam da condição ideal, quando essas se encontram próximas da estação GPS. Esse é o caso das PCDs instaladas em locais próximos das estações da RBMC de Presidente Prudente, Cuiabá e Curitiba. Necessita-se, nesse caso, que um convênio institucional seja firmado entre os interessados e os proprietários dessas PCDs. Um outro problema é relacionado com a taxa de armazenamento dessas PCDs, que atualmente é de 3 horas, enquanto que a taxa de coleta é de 1 minuto. Para as aplicações com o atual *status* da assimilação de dados no Brasil, essa taxa de armazenamento é suficiente. Porém, se forem consideradas as modificações futuras, uma taxa de armazenamento de 30 minutos seria a mais adequada.

Para a utilização das informações do BDM, o problema é com relação à distância entre as estações meteorológicas e as estações GPS. Um segundo problema é a taxa de coleta que não é temporalmente uniforme. Essa alternativa foi utilizada no passado em trabalhos com essa finalidade na Suécia (EMARDSON, 1998). No entanto, a rede de estações meteorológicas considerada nesse caso era muito maior do que a existente atualmente no Brasil.

A outra opção seria a utilização de valores de temperatura e pressão provenientes do *first guess* do próprio modelo de PNT. Nessa alternativa há vantagens e desvantagens. A vantagem é que seria necessária pouca modificação na configuração atual das estações GPS, pois não haveria a necessidade da instalação de sensores meteorológicos nelas. A desvantagem é quanto à qualidade dos valores obtidos, pois são valores disponíveis no *first guess* do modelo são previstos e não observados. Associado a isso, o uso desses valores poderia gerar dependências dos valores do IWV-GPS aos valores existentes nos pontos da grade do modelo. Todos esses fatores geram ruídos nos valores IWV-GPS, os quais fazem com que a contribuição da assimilação dessas informações na PNT seja minimizada.

5.2. Potencialidade da alta resolução temporal das estimativas do IWV-GPS

Os resultados obtidos com a assimilação dos valores do IWV-GPS mostraram que a densidade das informações disponíveis é um dos fatores mais relevantes para essa atividade. Nesse aspecto os sensores em bases terrestres tornam-se menos atrativos do que os sensores a bordo de satélites. Com relação às aplicações GPS na Meteorologia isso não é diferente, pois no futuro, quando a técnica de radio-ocultação GPS estiver operacional, os receptores a bordo de satélites de órbita baixa serão capazes de gerar uma densidade espacial de informação maior que as dos receptores em bases terrestres. Além disso, não só a técnica de radio-ocultação, mas as outras técnicas baseadas em sondagem utilizando sinais infravermelhos, fornecem, além do conteúdo integrado, perfis de umidade. Porém, nenhuma outra técnica é

capaz de conciliar alta resolução temporal e o baixo custo, como os receptores GPS em bases terrestres. Resolução temporal semelhante pode ser obtida com a aplicação de MWR. No entanto, o preço desse equipamento é muito elevado. A alta resolução temporal faz das redes de receptores GPS uma ótima ferramenta para as atividades desenvolvidas nas Ciências Atmosféricas. Essa seção apresenta algumas idéias iniciais que buscam explorar essa alta resolução temporal.

5.2.1 Análise da variabilidade temporal do IWV

O vapor d'água atmosférico é uma das variáveis que apresenta maior oscilação, tanto com relação ao tempo como com relação ao espaço, pois diversos processos físicos e químicos estão associados à sua concentração. Entre outros processos pode-se citar a evaporação de superfícies aquáticas, a evapotranspiração dos seres vivos (em especial a vegetação), fenômenos atmosféricos (como orvalho, chuvas e tempestades) e a circulação atmosférica (em especial os processos convectivos). Na série temporal do IWV pode haver um sinal cujo padrão de comportamento forneça informações úteis as Ciências Atmosféricas.

Pesquisas envolvendo análise do sinal geofísico têm sido bastante exploradas nas Ciências Atmosféricas e têm como objetivo caracterizar os sinais da variabilidade de diversas variáveis atmosféricas. As oscilações típicas das variáveis meteorológicas são as oscilações sazonais e diurnas. Contudo, as oscilações em escalas de tempo menor que um dia são bem menos previsíveis e estão normalmente associados aos processos convectivos que geram ondas de gravidade em altas altitudes, o que influenciam fortemente a variabilidade dos parâmetros meteorológicos. Alguns trabalhos mostram que existem oscilações no campo de temperatura da superfície com período de aproximadamente de uma hora (FERRONSKI, 1984; ABDOULAEV et al., 1990). Outros trabalhos mostram que a velocidade do vento perto
da superfície apresenta um padrão de oscilação, cuja ocorrência tem um período de 1 hora (DAVIS, 1994) e outros ainda mostraram que as amplitudes das oscilações da divergência do vento da superfície, com um período de ocorrência de 1 a 2 horas, coincidem com a fase do aumento da atividade convectiva (HEIMBACH e ENGEL, 1987). Isto ocorre porque o aumento da temperatura e do vento influencia diretamente na evapotranspiração, fornecendo maior umidade para a atmosfera. Estudos similares a esses considerando o IWV poderão ser realizados com o objetivo de investigar se existe uma correlação entre as oscilações dessa variável com a ocorrência de precipitação e eventos extremos. No entanto, para isso há a necessidade de valores com alta resolução temporal. Os receptores em bases terrestres viabilizam esse estudo, pois geram valores com uma resolução temporal de 5 minutos, a qual pode ser considerada bastante apropriada aos estudos das perturbações convectivas associadas às formações de nuvens denominadas cumulus nimbus¹⁰. Para exemplificar o potencial dessa alta resolução temporal no estudo da variabilidade do IWV, uma análise é realizada ao utilizar os dados do experimento RACCI.

5.2.1.1 Análise da variabilidade do IWV durante o RACCI: exemplificação

Para a realização dessa análise é essencial que a série temporal não apresente falhas e que a taxa em que os valores são apresentados seja uniforme em todo o período avaliado. Para gerar as séries do IWV nas estações do RACCI com essas características, algumas falhas na coleta dos dados tiveram que ser corrigidas.

Para o período onde houve falha na coleta dos dados de superfície (temperatura e pressão atmosférica) durante o experimento RACCI, ou que a taxa de coleta não foi adequada,

¹⁰ Cumulus nimbus é um tipo de nuvem bastante densa, de considerável dimensão vertical, em forma de montanha ou de enormes torres e associadas a intensos processos convectivos.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

aplicou-se um processo de interpolação temporal nas medidas realizadas, obtendo valores para cada 5 minutos. Nessa interpolação foi utilizada a técnica que emprega as *splines* cúbicas (GREEN e SILVERMAN, 1994). A figura 34 amostra os valores de pressão atmosférica interpolados para cada 5 minutos a partir dos valores coletados na estação meteorológica de Porto Velho a cada uma hora.



Figura 34 – Valores de pressão atmosférica interpolados (círculos em vermelho) a partir de valores medidos (losangos azuis) na estação meteorológica de Porto Velho obtidos por *spline* cúbica.

Uma avaliação do erro gerado nessa interpolação foi feita para conhecer qual seria a influência na qualidade final das estimativas do IWV-GPS utilizando os valores interpolados. Nessa avaliação foram utilizados os valores coletados na estação ABRA, os quais possuem resolução temporal de 1 minuto. Os valores coletados a cada 1 hora foram interpolados por uma *spline* cúbica e os valores resultantes foram comparados com os medidos. A figura 35 apresenta os resultados da comparação dos valores de pressão atmosférica para o dia 278 (5/10/2002). Considerando todo o período disponível, em um total de 52.757 pares de dados avaliados, o viés resultante foi de -0,002 e o EMQ de 0,19 hPa. Pela teoria de propagação dos erros, o valor do EMQ aplicado nas equações 4, 5 e 6 gera um erro de 0,068 kg m⁻² nos valores de IWV-GPS. Uma análise similar a essa foi feita para os valores de temperatura, a

qual mostrou que um EMQ de 1 K gera um erro de apenas 0,024 kg m⁻². Esses resultados são importantes para mostrar que as *splines* cúbicas fornecem resultados satisfatórios na interpolação de dados de superfície, coletados a cada uma hora, para a quantificação do IWV com resolução temporal de 5 minutos.



Figura 35 - Comparação entre valores de pressão interpolados e valores medidos na estação ABRA no dia do ano 278 (5/10/2002).

Convertendo os valores do Z_{WD} ao empregar os valores de temperatura e pressão interpolados, foram obtidas séries temporais dos valores do IWV-GPS com a resolução de 5 minutos. Além da ausência de dados de superfície disponíveis, um outro problema encontrado foi as eventuais falhas na coleta dos dados GPS, principalmente na estação ABRA, na qual o receptor ZXII foi instalado, pois durante a descarga dos dados esse receptor suspende a coleta. Tais falhas ocorreram também nas outras estações devido à falta de energia elétrica. Essas falhas foram preenchidas com valores interpolados também com o emprego de uma *spline* cúbica.

No final desse processo foram obtidas séries temporais ininterrupta do IWV com resolução de 5 minutos nas três estações do RACCI. Com essas séries, foi feito um estudo preliminar da variabilidade do IWV usando decomposições do sinal por ondeletas (FARGE, 1992). Um dos objetivos desse estudo foi determinar o dia em que deveria ser considerado o início da estação chuvosa no experimento RACCI, do ponto de vista da umidade atmosférica. Essa questão é bastante relevante, pois esse experimento foi realizado com o objetivo de agregar informações a respeito da fase de transição entre o período seco e o úmido, e a correta delimitação das mesmas permite analisar adequadamente os processos envolvidos em cada uma delas. As ondeletas foram utilizadas nesse processo por serem bastante eficazes na análise da variabilidade de uma série temporal qualquer, pois permite por meio de decomposições acessar as oscilações de diferentes freqüências da variável estudada. Na figura 36 é mostrado o nível 12 da decomposição das séries temporais do IWV no RACCI pela ondeleta *Daubechies* (DAUBECHIES et al, 1992) de ordem 10.



Figura 36 - Série temporal do IWV nas estações GPS do RACCI em função do tempo e o nível 12 da decomposição pela ondeleta *Daubechies* de ordem 10.

Na figura 36 são apresentadas as séries temporal do IWV, na qual é possível verificar a alta oscilação dessa variável. A decomposição dessas séries temporal, também apresentada na figura 36, mostra as oscilações de mais baixa freqüência, as quais representam, praticamente, apenas a tendência do sinal. Com essas oscilações é possível acessar o início e o fim da fase de transição do ponto de vista da umidade na coluna atmosférica, como é destacado nos gráficos da figura 36. Observa-se nessa decomposição a tendência de crescimento do IWV em três períodos; o seco, a transição e o úmido. Nota-se que existem diferenças entre as três estações, mostrando uma variabilidade regional nas 3 períodos discutidos acima. Na estação ABRA, observa-se uma primeira fase de crescimento, seguido de um platô e um segundo aumento. Em GJMI há esse período de aumento, depois há um platô, seguido de uma ligeira queda do valor médio do IWV. Em PTVE, verifica-se as fases seca e úmida muito bem definidas. A primeira apresenta-se como um platô com valores do IWV relativamente baixos (fase seca), seguido de uma fase de crescimento (fase de transição) e depois um segundo platô com valores do IWV mais elevados (fase úmida). Tanto em GJMI como em PTVE, a fase úmida apresenta-se com uma leve diminuição do IWV. Os detalhes explicando as razões para essa diferença regional estão ainda sendo estudados.

A análise do sinal por ondeletas (TORRENCE e COMPO, 1998) apresenta-se como uma boa solução para analisar as altas freqüências do sinal do IWV, pois permite decompor uma série temporal com função do tempo e da freqüência simultaneamente. É um método muito utilizado nas ciências naturais, o qual permite obter informações da amplitude do sinal dentro de uma série temporal e como essa amplitude varia com o tempo.

Esse método foi aplicado na série temporal do IWV em ABRA para todo o período da campanha. O objetivo dessa análise foi investigar a existência de um padrão de comportamento das oscilações do IWV nos períodos que antecedem os eventos de precipitação. Esse tema é de grande importância para a prevenção de desastres naturais causados por tempestades intensas, pois se for encontrado uma freqüência de variabilidade do IWV que anteceda tais tempestades, a alta resolução temporal do IWV-GPS poderá ser usada para esse fim. Com isso os receptores GPS em bases terrestres poderiam auxiliar a previsão de precipitação de curto prazo (*nowcasting*). Para testar essa hipótese foram selecionados 3 episódios de forte precipitação ocorridos na região próxima à estação ABRA, os quais são apresentados na figura 37 juntamente com a série temporal do IWV. As informações sobre tais episódios são provenientes de um radar meteorológico instalado próximo à estação ABRA pela equipe do experimento RACCI. Esses episódios de precipitação são mostrados na

figura 37 de duas formas. Uma primeira em termos percentuais da área (250 km de raio) recoberta pelo radar (figura 37a) e uma outra em termos da intensidade da precipitação nas áreas bem próximas ao sítio de ABRA (30x30 km) (figura 37c). Os valores provenientes do radar são apresentados na figura 37 em dbz, a qual é uma unidade que está associada com a intensidade da precipitação. Na figura 37 observa-se claramente um forte sinal na série temporal do IWV associado com os eventos de precipitação. Nos períodos que antecedem a precipitação nota-se um aumento significativo dos valores do IWV, os quais mostram forte queda nas épocas posteriores à esses eventos.



Figura 37 - Série temporal do IWV na estação ABRA durante episódios de precipitação atmosférica.

Para a aplicação da análise por ondeletas, um primeiro passo é a definição da função de ondeleta (ψ_0) a ser utilizada entre as várias disponíveis (FARGE, 1992). A função de ondeleta utilizada nesse experimento foi a de Morlet (TORRENCE e COMPO, 1998), pois é a que melhor representa séries temporais associadas a fenômenos geofísicos (ARAVÉQUIA,

2003). Essa função é definida como sendo o produto de uma onda plana exponencial complexa, modulada por uma gaussiana:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i6\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}}, \qquad (18)$$

sendo η um parâmetro de tempo adimensional. A modificação de seu tamanho global e seu deslocamento ao longo do tempo são dados pela equação:

$$\psi\left[\frac{(\overline{n}'-\overline{n})\partial t}{s}\right] = \left(\frac{\partial t}{s}\right)^{\frac{1}{2}} \psi_0\left[\frac{(\overline{n}'-\overline{n})\partial t}{s}\right],\tag{19}$$

onde *s* é o parâmetro de dilatação para modificar a escala e \overline{n} é o parâmetro de translação para deslocá-la no tempo. Variando os valores de *s* e transladando-a pela série com o índice do tempo \overline{n} , pode-se construir um campo mostrando a o espectro de potência das freqüências das oscilações em função da escala e do tempo. Detalhes e comentários adicionais sobre a análise por ondeletas são apresentados em Torrence e Compo (1998).

Os resultados da aplicação da análise por ondeletas na série temporal do IWV-GPS mostraram que as oscilações com períodos de um dia dessa série apresentavam muita energia e mascarava as oscilações de alta freqüência. Como nessa análise são as oscilações de alta freqüência que carregam o sinal procurado, foi necessário filtrar a série retirando as oscilações maiores que 6 horas. Para isso foi utilizando um filtro empregando a ondeleta de Morlet. A análise por ondeleta aplicada na série temporal do IWV filtrada é apresentada na figura 38.



Figura 38 – Análise por ondeleta aplicada à série filtrada do IWV-GPS: (a) Série temporal filtrada do IWV; (b) espectro de potência (c) Potência média global.

A eficiência do filtro é observada na figura 38a onde a série resultante apresenta apenas as oscilações de alta freqüência. Os períodos onde há ausência de oscilação nessa série são decorrentes das falhas na coleta dos dados na estação ABRA, e indicam que o método de interpolação utilizado para preencher essas falhas também foi eficiente.

No gráfico do espectro de potência (figura 38b), o eixo x indica a localização da potência da ondeleta no tempo em dias julianos, e com relação ao eixo y indica a sua localização com relação à freqüência considerada. Note que as falhas na série são facilmente observadas no espectro, chegando até a provocar descontinuidades na superfície espectral. No item (c) da figura 38 é apresentada a potência para as diferentes freqüências ao considerar toda a série. Nesse gráfico observa-se que para freqüências menores que 90 minutos a potência é desprezível, enquanto que a maior energia é observada para valores próximos de 5,9 horas.

Como a análise global do espectro apresentado na figura 38 é dificultada pela influência das interrupções na série temporal do IWV, na figura 39 é apresentada uma ampliação desse espectro (dia 267 ao dia 270 do ano), onde o mesmo é comparado com um evento de intensa precipitação selecionado entre os vários ocorridos durante o período avaliado. Os valores da precipitação são dados em termos percentuais da área recoberta pelo radar (figura 39b). Na figura 39 são apresentados também os valores da variância média em faixas de freqüência. As faixas utilizadas foram entre 1,5-3 horas (figura 39c) e de 3-6 horas (figura 39d), escolhidas de acordo com o espectro global da potência (figura 38c)



Figura 39 - Detalhamento da análise por ondeleta aplicada à série temporal do IWV-GPS da estação ABRA entre os dias 267 e 270: (a) espectro de potência; (b) dados do Radar: precipitação pluviométrica; (c) variância media para bandas de 1,5-3 e (d) 3-6 horas.

No espectro de potência da figura 39 observa-se uma energia muito grande entre 3-6 horas no período onde há a ocorrência da precipitação. Com a análise da variância observa-se que nos períodos que antecedem a precipitação há um aumento significativo da variância do espectro, tanto na faixa de 1,5-3,0 horas, como na de 3,0-6,0 horas. Esse comportamento da variabilidade da série temporal do IWV pode ser um sinal da ocorrência de precipitações à curto prazo. Para isso necessita-se determinar um padrão de comportamento que está associado com uma probabilidade de que haja precipitação. Esse padrão de variância do sinal apresentado na figura 37 não pode ser considerado definitivo e necessita de ser mais bem analisado, pois ocorreram casos desta oscilação mas sem o evento de precipitação, em outros casos houve precipitação mas não foram notados comportamentos semelhantes da variância. Suspeita-se que esse padrão da variância procurado além de auxiliar na previsão de precipitação intensa, permitirá a classificação do tipo e a duração de tais eventos. Investigação desta natureza é inédita, e dada a sua importância, merece mais investigação no futuro.

5.2.2 Perfis de umidade com alta resolução temporal

A discretização do perfil vertical atmosférico com a melhor resolução é obtida com a aplicação das radiossondas. No entanto, devido o seu alto custo, geralmente são lançadas apenas nos horários sinóticos, e em muitos locais apenas para os horários das 0:00 e 12:00 horas UTC. Como as oscilações da umidade são acentuadas, essa taxa de lançamento, com dois, ou mesmo quatro lançamentos diários, não é capaz de acompanhar tais oscilações. Para as localidades onde são encontradas estações de lançamento de radiossondas e de receptores GPS, a integração dessas técnicas pode gerar perfis de umidade com alta resolução temporal. Nesse processo, as diferentes concentrações da umidade ao longo dos perfis verticais atmosféricos, gerados pelas radiossondas, podem ser interpoladas no tempo. Os valores da série temporal do IWV-GPS são distribuídos verticalmente seguindo essas concentrações

interpoladas para as épocas em que eles se referem. Obtêm-se assim, perfis verticais de umidade com alta resolução temporal.

Os valores do IWV em uma época *t* são distribuídos no perfil vertical atmosférico ao aplicar a seguinte equação:

$$IWV_{l}(t) = \frac{P_{rad0}^{l}(t_{0}) \cdot [t_{1} - t] + P_{rad1}^{l}(t_{1}) \cdot [t - t_{0}]}{[t_{1} - t_{0}]} \cdot IWV(t), \qquad (20)$$

sendo $IWV_l(t)$ o valor do IWV no nível considerado l para a época t qualquer, tal que $t_0 \le t \le t_1$, sendo (t_0) a época em que foi lançada a primeira radiossonda do período considerado (rad0) e (t_1) a época em que foi lançada a segunda radiossonda (rad1). A variável P^l é a percentagem de umidade do perfil total existente no nível l.

Os perfis gerados nesse processo não são capazes de representar as variações verticais do vapor d'água atmosférico, uma vez que os valores gerados pela contribuição do GPS se referem ao conteúdo total integrada na atmosfera. No entanto, há diversas aplicações nas Ciências Atmosféricas que tais perfis podem trazer contribuições.

5.2.2.1 Perfis de umidade com alta resolução temporal no RACCI: exemplificação

Para ilustrar os resultados que podem ser obtidos com a integração das radiossondas com os receptores GPS, a figura 40 apresenta os perfis de umidade gerados para um dia na estação GJMI. A resolução temporal apresentada nessa figura é de 30 minutos, mas resoluções de até 5 minutos podem ser obtidas. As radiossondas utilizadas foram lançadas às 0:00 e 6:00 UTC em um primeiro período considerado e às 12:00 e 18:00 UTC no segundo período. Os perfis das radiossondas adicionais que foram lançadas às 4:00 e às 16:00 UTC também são apresentados nessa figura para comparar os resultados.



Figura 40 - Perfís de umidade com alta resolução temporal obtidos a partir dos valores IWV-GPS e os perfís de umidade das radiossondas lançadas no dia 18/10/2002.

Observa-se que os perfis obtidos a partir dos valores IWV-GPS em comparação com os perfis das radiossondas mostraram-se mais úmidos. Esse é um resultado esperado, pois como foi apresentado na seção 4.2, os valores do IWV-GPS tendem a ser maiores do que os gerados pelas radiossondas. Se a aplicação que utilizar tais perfis necessite que isso seja corrigido, basta subtrair o viés encontrado entre as radiossondas e os valores do IWV-GPS antes de aplicá-los na equação 20.

5.2.3 Estações GPS como pontos de controle dos campos de IWV gerados por satélites

Quando se fala em densidade de medidas de umidade sabe-se que as técnicas que empregam sensores a bordo de satélites são as que apresentam o maior potencial em minimizar a deficiência dessas medidas na extensa área do território brasileiro, pois eles fornecem alta resolução espacial.

A figura 41 exemplifica o campo obtido com o emprego dos dados de um dos satélites da série NOAA. Os valores são obtidos por sondagem remota da atmosfera utilizando o HIRS (*High Resolution Infrared Spectrometer*) e o MSU (*Microwave Sounding Units*). Esses sensores são capazes de gerar, além dos valores de umidade, perfís com informações da estrutura termodinâmica tridimensional da atmosfera a partir do procedimento conhecido por "inversão matemática" da Equação Integral de Transferência Radiativa (EITR) (DSA, 2005). Além do campo de IWV, perfís de temperatura e altitude geopotencial são gerados operacionalmente na DSA/CPTEC nos horários das 0:00 e 12:00 UTC com resolução espacial de aproximadamente 40 km. O objetivo é alimentar os modelos de PNT, minimizando a deficiência de informações meteorológicas sobre o Brasil.



Figura 41 - Campo dos valores do IWV sobre o Brasil obtido a partir da sondagem remota da atmosfera realizada pelos satélites da série NOAA (Fonte: DSA, 2005).

No entanto, os valores do IWV provenientes de satélites apresentam um viés úmido com relação a outras técnicas de medida (WOLFE et al., 1996). Isso faz com que os valores possam trazer uma contribuição menos positiva aos processos de assimilação de observações em PNT (WOLFE e GUTMAN, 2000). Além da boa resolução espacial, a qualidade das informações também é um fator relevante, pois no sistema de assimilação é implementado um processo de controle de qualidade, onde as informações consideradas ruidosas são descartadas.

Porém, os valores do IWV-GPS podem ser integrados na metodologia utilizada para gerar os campos de IWV a partir da sondagem atmosférica infravermelha. Tais valores podem ser tratados como pontos de controle do campo de IWV gerado pelos satélites. Mesmo com uma rede de receptores GPS pouco densa é possível gerar uma superfície de correções para esse campo. Como o sensor e a metodologia empregada são os mesmos em todo o campo do IWV, os erros sistemáticos são eliminados nesse processo permanecendo apenas aqueles associados à dispersão. Depois de corrigido o erro no conteúdo integrado pode-se transferir essas correções aos perfís de temperatura e geopotencial, resultando perfís de melhor qualidade. Nesse contexto, os valores do IWV-GPS contribuem com a melhoria desses campos de umidade, conciliando alta resolução espacial com boa qualidade na quantificação do IWV sobre o Brasil. Integração semelhante à mencionada tem sido feita ao empregar dados do satélite MODIS e dados GPS para gerar campos de IWV com resolução horizontal de 1 km (LI, 2005).

5.3 Novas aplicações para as redes ativas de receptores GPS na Meteorologia brasileira

A densidade das estações da RBMC (já considerando a inclusão das estações em fase de implantação e outras com potencial para a quantificação do IWV) não é adequada para atender as necessidades do Brasil no que se refere às medidas do IWV. No entanto, como já destacado, em conjunto com outras técnicas, essa rede pode trazer benefícios adicionais ao explorar a boa qualidade e a alta resolução temporal das medidas do IWV-GPS, pois se trata de uma rede atualmente operacional.

A integração dos receptores GPS com as radiossondas encontra nas estações do SIVAM uma circunstância muito favorável e com grande potencial para as pesquisas nessa região. Em todas as estações do SIVAM haverá, além do lançamento de radiossondas, uma estação GPS operacional. Com isso será possível gerar perfis de umidade com alta resolução temporal em uma região onde o fluxo de vapor d'água atmosférico é muito elevado.

Com relação às correções dos campos do IWV gerados a partir de satélites sondadores de umidade, as estações da RBMC possuem especial importância, devido a sua atual operacionalidade. Essa aplicação constitui uma contribuição significativa da RBMC na PNT ao proporcionar uma melhoria da qualidade dos campos de IWV. No sistema de assimilação, a contribuição dos valores do IWV-GPS da RBMC seria imperceptível se valores do campo de IWV de satélites fossem também incluídos. Mesmo com os valores do IWV-GPS sendo de melhor qualidade, o número de informações do campo do IWV gerados pelos satélites seria mais significativo para a assimilação. No entanto, com o uso das estações da RBMC na melhoria da qualidade de tais campos, sua contribuição seria relevante, porque conciliaria quantidade e qualidade. Com a inclusão das estações do SIVAM, a RBMC terá uma densidade de pontos relativamente adequada para essa integração, pois a distribuição será bem homogênea sobre todo o território brasileiro.

Outra aplicação importante da RBMC seria a utilização das estações GPS como pontos de calibração de outros instrumentos utilizados na quantificação do IWV em bases terrestres, como radiômetros e fotômetros, e em bases espaciais, como sensores a bordo de satélites artificiais. No primeiro caso, tais equipamentos podem ser instalados nas proximidades dos receptores GPS durante experimentos de calibração. No segundo, a vantagem é a certeza de ter valores disponíveis em todas as passagens do satélite, dada a alta resolução temporal do IWV-GPS. Um exemplo dessa aplicação é a validação do sensor HSB, onde foram empregados os valores do IWV-GPS obtidos no experimento RACCI (LIMA e MACHADO et al., 2005).

6 PREDIÇÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL PARA POSICIONAMENTO GNSS EM TEMPO REAL

A atmosfera eletricamente neutra é a camada localizada entre a Ionosfera e a superfície da Terra, com altura de aproximadamente 50 km. Nela, está incluída a Troposfera, Tropopausa, Estratosfera e parte da Estratopausa. O gradiente de concentração dos gases presente nessa camada é um dos fatores que influenciam a qualidade obtida no posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais, em especial a componente altimétrica. Essa influência gera um atraso no sinal, que ao ser projetado na direção zenital é denominado Atraso Zenital Troposférico (Z_{TD}), (ver seção 2.1). Enquanto que para as aplicações do GPS na meteorologia esse atraso é uma fonte de informações do vapor d'água atmosférico, para as aplicações em posicionamento é uma fonte de erro que deve ser eliminada. Para isso, são empregados modelos teóricos não totalmente apropriados para aplicações em regiões do hemisfério Sul, pois foram desenvolvidos a partir de dados cuja maioria desses foi coletada em áreas do hemisfério Norte. Visando contribuir com o tema, nesse capítulo é apresentada uma modelagem alternativa dos efeitos da troposfera nos sinais de radiofreqüência ao empregar predições do Z_{TD} obtidas a partir de modelos de PNT. Nesse contexto, o sinergismo entre a Meteorologia e a Geodésia torna-se completo, pois nos capítulos anteriores os benefícios dessa parceria eram destinados à Meteorologia, principalmente em atividades de PNT e estudos climáticos, enquanto nesse capítulo os beneficios destinam-se à Geodésia, na melhoria da modelagem dos efeitos dos gases atmosféricos na propagação dos sinais GPS. Essa modelagem é denominada dinâmica por

estar baseada nas leis da termodinâmica utilizadas pelos modelos de PNT (KINTER et al., 1997), as quais governam os movimentos dos gases na atmosfera.

6.1 Modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico empregando modelos de PNT

Ao contrário do que ocorrem com os efeitos gerados pela Ionosfera, para freqüências menores que 30 GHz, o atraso troposférico independe da freqüência do sinal e para minimizar seus efeitos utiliza-se freqüentemente uma modelagem empírica (SPILKER, 1994). A primeira etapa dessa modelagem é o emprego das funções de mapeamento (DAVIS, et al., 1985; NIELL, 1996, 2001 e 2003; BOEHM e SCHUH, 2004). Por intermédio delas, as variações desse atraso em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital ao considerar apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. A segunda etapa consiste em aplicar modelos teóricos que relacionam o Z_{TD} com valores de temperatura pressão e umidade medidos na superfície ou obtidos a partir de uma atmosfera padrão (SAPUCCI e MONICO, 2001). Para as aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites que utilizam curtos intervalos de tempo de coleta de dados e não requerem alta precisão, tais modelos são suficientes. Normalmente são aplicações GPS que utilizam apenas a pseudodistância. No entanto, eles são inapropriados para as aplicações em tempo real que requerem alta precisão, pois tais modelos são ineficientes na modelagem das oscilações do Z_{TD} .

Em 2010 pretende-se implantar um novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo, denominado CNS-ATM (*Communication Navigation Surveillance -Air Traffic Management*) (ICAO, 2005). Além dos métodos convencionais de orientação e controle já

utilizados oficialmente pelas empresas aéreas, esse novo sistema de navegação também empregará sistemas de posicionamento por satélites. Nessa nova concepção, o uso de sistemas de determinação e distribuição de correções dos erros presentes nas observáveis dos sistemas de posicionamento por satélite será mais freqüente. O objetivo ao empregar tais sistemas é obter boa precisão em tempo real, que é uma exigência básica da navegação aérea. Um exemplo desses sistemas é o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que visa integrar os principais sistemas de posicionamento por satélite. Para o bom desempenho desse sistema uma modelagem adequada dos efeitos da troposfera é requerida em todo o globo terrestre.

A modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico apresenta-se como uma alternativa para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais de radiofreqüência em regiões da América do Sul. Essa modelagem encontra-se operacional e é disponibilizada desde março de 2004 pela DSA-CPTEC-INPE¹¹. Ela é destinada às aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites, como o GPS e o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), que necessitam alta precisão em tempo real. Essa modelagem pode ser utilizada também em atividades espaciais que empregam sinais de radiofreqüência, como por exemplo, na determinação de órbitas de satélites em geral. Esse tipo de modelagem do Z_{TD} já vem sendo explorado atualmente em outras regiões do globo com bons resultados (BEVIS et al., 1996; SCHULER et al., 2001; JENSEN, 2003; JUPP et al., 2003).

Como foi discutido na seção 2.1, o atraso zenital da componente hidrostática (Z_{HD}) pode ser determinado a partir da localização e de valores de pressão atmosférica aplicada na equação 4. Quanto aos valores do atraso troposférico da componente úmida (Z_{WD}), eles podem

¹¹ Essa modelagem é um dos benefícios diretos obtidos com a integração dos diferentes centros de pesquisa envolvidos no presente trabalho. Ela é um dos diversos produtos oferecidos pela DSA/CPTEC/INPE e pode ser acessado no seguinte endereço: <u>http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm.</u> Os valores são atualizados diariamente entre 7:30 e 8:30 (horário de Brasília) e entre 19:30 e 20:30.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

ser obtidos a partir da segunda parcela da equação 2, a qual é transcrita aqui (SPILKER et al., 1994):

$$Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2 e^{-1} T Z_w^{-1} + k_3 e^{-1} Z_w^{-1}) dh.$$
(21)

Como pode ser verificada na equação 21, essa componente está totalmente relacionada com a razão de mistura entre o vapor d'água e os gases hidrostáticos, em toda a coluna atmosférica, o que torna difícil sua determinação a partir de medidas realizadas na superfície. Apesar de gerar uma influência menor do que a componente hidrostática, representando cerca de 10% do atraso zenital troposférico, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas (SPILKER et al., 1994).

As previsões dos valores do Z_{WD} são obtidas ao aplicar os perfís de temperatura e razão de mistura previstos pelo modelo de PNT (para um ponto "*A*" qualquer da grade desse modelo), em uma integração numérica na equação 21. De forma similar, as previsões do Z_{HD} são obtidas ao aplicar os valores da pressão atmosférica na superfície também previstos pelo modelo e as coordenadas desse mesmo ponto na equação 4. Somando os valores de ambas as componentes obtêm-se as previsões do atraso zenital troposférico (Z_{TD}) para esse ponto "*A*". Fazendo isso para todos os pontos da grade do modelo obtêm-se uma malha de informações sobre a distribuição espacial dessa variável, que por uma interpolação é possível obter previsões do Z_{TD} para qualquer outro ponto recoberto pelo mesmo. Com os campos do Z_{TD} gerados pela modelagem dinâmica é possível analisar a variabilidade sazonal do atraso zenital troposférico sobre a América do Sul, nas componentes hidrostática e úmida.

6.2 Variabilidade sazonal do atraso zenital troposférico sobre a América do Sul

Com os campos do Z_{WD} gerados diariamente pela modelagem dinâmica é possível verificar as características mais importantes da variabilidade sazonal do Z_{TD} sobre a América do Sul. Para isso, os campos das *análises* geradas no período de um ano (junho de 2004 a maio de 2005) foram divididos de acordo com as estações¹² sazonais e um campo de valores médios das componentes do Z_{TD} foi calculado para cada uma delas. As *análises* geradas para os meses de julho, agosto e setembro de 2004 foram utilizadas para compor um campo dos valores médios para o inverno. O mesmo foi feito para a primavera ao utilizar as *análises* geradas para o verão foram utilizadas as *análises* geradas para os meses de julbo, novembro e dezembro de 2004. Para o verão foram utilizadas as *análises* geradas para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2005, enquanto que para o outono foram utilizadas as *análises* dos meses de junho de 2004, abril e maio de 2005. Note que nesse processo não foram considerados os valores previstos e sim os valores da condição inicial do modelo de PNT (*análise*), na qual as observações participam fortemente ponderadas. Portanto, os campos resultantes dele se aproximam da realidade física e representam bem a variabilidade das componentes do Z_{TD} .

Na figura 42 são apresentados campos médios do Z_{WD} através de esquemas de cores, para as diferentes estações do ano. Mesmo em uma análise superficial da figura 42 observa-se a grande variabilidade sazonal dos valores do Z_{WD} sobre a América do Sul, e a diferença mais acentuada é encontrada entre o inverno e o verão. Essa variabilidade está relacionada com os perfis de temperatura e umidade e há diversos fatores que influenciam tais quantidades. Um

¹² O termo "estação" é utilizado no texto para se referir ao local escolhido onde foi instalado um receptor GPS (como é comum na Geodésia) e é também utilizado para se referir aos quatro períodos do ano que se distinguem entre si pelas características climáticas: primavera, verão, outono e inverno (como é comum na meteorologia).

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

desses fatores é o relevo da superfície da Terra, pois nas regiões de altitudes elevadas há baixa concentração de vapor d'água atmosférico, e por conseqüência valores reduzidos do Z_{WD} , a qual está associada com as baixas temperaturas predominante nessas regiões. Isso é o que ocorre sobre a região dos Andes onde, constantemente, os valores do Z_{WD} são praticamente nulos.



Figura 42 - Campos dos valores médios do Z_{WD} sobre a América do Sul nas diferentes estações do ano.

Um outro fator é o aumento da capacidade do ar em armazenar vapor d'água nas regiões de alta temperatura na região tropical, principalmente na região Amazônica, gerando uma grande concentração de umidade na atmosfera e por conseqüência valores do Z_{WD} bastante elevados, principalmente durante o verão e outono (figuras 42c e 42d). Uma outra

Um fator importante associado à variabilidade dos valores do Z_{WD} é a passagem de sistemas de ar frio provenientes da Antártida. Esses sistemas geram quedas da temperatura e aumento da pressão, ocasionando diminuição da concentração de vapor d'água atmosférico devido à baixa temperatura e a condição de subsidência (ar de altos níveis mais seco que descende na atmosfera em regiões de alta pressão), gerando uma diminuição da evapotranspiração sobre a superfície terrestre. O deslocamento desses sistemas é um fenômeno periódico e ocorre durante todo o ano. No entanto, durante o verão, de uma forma geral, tais sistemas não têm força suficiente para empurrar as massas de ar quente formadas pela alta incidência de radiação solar e são por elas desviadas para o oceano Atlântico. Isso já não ocorre durante o inverno, pois ao contrário do que ocorre no verão, o sistema não encontra resistência sobre a América do Sul, podendo chegar até a influenciar o clima na região Nordeste do Brasil. Além disso, durante o inverno há uma instalação de uma alta pressão sobre o continente, fato que não ocorre no verão, quando os valores de pressão são mais baixos. Esses fenômenos têm um efeito bastante significativo nos valores Z_{TD} , sendo os maiores responsáveis pela variabilidade sazonal dessa variável. Tal efeito pode ser claramente verificado ao comparar as figuras 42a (inverno) com a figura 42c (verão) onde os efeitos de tais fenômenos influenciaram consideravelmente os valores médios do Z_{WD} em praticamente todo o território brasileiro.

Espacialmente a variabilidade dos valores do Z_{HD} está muito correlacionada com a altura da superfície terrestre, enquanto que a variabilidade temporal dessa componente está associada com as passagens das massas de ar frio vindas da Antártida. Os valores do Z_{HD} apresentam uma variabilidade espacial muito maior que a temporal, de forma que sazonalmente sua oscilação é pouco significativa. Para verificar esse fato, na figura 43, são apresentados os valores médios do Z_{HD} para o inverno e o verão. Apesar dessas estações serem as mais extremas do ponto de vista climatológico, os valores médios do Z_{HD} são bastante semelhantes, pois a influência do relevo é muito mais significativa que a influência atmosférica. Espacialmente verifica-se que a variabilidade dos valores do Z_{HD} está bastante correlacionada com a altitude da superfície da Terra, pois os menores valores encontram-se sobre a cordilheira dos Andes e outras regiões serranas.



Figura 43 - Campos dos valores médios do Z_{HD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b).

Na figura 44 são apresentados os campos dos valores médios do Z_{TD} para o inverno e para o verão, com o objetivo de verificar a variabilidade resultante da soma das componentes hidrostática e úmida. Ao comparar esses campos com os apresentados nas figuras 42 e 43, nota-se que os valores da componente úmida são os principais responsáveis pela variabilidade do Z_{TD} . Esse resultado torna evidente dois pontos principais nesse estudo. O primeiro é a necessidade de uma modelagem adequada da componente úmida para se obter melhores resultados no posicionamento geodésico. O segundo é que a modelagem Dinâmica, aqui proposta, é sensível a essas flutuações e, portanto, uma boa alternativa para essa modelagem.



Figura 44 - Esquema de cores contendo valores do atraso zenital troposférico (Z_{TD}) ara a América do Sul, durante o inverno (a) e o verão (b)

6.3 Vantagens e desvantagens da modelagem dinâmica do Z_{TD}

Se comparada com as demais opções disponíveis para minimizar o Z_{TD} , a modelagem dinâmica apresenta as seguintes vantagens:

- Com o emprego do modelo de PNT, a modelagem resultante considera todas as variações temporais e espaciais do Z_{TD} empregando operacionalmente um complexo processo dinâmico de coleta, processamento e de distribuição de informações;
- Disponibilidade em todas as regiões da América do Sul e oceanos adjacentes;
- Valores do Z_{TD} de boa qualidade em tempo real sem precisar medir valores de quantidades meteorológicas durante a coleta dos dados GPS;
- Modelagem sensível às variações diárias e sazonais dos fatores que influenciam nos valores do Z_{TD};

 Os valores obtidos não são contaminados com os erros provenientes da relação entre os valores medidos na superfície com os do perfil atmosférico, como é freqüente nos modelos de Z_{TD} convencionais;

Por outro lado, no emprego dessa modelagem algumas desvantagens devem ser consideradas:

• há a necessidade de um *link* à Internet ou um sistema de informação adicional, para a obtenção das previsões do Z_{TD} , pelo menos uma vez ao dia;

 Como atualmente os valores das previsões são disponíveis em intervalos de 6 horas, essa modelagem não é sensível às oscilações de alta freqüência dos fatores que influenciam os valores do Z_{TD}.

Com o aumento dos usuários desse tipo de modelagem troposférica as vantagens tendem a aumentar e as desvantagens poderão ser minimizadas, pois a demanda por melhores resultados pode justificar métodos mais eficientes na geração e disponibilidade das previsões do Z_{TD} , como o emprego de um modelo com maior resolução espacial e previsões geradas com menor passo de tempo.

6.4 Avaliação da qualidade das previsões do atraso zenital troposférico

A qualidade das previsões do Z_{TD} foi avaliada utilizando como valores de referência os obtidos pelo pós-processamento dos dados GPS coletados em 8 estações da RBMC (SAPUCCI et al, 2005d). Os indicadores de qualidade foram calculados para as estações sazonais com o objetivo de analisar a influência dos fatores responsáveis pela variabilidade do Z_{TD} em diferentes épocas do ano. O período considerado nessa avaliação foi o mesmo utilizado na análise da seção anterior, bem como a divisão sazonal dos dados considerados. O critério utilizado para a escolha das estações da RBMC foi a disponibilidade dos dados GPS no LGE para essa avaliação, sendo excluídas aquelas que apresentavam ausência de dados para pelo menos uma estação sazonal. As estações GPS utilizadas foram as localizadas em: Bom Jesus da Lapa-BA (BOMJ), Brasília-DF (BRAZ), Crato-CE (CRAT), Cuibá-MT (CUIB), Curitiba-PR (PARA), Porto Alegre-RS (POAL), Presidente Prudente-SP (UEPP) e Recife-PE (RECF).

O processamento dos dados GPS para obter as estimativas do Z_{TD} foi feito da forma como descrita na seção 4.1.2 (resumido na tabela 11). Com os campos do Z_{TD} , tanto da análise, como os previstos, foram obtidos os valores para as coordenadas das estações da RBMC utilizando uma interpolação bi-linear dos pontos da grade regular do modelo. Nessa avaliação, o viés é utilizado como medida de tendência e o EMQ como medida de dispersão, as quais foram calculadas para as diferentes estações sazonais. A figura 45 apresenta os valores do viés e do EMQ para as estações CRAT, CUIB e RECF. A figura 46 apresenta os valores desses mesmos indicadores para os dados coletados na UEPP, BOMJ e POAL, enquanto que a figura 47 apresenta tais indicadores para as estações PARA e BRAZ.

Como a latência das previsões do Z_{TD} disponibilizadas pela DSA é de 7,5 a 8,5 horas, as previsões para +12, +18 e +24 serão as mais apropriadas para os usuários entre as disponíveis, pois a anterior a essas estará atrasada e as posteriores já poderão ser substituídas pelos resultados provenientes da próxima rodada do modelo. Essas horas da previsão compõem a aqui denominada janela válida de previsões. Nas figuras 45 a 47 essa janela é destacada através de um quadro negro inserido nos gráficos, pois é onde deve ser enfocada a avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} . A qualidade dos valores disponíveis nas horas próximas a essa janela também é avaliada, pois tais valores podem ser utilizados na eventual ausência de valores mais adequados.



Figura 45 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) CRAT, (b) CUIB e (c) RECF.

Nas figuras 45, 46 e 47 é apresentado também o número de pares de dados considerados nessa avaliação. Para isso é empregado um esquema de colunas verticais na parte inferior dos gráficos, onde as cores dessas colunas são utilizadas como identificadores.

Nota-se que nas previsões +60 e +66 horas após a análise, esse número diminui em todas as comparações. Isso é devido ao fato de que nas rodadas das 12:00 UTC as previsões para +60 e +66 horas após a *análise* não são feitas. O número de comparações em todas as estações sazonais e locais considerados varia entre 80 e 160 para as horas de previsão menores que +60, e de 40 a 80 para as horas de previsão +60 e +66 horas.

Os valores apresentados nas figuras 45, 46 e 47 indicam que a qualidade das previsões apresenta-se melhor quanto mais próxima da *análise*. Isso é um resultado esperado devido ao aumento das incertezas do modelo de PNT ao ser integrado no tempo. Esses valores destacam também que a qualidade das previsões do Z_{TD} , nas diferentes estações GPS avaliadas, apresenta uma diferença bastante significativa. As estações GPS foram agrupadas nas figuras 45, 46 e 47 seguindo como critério a semelhança entre os valores EMQ na janela válida. Na figura 45, os valores do EMQ nas três estações GPS foram menores de 4 cm, enquanto que na 46 esses valores ficaram entre 4 e 7 cm e na 47 estão as estações GPS onde tais valores ficaram acima de 7 cm.

Dentre as estações GPS avaliadas na figura 45, a estação CUIB (figura 45b) foi a que gerou os melhores resultados. O EMQ dentro da janela válida para essa estação GPS foi de 3 cm e o viés foi negativo e maior que -2 cm. Além disso, sazonalmente as variações foram muito pequenas dentro da janela válida, o que mostra que uma boa qualidade das previsões foi obtida independentemente da época do ano. Os valores do viés apresentado nessa figura indicam uma pequena tendência e sempre negativa dentro da janela válida de previsões. Tal tendência é menor no outono e no verão nos três locais avaliados. Quanto aos valores do EMQ, eles independem da sazonalidade, com exceção do outono na estação de RECF, onde os valores foram maiores que os gerados nas outras estações sazonais e próximos de 5 cm.



Figura 46 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) UEPP, (b) BOMJ e (c) POAL.

Na figura 46 os valores do viés, apesar de serem pouco oscilantes, mostram tendências diferentes para os diferentes locais considerados. Enquanto que em Presidente Prudente o viés é positivo, nas estações de Bom Jesus da Lapa e Porto Alegre os valores são negativos. Essa tendência foi menor em Porto Alegre, onde os valores do viés foram maiores

173

que -2 cm. Com relação à dispersão, os valores do EMQ ficaram entre 4 e 7 cm. Destaque deve ser dado para os valores do EMQ gerados em Porto Alegre durante o inverno e primavera (entre 2,5 a 3,5 cm), pois os mesmo foram metade dos valores observados durante o verão e outono (5,5 a 6,5 cm). Isso deve ser devido ao fato dos efeitos gerados pela passagem dos sistemas de ar frio serem mais previsíveis durante o inverno e primavera do que durante o verão e outono.

Os resultados contidos na figura 47 mostram que nesses locais a qualidade das previsões do Z_{TD} é baixa e revelam que há regiões onde a versão atualmente disponível não é capaz de modelar adequadamente as variações do Z_{TD} . Nos dois locais considerados, os valores das medidas de tendência e de dispersão foram elevados. Os valores do viés foram positivos, variando de +7,0 à +10,0 cm dentro da janela válida de previsões em Brasília e de 9,0 à 11,0 cm em Curitiba. O EMQ também foi maior em Curitiba, variando de 8,0 a 11,0 cm, enquanto que em Brasília a variação foi entre 7,5 à 10,0 cm. Esses resultados deixam a desejar, pois são muito piores que os apresentados nas outras estações avaliadas. Sazonalmente verifica-se que durante o outono e o inverno, tanto a tendência como a dispersão é menor do que durante a primavera e verão. Sendo que essa diferença sazonal é mais acentuada em Brasília.



Figura 47 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) BRAZ e (b) PARA.

Na estação de Curitiba foram utilizados também na análise de qualidade das previsões do Z_{TD} valores obtidos a partir de radiossondas lançadas nessa cidade. Os valores do Z_{TD} das radiossondas foram obtidos ao aplicar o perfil vertical de umidade e temperatura em uma integração numérica na equação 21 e os valores de pressão na equação 4. Na figura 48 são apresentados os valores previstos pelo modelo de PNT em função dos valores gerados pelas radiossondas. Nessa figura também foram plotadas as estimativas do Z_{TD} obtidas a partir das observações GPS para avaliar a qualidade dessas estimativas que aqui foram utilizadas na avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} .



Figura 48 - Comparação dos valores do Z_{TD} previstos pelo modelo de PNT e os gerados pelo processamento dos dados GPS com os obtidos a partir de radiossondas.

Os resultados mostrados na figura 48 indicam que os valores obtidos via GPS apresentam boa concordância com os gerados a partir das radiossondas (EMQ de 2,5 cm). Além disso, eles tornam evidente a presença de um efeito sistemático nas previsões do Z_{TD} , pois apesar dos valores do desvio padrão das previsões do Z_{TD} e das estimativas GPS com relação as radiossondas serem iguais, os valores do viés são bastante discrepantes (9,2 e 2,0 cm, respectivamente).

6.5 Comentários adicionais

A causa provável do efeito sistemático verificado na estação localizada em Curitiba está associada ao fato dela estar situada em uma região montanhosa. Como a resolução do modelo global é de 100 km, os pontos da grade regular utilizados para interpolar valores do

modelo para as coordenadas dessa estação GPS, podem não ser capazes de modelar adequadamente o relevo acidentado encontrado nessa região. Isso está relacionado com os valores de pressão na superfície, cuja imprecisão tem um significativo impacto nos valores finais do Z_{TD} . Associado a isso está a qualidade do modelo de elevação do terreno utilizado na PNT. As imprecisões desse modelo associado a baixa resolução deve ser a provável causa dos erros observados em Brasília. O uso de modelos de PNT com melhor resolução horizontal pode minimizar essas imprecisões, pois os pontos da grade ficam mais próximos dos valores interpolados e um modelo de elevação mais preciso pode ser utilizado.

A utilização do modelo regional ETA para esse fim é uma boa opção. A versão desse modelo, atualmente operacional, possui resolução horizontal de 40 km. Provavelmente, essa versão, além de minimizar o efeito sistemático verificado nas regiões montanhosas, permitirá uma melhor modelagem espacial das pequenas oscilações do Z_{TD} , principalmente da componente úmida, pois é nela que tais oscilações são mais significativas. Na figura 49 são comparados os campos das *análises* geradas pelo emprego do modelo global (figura 49a) e do modelo regional ETA (figura 49b) para uma mesma época (0:00 UTC do dia 1° de junho de 2005).

Na figura 49 são claramente destacados os benefícios que o uso de um modelo de melhor resolução pode trazer para a modelagem dinâmica do Z_{TD} . O gradiente espacial do Z_{WD} é bastante suavizado com o uso do modelo global, devido à sua baixa resolução horizontal. No entanto, com a resolução do modelo ETA, esse gradiente, em termos espaciais, torna-se mais sensível, representando melhor as variações do Z_{WD} . Um outro ponto que pode ser observado é que nas regiões onde se localizam Brasília e Curitiba, nas quais os valores previstos pelo modelo global tendem a superestimar o Z_{TD} , os valores gerados pelo modelo ETA foram menores. O mesmo pode ser observado na região de Presidente Prudente, a qual, apesar de menor do que em Curitiba e Brasília, a mesma tendência foi observada. Apesar de

ser apenas um campo isolado, esse fato é um indicativo que com o emprego do modelo ETA os benefícios serão bastante significativos. Com a nova versão desse modelo, com resolução horizontal de 20 km ainda em fase de teste, poderá compor a metodologia ideal para gerar as previsões do Z_{TD} e minimizar as imprecisões encontradas nessa versão atualmente disponível.



Figura 49 – Campos do Z_{WD} sobre a região sudeste do Brasil provenientes das *análises* geradas com o emprego do (a) modelo global do CPTEC e do (b) modelo regional ETA para o dia 1° de junho de 2004 às 0:00 UTC.

178

7 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para validar as estimativas do IWV obtidas com o uso dos receptores GPS em bases terrestres e investigar a utilização dos dados desses receptores para o monitoramento do IWV, diversos fatores relacionados à esses assuntos foram abordados. Para a determinação da temperatura média troposférica foi realizada uma modelagem empregando uma grande série histórica de perfis de radiossondas lançadas no Brasil. Foi realizada uma validação dos valores do IWV-GPS obtidos em regiões com alta concentração de umidade, utilizando dados de diversos sensores empregados no experimento RACCI. A incerteza esperada na comparação entre os valores do IWV-GPS e do IWV-RS80 foi determinada ao empregar dados obtidos em experimentos de intercomparação de receptores GPS e de radiossondas, ambos provenientes de diversos fabricantes. Um estudo sobre as potencialidades dos valores do IWV-GPS foi realizado. Investigou-se os benefícios que se pode obter na PNT com a inclusão desses valores, e exemplificou-se diversas novas aplicações que exploram a alta resolução temporal obtida com o emprego dos receptores GPS em bases terrestres. Para destacar os benefícios obtidos pela Geodésia ao desenvolver esse trabalho em sinergia com a Meteorologia, foi realizada uma modelagem do Z_{TD} empregando previsões obtidas na PNT e uma avaliação da qualidade obtida foi realizada empregando um ano de dados.
7.1 Conclusões

A modelagem da temperatura média troposférica é algo bastante importante para assegurar a boa qualidade dos valores do IWV-GPS. Em regiões equatoriais, a incerteza de 4 K pode gerar erros de 0,45 kg m⁻² nos valores finais do IWV-GPS. Foram desenvolvidos 3 modelos apropriados para aplicações dentro do território brasileiro. Um nacional, um outro regionalizado e um terceiro denominado modelo numérico, o qual leva em consideração a variabilidade temporal e espacial da *Tm*. Os resultados obtidos na avaliação desses modelos mostraram que os três fornecem valores da *Tm* bastante satisfatórios para as regiões do território brasileiro. O modelo desenvolvido nos EUA gerou um EMQ de 4,74 K (BEVIS et al., 1992) e o modelo europeu gerou um EMQ de 3,16 K (EMARDSON, 1998). O valor do EMQ obtido ao avaliar o modelo brasileiro, com todas as radiossondas consideradas na modelagem, é de apenas 2,15 K. Em termos percentuais, o erro gerado pelo modelo apresentado aqui é de 0,75%, contra 1,67% no modelo norte americano e 1,13% no modelo europeu. O uso de um conjunto independente de radiossondas (lançadas no experimento RACCI) mostrou que para a região Amazônica o modelo regionalizado gera os melhores resultados (EMQ de 1,9 a 2,7 K).

No experimento de intercomparação, as radiossondas RS80, RS90 e GL-98 foram as que apresentaram resultados mais similares Os piores resultados foram verificados nas comparações em que participou a MKII, pois o valor da dispersão chegou a 4 kg m⁻². A radiossonda RS80, a mais utilizada operacionalmente, em comparação com as demais tende a subestimar a umidade. Com relação aos períodos diurno e noturno, as radiossondas apresentam um viés seco durante o dia em comparação com o sensor SW. A RS80 tende a

gerar valores 5,9 % mais secos durante o dia do que a noite, ao comparar com os valores gerados por esse sensor.

No experimento de intercomparação dos receptores GPS o receptor LEG1 apresentou menor dispersão com relação aos demais receptores. Por outro lado, o receptor Z-XII apresentou a maior dispersão e foi mais susceptível à influência da Ionosfera. Um resultado bastante importante gerados nesses experimentos é o valor final resultante da incerteza esperada na diferença entre os valores do IWV-GPS e os gerados pelas radiossondas. Os valores dessa incerteza com relação a RS80 variam de 4,6 a 4,9 % do valor do IWV medido.

A principal aproximação presente na quantificação do IWV a partir das observações GPS é a modelagem da temperatura média troposférica usando medidas realizadas na superfície. Como apresentados no capítulo 4, os resultados da modelagem da Tm na região Amazônica foram bastante satisfatórios. Esses resultados sugerem que nessa região o erro na conversão do Z_{WD} em valores do IWV é baixo. Por outro lado, devido ao grande fluxo da radiação solar incidente, o efeito da Ionosfera nos sinais GPS pode degradar a qualidade dos valores do IWV. Na comparação dos valores IWV-GPS com os provenientes das demais técnicas observou-se que o GPS gera valores mais úmidos do que as radiossondas RS80, mas com relação às outras técnicas remotas, como o fotômetro solar e o sensor de umidade HSB, os valores são mais secos. Nota-se que as radiossondas apresentaram uma tendência de subestimar umidade. Na comparação IWV-GPS com o IWV-RSO observa-se que as maiores discrepâncias foram registradas durante o período onde ocorre a maior intensidade dos efeitos da Ionosfera, o qual coincide com o período onde a radiossonda apresenta um viés seco, de forma que não foi possível isolar a influência de cada uma dessas fontes de erros. Na comparação dos valores do IWV-GPS, o fotômetro CIMEL superestima a umidade em torno de 2,33 kg m⁻² (4,5 %) e os resultados do sensor HSB são 1,0 kg m⁻² (1,9 %) maiores do que os valores do IWV-GPS.

181

Os resultados obtidos com o experimento de assimilação dos valores do IWV-GPS no modelo global de PNT do CPTEC mostraram que pontualmente a contribuição é bastante positiva fazendo que as análises geradas sejam mais próximas dos valores observados. Em um estudo do potencial das redes ativas de coleta contínua foi verificado que com poucas modificações na forma de coleta, e a definição de um centro de processamento dos dados GPS, tais redes poderão fornecer valores do IWV-GPS operacionalmente para alimentar os modelos de PNT operacionais do CPTEC. Coleta adicional utilizando sensores de temperatura, pressão e umidade na altura da antena é recomendada para se obter a melhor qualidade nas estimativas do IWV-GPS. Nesse processo verificou-se que as estimativas do IWV quase em tempo real podem ser obtidas para otimizar o processamento dos dados GPS, gerando resultados de melhor qualidade com menor latência. Os melhores resultados foram obtidos ao utilizar uma janela de 6 horas, com latência de 1 hora, proporcionando qualidade superior a 1.3 kg m⁻². Apesar das redes de receptores GPS no Brasil serem relativamente esparsas, os valores do IWV-GPS podem ser úteis para a assimilação em modelos de PNT entrando no sistema como uma informação adicional e independente. Na eventual ausência de outras fontes de informação, tais valores podem suprir a necessidade de valores de umidade.

No experimento de assimilação foi possível observar que a baixa densidade de valores disponíveis ao sistema PSAS faz com que a contribuição positiva na região dos valores assimilados passe a ser negativa em outras áreas onde houve ausência de observações. A melhor opção para esse processo é a integração dos valores do IWV-GPS com os campos de umidade obtidos por satélites. Utilizando a alta resolução temporal das estimativas do IWV-GPS há diversas aplicações nas Ciências Atmosféricas que poderiam se tornar viabilizadas. A integração com as radiossondas pode produzir perfis de umidade com alta resolução temporal. Nessas aplicações, as estações GPS do SIVAM apresentam-se com

grande potencial para o monitoramento do IWV em perfis com alta resolução temporal, pois em ambas estarão instaladas antenas GPS e radiossondas serão lançadas.

Os resultados obtidos na avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} mostraram que em algumas estações onde foram realizadas essas avaliações os resultados foram satisfatórios, enquanto que em outras foram encontrados efeitos sistemáticos devidos à baixa resolução horizontal do modelo e a interpolação dos valores de pressão para as regiões montanhosas. Considerando a complexidade matemática envolvida no modelo de circulação geral atmosférico presente na PNT, a tecnologia computacional empregada, e a qualidade obtida dos valores preditos do Z_{TD} , pode-se afirmar que a modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico é a mais adequada para as aplicações que requerem alta precisão em tempo real.

Nesse trabalho, diversos pontos abordados representam uma contribuição significativa ao tema, pois eles envolvem métodos e aplicações inéditas, apontando diferentes beneficios dos valores do IWV-GPS às Ciências Atmosféricas. A metodologia utilizada para modelar os valores da *Tm*, com o emprego de técnicas de análise multivariada, pode contribuir com a modelagem dessa variável em outras regiões do planeta. A avaliação do desempenho dos receptores GPS na quantificação do IWV em regiões com alta concentração de umidade, também é algo para ser ressaltado, pois a qualidade das medidas de umidade nessas regiões é bastante importante para as Ciências Atmosféricas. Um outro exemplo são os perfís de umidade com alta resolução temporal obtidos com a integração das radiossondas e os receptores GPS. Além desses, talvez o mais importante, apesar da fase inicial da pesquisa, é o estudo do comportamento das oscilações da série temporal do IWV nos períodos que antecedem os eventos de precipitação. Trata-se de algo que pode fazer das redes de receptores GPS em bases terrestres uma ferramenta de auxílio na previsão de precipitação de curto prazo, e por conseqüência, ajudar na prevenção de desastres naturais causados por tempestades intensas.

Nas diversas áreas da ciência, atualmente a interdisciplinaridade vem sendo bastante estimulada com o objetivo de minimizar os efeitos negativos do conhecimento especializado, restrito e fragmentado devido a disciplinarização do saber desde o início da Ciência Moderna (TRINDADE, 2003). A sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia, necessária para a utilização dos receptores GPS para quantificar o IWV, é um bom exemplo de interdisciplinaridade do conhecimento científico. Os resultados obtidos deixam bastante evidentes os benefícios gerados por essa sinergia para ambas as ciências e, por conseqüência, para a toda a sociedade brasileira.

7.2 Recomendações

Devido às características multidisciplinares das aplicações das redes de receptores GPS de coleta contínua às Ciências Atmosféricas, diversas perspectivas para essa atividade surgiram com o desenvolvimento desse trabalho. Podem-se destacar os seguintes tópicos:

– Recomenda-se que uma avaliação mais adequada dos modelos de *Tm* propostos deva ser feita envolvendo estações de radiossondas e até mesmo modelo de PNT, sobre diferentes regiões do Brasil e épocas do ano. Além disso, é necessário que uma avaliação das técnicas de interpolação temporal e espacial para o modelo numérico da *Tm* seja realizada no futuro, com o objetivo de definir a mais adequada;

Outros experimentos de comparação para validação da performance do GPS na Região
 Amazônica durante um período de baixa atividade solar (durante 2006 e 2007) devem ser
 feitos para avaliar a performance dessa técnica em tais circunstâncias;

– Elaborar uma estratégia para se obter estimativas do Z_{TD} na direção inclinada empregando redes densas de receptores GPS, com o objetivo de se determinar campos de umidade atmosférica em diferentes níveis;

 Avaliar a qualidade das estimativas obtidas com o processamento em tempo real empregando outros softwares como o Bernese e o GAMIT, e utilizando efemérides ultrarápidas do IGS;

– Devem ser realizados experimentos de assimilações dos valores do IWV-GPS de forma direta sem utilizar os *pseudo-temps* e os campos de IWV de satélites corrigidos com a integração dos valores do IWV-GPS. Testes com diferentes resoluções do modelo deverão ser feitos incluindo os valores IWV-GPS provenientes das estações da RBMC;

 Estudo de análise de freqüência da série temporal do IWV relacionando eventos de precipitação ocorridos no período para investigar a existência da correlação entre tais eventos e a variabilidade do IWV.

Tabi	ela A1. Valo	rtes dos coi	eficientes a	i da equaçã	o 16 para c) modelo esj	paço-temp	oral da Ten	nperatura N	dédia Trop	osférica.
Mês	A.Floresta	Belém	Brasília	C.Grande	Curitiba	F.Noronha	Galeão	Manaus	Natal	P.Alegre	S.Paulo
Jan	0,43075	1,11976	0,59382	0,46177	0,48748	0,33484	0,89326	0,83506	0,55615	0,61478	0,50942
Fev	0,58299	0,87533	0,66424	0,60004	0,58075	-0,21989	0,95423	1,03428	0,56085	0,52490	0,67102
Mar	0,94398	2752.40	ሪይሜሪሳ	0,43170	0,53148	0,82947	0,78725	969260	0,73713	02619/0	0,51438
Abr	0,59816	17000,1	0,33133	0,48553	11362(0	0,19997	97979/0	625160	0,77992	66.629'0	0,57304
Mai	0,40830	1,07154	0,35286	0,55574	1877 م	0,58690	0,66181	0,89101	0,73346	0,67231	0,56949
hun	0,13339	1,01920	0,38928	0,47933	0,508,60	0,53614	0,62797	0,766,60	0,65105	0,63814	21922(0
ΓY	0,33101	0,73448	0,36999	0,481 <i>97</i>	0,53072	0,53908	0,638.33	0,67180	0,65414	0,70686	0,67523
Ago	0,11905	0,851.52	0,31471	0,43625	0,64415	0,39938	0,71001	0,60481	0,47759	0,72138	0,65593
Set	0,49765	0,72175	0,38623	0,092,0	0,69447	0,36578	26906,0	0,72284	0,64188	0,79302	0,66027
Out	0,35493	0,51231	96092°0	0,50477	0,73370	0,56388	0,76418	0,76395	1,26584	0,79455	1681كر0
Nov	0,87418	0,73047	0,60752	0,513,0	0,62583	0,20067	0,67841	0,82449	0,47840	0,77484	0,52620
Dez	0,44175	0,83866	0,63727	0,43811	0,49102	0,08911	0,60848	0,94342	0,59588	0,58132	0,33092
Tab	ela A2. Valo	res dos co	eficientes b	da equaçã	o 16 para o) modelo esj	paço-temp	oral da Ten	nperatura N	dédia Trop	osférica.
Mês	A.Floresta	Belém	Brasília	C.Grande	Curitiba	F.Noronha	Galeão	Manaus	Natal	P.Alegre	S.Paulo
Jan	0,21104	-0,24283	0,00943	-0,05804	0,02657	-0,04206	0,14239	0,00694	0,01783	-0,02210	0,04980
Fev	-0,00514	-0,0903	22210/0	1602010-	0,06377	-0,17724	0,16530	-0,01842	9/.050/0	27020,0	0,10345
Mar	0,10546	-0,13935	0,10592	-0,10278	0,10536	-0,33546	0,16893	-0,02283	-0,13666	0,01442	0,12142
Abr	-0,01076	-0,14044	0,12076	0,06414	0,08661	-0,03863	0,08324	-0,15358	-0,01485	0,09318	0,15669
Mai	-0,17753	-0,36619	-0,04232	0,00261	0,10753	-0,19740	-0,00936	160000-	006690(0	0,06365	0,13473
шų	-0,33644	-0,07717	-0,00101	0,03218	0,11767	0,12175	-0,05814	0,002005	-0,00266	0,04395	<i>1177</i>
ΓĽ	-0,33255	-0,13371	-0,12798	-0,02850	0,02446	-0,01229	-0,09162	0,008.39	0,02470	-0,00366	0,078.25
Ago	-0,21:303	-0,02953	0,00424	-0,16795	9962010	-0,01 10,0	-0,12602	0,02134	-0,07029	-0,01878	0,07645
Set	-0,08071	-0,02923	0,01057	-0,18046	9680010	-0,16345	-0,04699	0,03487	-0,21354	-0,05704	0,05807
ort O	-0,22,07	-0,09234	8906010	-0,03760	0,09932	-0,13786	0,01244	0,03954	-0,04145	-0,02389	0,05726
Nov	0,08144	0,17038	0,00842	0,02967	0,06047	-0,10257	0,06643	0,03571	0,18966	0,00481	0,11393
\mathbf{Dez}	0,05416	-0,10970	-0,02804	-0,04736	6162010	0,07486	0,06775	8,200,0	0,002.70	-006000	01950(0

APÊNDICE A

Valores dos coeficientes a e b da equação 16 do modelo espaço-temporal da

temperatura média troposférica

osférica.	S.Paulo	-0,01721	8260010	-0,00240	0,01780	-0,00561	-0,00841	0,00405	8060010	-0,00307	-0,01259	-0,00549	-0,03472	č	ostênca.	S.Paulo	89,1151	-9,9487	20,7702	-30,6876	-1,33.59	12,3768	13,6330	20,5385	36,7926	79,5181	24,3596 131,0373
dédia Trop	P.Alegre	-0,01820	-0,01437	-0,00155	0,03590	907033	0,06527	0,07282	0,04012	0,04265	0,02584	0,00861	-0,00288	E	dédia Trop	P.Alegre	127,7113	111,2264	88,7506	2,8867	17,4291	41,7940	75,7793	89,3378	106,8170	73,5762	51,2016 123,1556
nperatura N	Natal	-0,01974	-0,02446	0,01147	0,01736	0,00340	-0,00708	-0,00250	-0,01437	900000	0,13405	0,01538	-0,00671		nperatura N	Natal	105,1038	71,0521	203,3024	67,8742	0,9934	97,1357	68,0523	218,1507	312,2415	-38,7329	-46,3 <i>6</i> 99 107,6896
oral da Ten	Manaus	හැදුරු	0,07298	0,07438	0,08915	0,06356	0,06648	0,032.64	0,02502	0,02274	0,04212	0102010	0,05748	E - -	oral da Ten	Manaus	27,9770	62666-	26,0542	129,4496	19,3208	50,97.28	75,9285	84,4196	35,6144	16,3875	2,6438 -5,41 <i>67</i>
paço-temp(Galeão	0,00101	0,00357	-0,01287	0,00813	0,02439	0,021.54	0,01253	0,01430	සහර	-0,01850	16/00/0-	-0,00763		paço-temp	Galeão	-123,0626	-164,4335	-116,3996	1,0883	98,2906	138,3656	190,0446	203,6287	65,5296	48,6131	18,32 <i>27</i> 37,5588
modelo es	F.Noronha	-0,04163	-0,16144	-0,00228	-0,15329	0626010-	-0,04387	-0,03579	-0,01141	05610/0	0,06711	-0,06455	-0,09162	:	modelo es	F.Norotha	233,9931	545,8628	376,5833	279,2629	318,7103	3,3232	142,8246	181,6946	342,9148	254,5248	3 <i>31,60</i> 96 1 <i>93,69</i> 75
o 16 para o	Curitiba	-0,02371	0,700,0	0,00484	0,01942	0,026.50	0,00162	0,00733	0,02022	0,000 S	0,01045	0,00406	-0,01869	:	oloparao	Curitiba	118,4900	54,7712	31,8334	46,2381	31,4992	27,2810	100,0553	58,1908	72,0705	-21,9441	45,12 <i>57</i> 114,6006
da equação	C.Grande	-0,02059	-0,00946	-0,03436	-0,01416	-0,00431	-0,01119	9600000	-0,00267	-0,00668	-0,01 148	-0,01836	-0,04577	2	da equaçã	C.Grande	205,2144	127,923S	2 <i>51,</i> 7564	82,4429	119,7767	114,1827	170,573,071	316,3822	341,7629	172,5929	106,7315 203,6884
eficientes c	Brasília	-0,05827	-0,03810	-0,05395	-0,04933	-0,03749	0,00448	-0,00503	-0,03275	-0,02240	-0,01431	-0,03220	-0,02420		eficientes d	Brasília	104,0828	76,7963	27,9508	81,6428	221,0409	170,6290	290,9885	189,1647	161,4157	28,6024	98,5188 121,8238
a A3. Valores dos coe:	Belém	0,05873	0,02717	0,08207	0,05328	0,0520(0	0,04711	96720,0	0,07475	0,02568	0,00654	570EQ(0	0,02133		res dos co	Belém	192,7114	114,7033	135,3293	122,3305	332,5012	57,2005	200,6838	58,1597	100,8228	228,6385	-104,5176 139,7647
	A.Floresta	-0,00402	0,100,0	-0,01 186	0,00662	-0,00441	-0,01688	363E010	0,00213	-0,03768	-0,05920	-0,04113	0,00239	:	la A4. Valo	A.Floresta	-49,8394	115,9087	-98,0137	117,5009	339,3731	579,7700	515,1740	461,9440	221,6430	407,1900	-51,2485 100,0195
Tabel	Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	hun	ΓĿΥ	Ago	Set	out O	Nov	Dez	Ē	Tabel	Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	шų	ĿĿſ	Ågo	Set	đđ O	Nov Dez

Valores dos coeficientes c e d da equação 16 do modelo espaço-temporal da

temperatura média troposférica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDOULAEV, S.; BUINITSKI, V.A.; STAROSTIN, A.; SHVETSOV, V.S. A análise da marcha temporal da intensidade do campo da nebulosidade e parâmetros da camada de superfície. In: CONFERÊNCIA DE MODIFICAÇÃO DE TEMPO. 1987, Kiev. Anais...: Leningrado: Hidrometeoizdat, 1990. p. 171-172.
- AIUB-ASTRONOMISCHES INSTITUT UNIVERSITÄT BERN. Center for Orbit Determination in Europe (CODE): Global Ionosphere Maps produced by CODE. Disponível em http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html. Acessado em 26 de set. de 2005.
- ANTHES, R. A. Data assimilation and initialization of hurricane prediction models. J. Atmos. Sci., v. 31, p. 702-719, 1974.
- ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; KUO, Y.H. Applications of COSMIC to Meteorology and Climate. Special issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 11(1), p. 115-156. 2000.
- ARAVÉQUIA, J. A. Funções de influência com dependência temporal: aplicações na interpretação da deriva de prognósticos de tempo e da gênese de anomalias climáticas. 2005. 242 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- ASKNE, J.; NORDIUS, H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, v. 22, p.379-386, 1987.
- BAKER, H. C.; DODSON, H. A.; PENNA, N. T.; HIGGINS, M.; OFFILER, D. Groundbased GPS water vapour estimation: potential for meteorological forecasting. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. v. 63, p. 1305-1314, 2001.
- BENJAMIN, S.G.; BRUNDAGE, K. J.; MONORE, L. L. The rapid update cycle. Part. I: Analysis/model description. *Technical Procedures Bulletin.* v. 416, NOAA/NWS, 16 p. 1994.
- BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T. A.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research. v. 97, p.15.787-15.801, October. 1992.
- BEVIS, M.; CHISWELL, G.; HERRING, T. A.; ANTHES, R.; ROCKEN, C.; WARE R.H. **GPS Meteorology: mapping zenith wet delays into precipitable water**. J. Appl. Meteor., v.33, p.379-386, 1994.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

- BEVIS, M.; CHISWELL S.; BUSINGER S.; HERRING T. A.; BOCK, Y. Estimating wet delays using numerical weather analyses and predictions. *Radio Science*, 31-33, p.477-487, 1996.
- BLACK T. L. The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 256-278, 1994.
- BOCCOLARI, M.; FAZLAGIC, S.; LOMBROSO, L.; FRONTERO, P.; PUGNAGLI, S.; SANTANGELO, R.; CORRADINI, S.; TEGGI S. Precipitable water estimation in comparison between zenith total delays (ZTD) by radio sounding data and by GPS data. *Geophysical Observatory*, DSI, University of Modena and Reggio Emilia, Italy, 2001.
- BOEHM, J.; SCHUH. H. Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984. 2004.
- BOKOYE, A. I.; ROYER, A.; O'NEILL, N. T.; CLICHE, P.; MCARTHUR, L. J. B.; TEILLET, P. M.; FEDOSEJEVS, G.; THERIAULT, J. M. Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. D15, 4480, doi: 10.1029/2002 JD002721, 2003.
- BRAUN, J.; ROCKEN, C.; WARE, R.; ALBER, C. A technique determining single satellite, single station information from double difference GPS residuals. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)/GPS Research Group. Technical Report. 2000.
- BRUNNER, F. K.; GU. M. Na improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manusc. Geod.*, v.16, p.205-214, 1991.
- CAMARGO, E. C. G. Desenvolvimento implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING). Cap. 2. São José dos Campos, 1997. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.
- CHARNEY, J. G.; FJORTOFT, R.; VON NEUMANN, J. 1950: Numerical intention of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, n. 2, p. 237-254.
- 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. *Mon. Wea. Rev.*, v.126, p.2913-2926, 1998.
- CORREIA, F. W. S. Modelagem do Impacto de Modificações da Cobertura Vegetal Amazônica no Clima Regional. 2005. 366 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

- CPTEC CENTRO DE PREVISAO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS. Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC. Cachoeira Paulista, 2005. Disponível em: <u>http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_global.shtml</u>. Acessado em: 27 mai. 2005.
- CUCURULL, L.; NAVASCUES, B.; RUFFINI; G.; ELÓSEGUI, P.; RIUS, A.; VILÀ, J. The use of GPS to valuate NWP system: the HIRLAM model. *Journal Atmospheric and Oceanic Technology*. v. 17, p. 773-787, 2000.
- CUCURULL, L.; RIUS A.; VANDENBBERGHE F.; PONDECA M. **4D–VAR assimilation of GPS-derived ZTD: a case study.** In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation. n 14 2001, Salk Lake City- Utah, 2001.
- DAVIS, J. L.; HERRING, T. A.; SHAPIRO I.; ROGERS, A .E.; ELGENED, G. Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Sci.*, v. 20, p.1593-1607, 1985.
- DAVIS, C.A. Observations and modeling of a mesoscale cold surge during WISPIT. In: VI CONFERENCE ON MESOSCALE PROCESSES, July 18-22, 1994, Portland, Oregon. Anais... Boston: AMS, 1994 p.328-331.
- DAUBECHIES, I. 1992. Ten Lectures on Wavelets. SIAM, Philadelphia, PA.
- DA SILVA, A.; GUO, D J. 1996: Documentation of the Physical-space Statistical Analysis System (PSAS) Part I: The Conjugate Gradient Solver Version PSAS-1.00. *DAO Office Note 96-02, 66 pp.* [Disponível no Data Assimilation Office, GSFC, Greenbelt, MD 20771 e no endereço eletrônico http://dao.gsfc.nasa.gov/subpages/office-notes.html].
- DE MATOS, J. G. Z. Sensibilidade no uso de "Pseudo-Temps" na Assimilação de dados do MCGA/CPTEC/COLA. 2005. 51 f. .Proposta de Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Meteorologia do INPE.
- DSA-DIVISÃO DE SATÉLITES E SISTEMAS AMBIENTAIS. Sondagem atmosférica utilizando Satélites artificiais. Cachoeira Paulista, 2005. Disponível em: <u>http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/sondagens/sondagens_new.htm</u>. Acessado em: 30 out. de 2005.
- DUAN, J.; BEVIS, M.; FANG, P.; BOCK, Y.; CHISWELL, S.; BUSINGER, S.; ROCKEN, C.; SOLHEIM, F.; HOVE, T.; WARE, R.; MCCLUSK, S.; HERRING, T. A.; KING, R. W. GPS meteorology: Direct Estimation of the absolute Value of Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology*, v. 35, p.830-838, 1996.
- EMARDSON, T. R. Studies of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. School of Electrical and Computer Engineering Charmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Technical Report n. 339, 1998.

- EMARDSON, T. R.; JOHANSSON J. M.; ELGERED, G. The systematic behavior of water estimates using four years of GPS observation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 38, n. 1, p.324-329, 2000.
- ESTEY, L. H.; MEERTENS, C. M. **TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data.** Pub. John Wiley & Sons. v. 3, n.1, 1999, p. 42-49.
- FALVEY, M.; BEAVAN, J.; MCGREGOR, J. **GPS** precipitable water measurements made during the SALPEX'96 experiment. In: 9Th Sat. Met/Ocean. Paris, France, 1998.
- FARGE, M., Wavelet transforms and their applications to turbulence. Ann. Rev. Fluid Mech., n. 24, p. 395-457, 1992.
- FERREIRA, S. H. S. Análise do procedimento de assimilação de sondagens derivadas de satélites e de seu impacto na previsão de tempo utilizando um sistema estatístico em espaço físico. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- FERREIRA, N. J. Aplicações Ambientais Brasileiras dos Satélites NOAA e TIROS-N. Oficina de textos. 2004, 340p.
- FERRONSKI, S.V. As observações dos pulsos hogerentes das características da atmosfera com o período de aproximadamente 1,5 hora. *Física da Atmosfera e do Oceano*, Moscova, v.20, p.922-928, 1984.
- FORTES, L.P.S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC).** 1997. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- FOSTER, J.; BEVIS, M.; BUSINGER, S. GPS Meteorology: Sliding-window analysis J. Atmos. Oceanic Technol., v. 22 n. 6, p. 687–695, 2005.
- FUJIWARA, M.; SHIOTANI, M.; HASEBE F.; VÖMEL, H.; OLTMANS, S. J.; RUPPERT, P. W.; HORINOUCHI, T.; TSUDA T. Performance of the Meteolabor "Snow White" chilled-mirror hygrometer in the tropical troposphere: Comparisons with the Vaisala RS80 A/H-Humicap sensors. J. Atmos. Oceanic Technol., n.20, p.1534-1542, 2003.
- GREEN, M. S.; SILVERMAN, B. W. Non-parametric regression and generalized linear models. New York: Chapman and Hall, 1994.
- GREGORIUS THIERRY. How it Works... GIPSY OASIS II, Department of Geomaties University of Newcastle upon Tyne, 1996.
- GUO, Y.-R.; KUO, Y.-H.: Testing of Newtonian nudging technique for mesoscale dynamic initialization. In: Proc. Workshop on limited-Area Modeling Intercomparison. 1998. Boulder, CO, National Center for Atmospheric Research. p. 155-164.

- HARTMAN, D. L. Global Physical Climatology. Ed. Academic Press, California: 410 p, 1994.
- HEIMBACH, J.A.; ENGEL, T.M. The use of limited surface networks to measure mesoscale phenomena. *Mon. Wea. Rev., Boston*, v.115, p. 118-129, 1987.
- HERDIES, D. L., P. L. DA SILVA DIAS, G. C. MEIRA, M. MENDONÇA. 2004: Assimilação de dados durante o experimento SALLJEX utilizando o modelo global do CPTEC/INPE. Anais do XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Fortaleza – CE.
- HERDIES, D.L., S.H. FERREIRA, J.P. BONATTI, R. CINTRA E A. DA SILVA, 2002: O Sistema de Assimilação de Dados Atmosféricos Global do CPTEC/INPE. Anais do XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Foz do Iguaçu– PR.
- HIGGINS, M. Simulated 1D-variational assimilation of ground based GPS measurements of total zenith delay. *The Met Office: Numerical Weather Prediction. Technical Reports* n. 285, Nov. 1999.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER H.; COLLINS, J. Global Positioning System Theory and Practice. 5. Ed.: Springer-Verlag. New York 2001. 382p.
- HOGG, D. C.; DECKER, M. T.; GUIRAUD, F. O.; GARNSHAW, K. B.; MERRITT, D. A.; MORAN, K. P.; SWEEZZY, W. B.; STRAUCH, R. G.; WESTWATER, E. R.; LITTLE, C. G. An automatic profile of the temperature, wind and humidity in the troposphere. J. Climate appl. Meteor., v.22, p.807-831, 1983.
- HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I.; TANRE, D.; BUIS, J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK I.; SMIRNOV, A. AERONET A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, 66, p.1-66, 1998.
- HUANG, X. Y. H. VEDEL, N. GUSTAFSSON, D. OFFILER, J. A. GARCIA- MOYA, R. FERRITTI, S. DE HAAN, H. JARVINEN, O. LESNE, G. ELGERED, H.- P. PLAG, R. PACIONE, A. RIUS, E. BROCKMANN, J. DOUSA, H. VAN DER MAREL. 2003: The TOUGH project (Targeting Optimal Use of GPS Humidity Measurements in Meteorology). Proc. International Workshop on GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, Jan. 14-17, eds. T. IWABUCHI; Y. SHOJI, Japan Meteorological Agency, 2003.
- IAG-USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. RACCI - Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season. São Paulo: 2005. Disponível em: < <u>http://www.master.iag.usp.br/lba/index.php</u>>. Acessado em: 10 de set. de 2005.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Rede Brasileira de Monitoramento continuo. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em <<u>http://www.ibge.gov.br/home/</u> geociencias/geodesia/default.shtm>. Acessado em 24 de out de 2005.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

- ICAO INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: World wide CNS ATM Systems Implementation Conference. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em <<u>http://www.icao.int/icao/en/ro/rio/</u>>. Acessado em 24 de out de 2005.
- INGOLD, T.; SCHMID, B.; MÄTZLER, C.; DEMOULIN, P.; KÄMPFER, N. Modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapor from solar transmittance measurements in the 0.72, 0.82 and 0.94 absorption bands. *Journal of geophysical research*, v.105, n. D19, p. 24327-24343, 2000.
- INPA. Instituto Pesquisas da Amazônia. LBA Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia. Manaus: 2005. Disponível em: < http://lba.inpa.gov.br/.> Acessado em: 10 de set. de 2005.
- IVANOV, A.; KATS, A.; KURNOSENKO, S.; NASH, J.; ZEITSEVA, N. WMO international radiosonde comparison, Phase 3. WMO Instruments and Observing Methods Technical Report, n.40, p.135, 1991.
- IWABUCHI, T.; NAITO, T. I.; NANNOJI, N. A comparison of Global Positioning System retrieved precipitable water vapor with the numerical weather prediction data over the Japanese Islands. *Journal of Geophysical Research D: Atmosphere*. 105(4). P. 4573-4585, 2000.
- JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning. In: IONGNSS - INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation, n. 16, Portland, Oregon, 2003.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN D. W. "Applied Multivariate Statistical Analysis". New Gersey, 1992.
- JUPP, S.; POWE, M.; OWEN, J.; BUTCHER., J. Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global Positioning Applications. Defense Science and Technology Laboratory, UK.
- JUPP, A. M. An NWP forecast impact trial using GPS zenith total delay measurements. Journal of Geophysical Research, v. 5, p.12843, 2003.
- KALNAY, E. 2003: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, London, 341pp.
- KING, R. W.; BOCK, Y. Documentation of GAMIT GPS analysis software, version 9.4, Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institution of Oceanography. 1996.
- KINTER, J. L. et al. The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model. *Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies.* Report v.1, n. 51. Calverton, USA, 1997.

- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. Journal of South African Institution of Manning and Metallurgy, Johannesburg, v. 52, p. 119-139, 1951.
- KUNCHES, J. M. In the Teeth of Cycle 23. Space Environment Center, NOAA. In: IONGPS, INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation, n. 14 2001, Salk Lake City-Utah, 2001
- KUO, Y. H., GUO, Y. R.; WESTWATER, E. R. Assimilation of Precipitable Water Into Mesoscale Numerical Model. *Mon. Wea. Rev.*, v.121, p.1215-1238, 1993.
- KUO, Y. H.; ZUO, X.; GUO, Y. R. Variational Assimilation of Precipitable Water Using Nonhydrostatic Mesoscale adjoin Model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, v.124, p.122-147, 1996.
- LAMBRIGTSEN, B. H.; CALHEIROS, R. V.; The humidity sounder for Brazil an international partnership. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, v.41, p. 352-361, 2003.
- LEDVINA, D. V.; PFAENDTNER, J. Inclusion of Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) total precipitable water estimates into the GOES-1 data assimilation system. *Mon. Wea. Ver.*, v. 123, p.3003-3015, 1995.
- LEICK, A. GPS satellite surveying. ed.: John Wiley & Sons, New York 1995. 560p.
- LI, Z. Production of regional 1 km x 1 km water vapor fields through the integration of GPS and MODIS data. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation., n. 17, 2004, Long Beach-California, 2004
- LIMA, W. F. A.; MACHADO, L. A. T. Análise do sensor HSB na estimativa do conteúdo integrado de vapor d'água durante o experimento RACCI/LBA. *Revista Brasileira de Meteorologia. No Prelo*, 2005.
- LORENC, A. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 112, n. 474, p.1177-1194, 1986.
- LYNCH, P.; GUSTAFSSON, N.; SASS, B. H.; CATS, G. 2000: Final report of the HIRLAM 4 Project, 1997-1999. Disponível em: <u>http://www.maths.tcd.ie/~plynch/</u> <u>Publications/H4FR_Contentes.html</u>. Acessado em 26 de set. de 2005.
- MACDONALD, A.; XIE Y. On the Use of Slant Observations from GPS to Diagnose three dimensional water vapor using 3DVAR. In: PROC. 4TH INTEGRATED OBSERVING SYSTEMS SYMP, 2000 Long Beach CA: (Amer. Met. Soc.), 2000 p. 62-73
- MANZI, A.; PLANTON, S. A simulation of Amazonian deforestation using a GCM calibrated with ABRACOS and ARME data. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. eds. Amazonian Deforestation and Climate. Chichester: John Wiley, 1996, p. 505 - 529.

- MAREL, H. Exploitation of Ground Based GPS for Numerical Weather Prediction and climate applications in Europe. *Delf University of Technology, Department of Geodesy, Thijsseweg* 11, 2629 JA Delf, The Netherlands, 2001.
- MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Sci.* v. 7, p. 223-231, 1972.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores gps de dupla freqüência para a produção de mapas da ionosfera para a Região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 56(1) julho, 2004.
- MELFI, S. H.; WHITEMAN D.; FERRARE. Observation of atmospheric fronts using Raman lidar moisture measurements. J. Appl. Meteor., v.28, p.789-806, 1989.
- MENDES, V. B.; PRATES, G.; SANTOS, L.; LANGLEY, R.B. An evaluation of the accuracy of models for the determination of the weighted mean temperature of the atmosphere. Proceedings of In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation. January 26-28, 2000, Pacific Hotel Disneyland, Anaheim, CA.
- MINITAB. MINITAB QUALITY COMPANION. 2005: **MINITAB Statistical Software.** Disponível em <<u>http://www.minitab.com</u>>. Acessado em 25 de out. de 2005
- MONICO, J. F. G. Posicionamento por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma solução para a Geodinâmica. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.18, p. 39-48, 2000a.

2000b: **Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações.** Editora Unesp. 291pp.

- MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T. **GPS receiver intercomparison** experiment in Brazil. A ser submetido para *GPS Solution*. 2005.
- NAITO, I.; HATANAKA, Y.; MANNOJI, N.; ICHIKAWA, R.; SHIMADA, S.; YABUKI, T.; TSUJI, H.; TANAKA, T. Global positioning system project to improve Japanese weather, earthquake predictions. *American Geophysical Union.* v. 79, p. 301–308, 1998.
- NASA. NATIONAL AERONAUTICS SPACE ADMINISTRATION. 2005a: GENESIS -Global Environmental & Earth Science Information System. Disponível em <<u>http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS</u>>. Acessado em 25 de out. de 2005
- NASA. NATIONAL AERONAUTICS SPACE ADMINISTRATION. 2005b: IGS International GNSS Service. Disponível em <<u>http://igscb.jpl.nasa.gov</u>>. Acessado em 26 set de 2005.
- NASA. NATIONAL AERONAUTICS SPACE ADMINISTRATION. 2005c: AQUA NASA Earth Science satellite mission. <<u>http://www.aqua.nasa.gov/</u>>. Acessado em 24 set. de 2005.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

- NIELL, A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n.B2, p. 3227-3246, 1996.
- Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. *Phys. Chem. Earth*, v. 26, p.475-480, 2001.
- **Information from a numerical weather model for improving atmosphere delay estimation in geodesy.** In: THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON GPS METEOROLOGY – GPS METEOROLOGY: GROUND-BASED AND SPACE-BORNE APPLICATIONS, 2003. Tsukuba-city, Ibaraki, Japan.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v.4, p.957-988, 1991.
- PACIONE, R.; SCIARRETTA, C.; FIONDA, E.; BORDONI, F. U.; FERRARA, R. GPS and Ground-Based Microwave Radiometer PWV: A Case Study at Cagliari Astronomical Station. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation., n. 14, 2001, Salk Lake City-Utah, 2001a.
- PACIONE, R.; SCIARRETTA, C.; FACCANI, C.; FERRETTI, R.; VESPE, F GPS PW assimilation into MM5 with the nudging technique. *Phys. Chem. Earth*, v. 26, p.481-485. 2001. 2001b.
- PAUKKUNEN, A.; ANTIKAINEM, V.; JAUHIAINEN, H. Accuracy and performance of the new Vaisala RS90 radiosonde in operational use. In: 11TH SYMPOSIUM ON METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AND INSTRUMENTATION, 2001, Albuquerque, New Mexico, USA.
- PLANA-FATTORI, A.; LEGRAND, M.; TANRÉ, D.; DEVAUX, C.; VERMEULEN, A. Estimating the atmospheric water vapor content from Sun photometer measurements. J. Appl. Meteorol., v. 37, p.790-804, 1998.
- REDDER, C.; DA SILVA, A.2001: The ODS Library Documentation: Version 2.16. Data Assimilation Office, *NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771*, February 2001
- REIGBER, C.; GENDT G.; DICK, G.; TOMASSINI M. Near real- time water vapor monitoring in a German GPS network and assimilation into weather forecast model. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation, n 14 2001, Salk Lake City- Utah, 2001.
- REVERCOMB, H. E.; TURNER, D. D.; TOBIN, D. C.; KNUTESON, R. O.; FELTZ, W. F.;
 BARNAND, J.; BÖSENBERG, J.; CLOUGH, S.; COOK, D.; FERRERE, R.;
 GOLDSMITH, S. GUTMAN, R. HALHORE, B. LESHT, J. LILJEGREN, H. LINNÉ, J.
 MICHALSKY, J.; MORRIS, V.; PORCH, W.; RICHARDSON, S.; SCHIMID, B.;
 SPLITT, M.; VAN HOVE, T.; WESTWATER, E.; WHITEMAN, D. The ARM
 program's water vapor intensive observation periods. Overview, initial

accomplishments, and Future Challenges. Bull. Am. Met. Soc., v.84; n.2, p.217-236, 2003.

- RICHARDSON, L. F. 1922: Weather Prediction by Numerical Process, Cambridge University Press, London.
- ROCKEN, C.; ANTHES, R.; EXNER, M.; HUNT, D.; SOKOLOVSKIY, S.; WARE, R.; GORBUNOV, M.; SCHREINER, W.; FENG, D.; HERMAN, B.; KUO, Y.; ZOU, X. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. J. Geophys. Res., v.102, p.29849-29866, 1997a.
- ROCKEN, C.; VAN HOVE, T.; WARE, R. H. Near Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor. *Geophy. Res. Lett.*, v.24, p.3221-3224, 1997b.
- ROSENKRANZ, P. W. Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, v.39, p.2429-2435, 2001.
- ROSS, R. J.; ROSENFELD, S. Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for Global Positioning System applications. *Journal of Geophysical Research*, v.102, n.D18, p.21.719-21.730, September, 27, 1997
- ROTHACHER, M.; MERVART, L. Bernese GPS Software Version 4.0 Reference Manual, Technical Report. Berne, 1996.
- SAASTAMOINEM, J. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction. Bulletin Geodésiqué, Vol. 105, Set 1972, Vol. 106, Dec. 1972, Vol. 107, Mar, 1973.
- SAPUCCI, L F; MONICO, J. F. G. Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território Brasileiro utilizando GPS. In: Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, 2001, v. 1, p. 47-61.
- SAPUCCI, L. F. Precipitable Water Measurements Using GPS: a Case Study in Brazil. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation., n. 14 2001, Salt Lake City, Utah. 2001a.

Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS. 2001b. 165 f. Dissertação (Mestrado Em Ciências Cartográficas) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; SILVEIRA, R. B.; FISCH, G.; MONICO, J. F. G. Analysis of relative humidity sensors at WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil. J. Atmos. Oceanic Technol., v. 22, n.6, p.664-678, 2005a.

- SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G.; PLANA-FATTORI, A. Integrated water vapor quantification in Amazonian regions. "In preparation". *J. Atmos. Oceanic Technol*, 2005b.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T. **GPS aplicado à meteorologia brasileira: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real.** Em preparação. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2005c.
- SAPUCCI L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. Avaliação da modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico para a América do Sul. Em preparação. Revista Brasileira de Cartografia, 2005d.
- SCHMID, B.; MICHALSKY, J.; HALTHORE, R.; BEAUHARNOIS, M.; HARRISON, L.; LIVINGSTON, J.; RUSSELL, P.; HOLBEN, B.; ECK, T.; SMIRNOV, A. Comparison of aerosol optical depth from four solar radiometers during the fall 1997 ARM intensive observation period. *Geophysical Research Letters*, v. 26, n. 17, p. 2725-2728, 1999.
- SCHMID, B., J. MICHALSKY, R, D. W. SLATER. J. C. BARNARD, R. N. HALTHORE, J. C. LILJEGREN, B. N. HOLBEN, T. F. ECK, J. M. LIVINGSTON P. B. RUSSELL, T. INGOLD AND I. SLUTSKER, 2001: Comparison of columnar water-vapor measurements from solar transmittance methods. *Applied Optics*, 40, N. 12, 1986-1896.
- SCHIMIDLIN, F. J., Report of the WMO radiosonde relative humidity sensor intercomparison: *Phase II*, 8-26 September 1995. Instruments and Observing Methods, Ed., WMO. Technical Report. 1998.
- SCHUELER, T.; HEIN G.W.; BIBERGER R. A global analysis of the mean atmospheric temperature for GPS water vapor estimation. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation. n 14 2001, Salk Lake City- Utah, 2001
- SEEBER, G. 1993. Satellite Geodesy: Foundations, Methods & Applications. Walter de Gruyter, Berlin New York, 531pp.
- SHOJI, Y.; SEKO, H.; AONASHI, K.; NAKAMURA, H.; ICHIKI, A. **GPS/MET Japan** summer campaign 1997 in Tsukuba. In: 9TH SAT. MET/OCEAN. 1998. Paris.
- SILVEIRA, R.; FISCH, G.; MACHADO, L. A. T.; DALL'ANTONIA, JR A. M.; SAPUCCI, L. F.; FERNANDES, D.; NASH, J. WMO - Intercomparison of GPS radiosondes -Executive Summary. Executive Summary. Geneve: WMO, 2003 Suiça/Inglês. Meio de divulgação: Impresso. <u>http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/ publications/IOM-76-GPS-RSO/Intercomp-RSO-Brazil2001-ExecSummary.pdf</u> Relatório IOM - 76 (TD 1153).
- SOUZA, R. A. F.; CEBALLOS, J. C.; CARVALHO, J. C. Inferência de perfis atmosféricos utilizando o ICI com emulação dos canais AMSU-B a partir de dados AIRS-AQUA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza-CE.

- SMITH, W. L. The retrieval of atmospheric profiles from VAS geostationary radiance observations. J. Atmos. Sci., v.40, p.2025-2035, 1983.
- SMITH, T. L.; BENJAMIM, G.; SCHWARTZ, B. E.; GUTMAN, I. S. Using GPS-IPW in a 4-D data assimilation system. *Earth Planets Space*, v.52, p. 921-926, 2000.
- SPILKER, J.; J. JR., **Tropospheric Effects on GPS.** American Institute of Aeronautics and Astronautics 1994. v. 1, Capítulo 13, p. 517 546
- THAYER, D. An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, v.9, p.803-807, 1974.
- TOMASSINI, M.; GENDT, G.; DICK, G.; RAMATSCHI, M.; SCHRAFF, C. Monitoring of integrated water vapour from ground-based GPS observations and their assimilation in a limited-area NWP model. *Phys. Chem. Earth*, 27(A4-5), p.341-346, 2002.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bull. Amer. Meteor. Soc., v.79, p.61-78, 1998.
- TRINDADE, L. dos S. P. Interdisciplinaridade: Necessidade, Origem e Destino. *Revista* Sinergia, v.4, n.1, 2003.
- TSUDA, T.; HEKI, K.; MIYAZAKI, S.; AONASHI, K.; HIRAHARA, K; NAKAMURA, H.; TOBITA, M.; KIMATA, F.; TABEI, T.; MATSUSHIMA, T.; KIMURA, F.; SATOMURA, M.; KATO, T.; NAITO, I. **GPS meteorology project of Japan - exploring** *frontiers of geodesy. Research News Earth Planets Space*, 50(10). 1998.
- TURNER, D. D.; B. M. LESHT, S. A.; CLOUGH, J. C.; LILJEGREN, H. E.; REVERCOMB AND TOBIN, D. C.; 2003: Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. J. Atmos. Oceanic Technol., 20, 117-132.
- UCAR UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. 2005: MM5 Modeling System Overview. Disponível em <u>http://www.mmm.ucar.edu/mm5/</u> overview.html. Acessado em 26 de set. de 2005.
- VEDEL, H.; HUANG, X. Y. A NWP impact study with ground based GPS data. In PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON GPS METEOROLOGY
 - GPS METEOROLOGY: GROUND BASED AND SPACE BORNE APPLICATIONS, 14- 17 Jan. 2003, Tsukuba, Japan. In Proceedings.
- VICENTE, J. Estudos comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão. Presidente Prudente, 2004. 163p. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
- WANG, J.; COLE, H. L.; CARLSON, D. J.; PAUKKUNEN, A. Performance of Vaisala RS80 Radiosonde on measuring upper-tropospheric humidity after corrections. In:

11TH SYNPOSIUM ON METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AND INSTRUMENTATION, 2001, Albuquerque, New Mexico, USA.

- WANG, J.; CARLSON, D. J.; PARSONS, D. B.; HOCK, T. F.; LAURITSEN, D.; COLE, H. L.; BEIERLE, K.; CHAMBERLAIN, E. Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication. *Geophys. Res. Lett.*, v.30, n. 16, 2003a.
- WANG, J.; HOCK, T. F.; LAURITSEN, D.; COLE, H. L.; BIERELE, K.; CHAMBERLAIN, N.; PARSONS, D. B.; CARLSON, D. J. A reference radiosonde system for improving water vapor measurement. In IHOP_2002. In: 12TH SYMPOSIUM ON METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AND INSTRUMENTATION, 2003b Long Beach, California, USA.
- WARE, R.; EXNER, M.; FENG, D.; GORBUNOV, M.; HARDY, K.; HERMAN, B.; KUO, Y.-H.; MEEHAN, T.; MELBOURNE, W.; ROCKEN, C.; SCHREINER, W.; SOKOLOVSKIY, S.; SOLHEIM, F.; ZOU, X.; ANTHES, R. A.; BUSINGER, S.; TRENBERTH, K. GPS sounding of the atmosphere: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v.77, p.19-40, 1996.
- WARE, R.; ALBER, C.; ROCKEN, C.; SOLHEIM, F. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. *Geophys. Res. Lett.*, v.24, p.417-420, 1997.
- WARE, R; FULKER, D. W.; STEIN, S. A.; ANDERSON, D. N.; AVERY, S. K.; CLARK, R. D.; DROEGEMEIER, K. K.; KUETTNER, J. P.; MINSTER, J. B.; SOROOSHIAN S. SUOMINET: A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education. Bulletin of the American Meteorological Society, n. 81, n. 4, Apr. 2000a.
- WARE, R; FULKER, D. W.; STEIN, S. A.; ANDERSON, D. N.; AVERY, S. K.; CLARK, R. D.; DROEGEMEIER, K. K.; KUETTNER, J. P.; MINSTER, J. B.; SOROOSHIAN S.
 Real-Time National GPS Network: Opportunities for atmospheric sensing. *Earth Planets Space*, v. 52, p.901-905, 2000b.
- WECKWERTH, T. M.; PARSONS, D. B.;. KOCH, S. E; MOORE, J. A.; LEMONE, M. A.; DEMOZ, B. B.; FLAMANT, C.; GEERTS, B.; WANG, J.; FELTZ, W. F. An Overview of the International H₂O Project (IHOP_2002) and Some Preliminary Highlights. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v.85, n. 2, p. 253–277, 2004.
- WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. 1997: Adjustments Computations: statistics and least squares in surveying and GIS. 564 p. Wiley Series in surveying and boundary Control, New York.
- WOLFE, D. E., S. I. GUTMAN, D. KIM and J. YOE. Initial comparison of integrated precipitable water vapor from GOES/POES satellite sensors and surface-based GPS signal delays. Extended abstracts, IGARSS 98 Conf. Seatle, WA, IEEE: Initial Comparison, 1996.

Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia

- WOLFE, D. E.; GUTMAN, S. I. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: network design and results. J. Atmos. Oceanic Technol. V.17, p.426-440, 2000.
- YAGI, S.; MITA, A.; INOUE, N. WMO International Radiosonde Comparison phase IV – *Tsukuba, Japan*, 15 February – 12 Mar 1993, Final Report, Instruments and Observing Methods Report No. 59, 130pp. Ed. WMO1996:
- YANG, X.; SASS, H.; ELGERED, G.; JOHNSSON, J. M.; EMARDSON, T. R. A comparison of precipitable water vapor estimates by an NWP simulation and GPS observations. *Journal of Applied Meteorology*, v. 38, p. 941-956, 1999.
- ZOU, X.; KUO, Y. H. Rainfall assimilation through an optimal control of initial and boundary conditions in a limited area mesoscale model. Mon. Wea. Rev., v.124, p. 2859-2882, 1996.
- ZOU, X.; KUO, Y.-H.; GUO, Y.R. Assimilation of Atmospheric Radio Refractivity Using a Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, v.123, p. 2229-2249, 1995.