UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA



MODELAGEM NEUTROSFÉRICA SOBRE A AMÉRICA DO SUL BASEADA EM PNT E ASSIMILAÇÃO DE DADOS LOCAIS E ROBUSTA AVALIAÇÃO UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GNSS

Presidente Prudente
2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA

MODELAGEM NEUTROSFÉRICA SOBRE A AMÉRICA DO SUL BASEADA EM PNT E ASSIMILAÇÃO DE DADOS LOCAIS E ROBUSTA AVALIAÇÃO UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GNSS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista UNESP, para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Dr. Luiz Fernando Sapucci
(Orientador)

Dr. João Francisco Galera Monico
(Coorientador)

Presidente Prudente
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Gouveia, Tayná Aparecida Ferreira.
G741m Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS / Tayná Aparecida Ferreira Gouveia. - Presidente Prudente : [s.n], 2013
136 f.

Orientadores: Luiz Fernando Sapucci, João Francisco Galera Monico
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Modelagem neutrosférica. 2. Previsão numérica de tempo. 3. Sistema global de navegação por satélite. I. Sapucci, Luiz Fernando. II. Monico, João Francisco Galera. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Presidente Prudente

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. **LUIZ FERNANDO SAPUCCI**
ORIENTADOR

PROF. DR. **DIRCEU LUIS HERDIES**
INPE

PROFA. DRA. **DANIELE BARROCA MARRA ALVES**
FCT/UNESP

TAYNA APARECIDA FERREIRA GOUVEIA

Presidente Prudente (SP), 25 de janeiro de 2013.

RESULTADO: APROVADO

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Seção Técnica de Pós-Graduação
Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente SP
Tel 18 3229-5318 fax 18 3223-4519 posgrad@fct.unesp.br

DADOS CURRICULARES

Tayná Aparecida Ferreira Gouveia

Nascimento	23 de novembro de 1985 – Santos – SP
Filiação	Alberto Jardim Gouveia Evanil Dolores Ferreira
2005 – 2008	Curso de Graduação Licenciatura em Matemática Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Campus de Presidente Prudente
2010 – 2013	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Campus de Presidente Prudente

DEDICATÓRIA

- Ao meu amado companheiro, Raphael, pela sua constância e presença nesses oito anos juntos, pela incondicional compreensão nos períodos em que precisei estar ausente, pelo carinho, por me apoiar e estar comigo nos momentos mais difíceis, por torcer e partilhar dos bons momentos, me encorajando e auxiliando sempre.

- À minha mãe, Evanil, em memória, por todo amor, pelo estímulo primeiro à sempre buscar, com honestidade, o melhor para minha vida e carreira profissional. Que sempre me estimulou a continuar dizendo sempre que o meu sucesso também seria o seu. Por essa razão, a conclusão dessa etapa é também a conquista dela, onde ela estiver.

- À minha família, minha avó querida, minhas tias e tios, meus padrinhos (pais de coração), meus primos e primas, pelo carinho, paciência e compreensão por estarmos tão longe uns dos outros, por todo apoio e torcida, e minha sogra, pelo auxílio, apoio e carinho.

- Ao meu pai, Alberto, que hoje faz parte da minha vida, me apoiando, e me dando a oportunidade de conviver com meus irmãos e sua esposa por todo estímulo para que isso fosse possível.

- Aos meus amigos, pelo carinho, apoio e encorajamentos.

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, com o desenvolvimento e conclusão desse trabalho, em especial:

Ao Dr. Luiz Fernando Sapucci, meu orientador, pelo apoio e grande contribuição no desenvolvimento desse trabalho, me proporcionando grandes oportunidades de aprendizados. Ao Dr. João Francisco Galera Monico, meu coorientador, pelo auxílio, apoio, pelos ensinamentos que contribuíram na minha formação. A todos os professores do PPGCC, do Departamento de Cartografia e do Departamento de Matemática e Computação, que de forma direta ou indireta, tiveram grande contribuição na minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro nessa pesquisa, através de bolsa de demanda social.

Aos amigos do Grupo de Estudo em Geodésia Espacial (GEGE), por todo carinho, apoio, colaboração e auxílio, e ao ex-integrante Guilherme Poleszuk, por toda disposição em sempre ajudar. Ao GEGE pelas sugestões, discussões e pelas trocas experiências acadêmicas.

Aos amigos do Grupo de Estudos em Assimilação de Dados do INPE (GEDAI), pela ajuda significativa nesse trabalho, como também pelo carinho e apoio, e ao GEDAI pelas produtivas discussões, e ao ex-integrante Derek, pela paciência, apoio e auxílio. Ao CPTEC-INPE, pela infraestrutura, e disponibilização dos dados utilizados, e aos colegas de corredores pelas sugestões e colaborações.

Ao Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves e Dr. Dirceu Luis Herdies, do CPTEC-INPE, pelas contribuições no exame de qualificação e na defesa final, respectivamente. À Drª. Daniele Barroca Marra Alves pelo incentivo inicial pela área de Geodésia, pela amizade, pelas contribuições no exame de qualificação e na defesa final.

Aos funcionários da pós-graduação Erinate, Ivonete, Cinthia e André por toda atenção, auxílio e esclarecimento durante todo o período. Aos demais funcionários que possibilitam a organização, e funcionalização dessa instituição.

Às amigas, Miriam pelo companheirismo nesses oito anos de amizade, as amigas Chaenne, Heloísa e Elenice, que também compartilharam comigo os momentos bons e os difíceis, sempre me apoiando, dando forças. À todos os amigos do PPGCC, por todos os momentos de incentivo, apoio e ajuda.

EPÍGRAFE

Sem a informação, conhecimento, entendimento
e compreensão do percurso percorrido, novos percursos
tornam-se impossíveis ou muito difíceis de serem trilhados,
já que o saber pressupõe que tais etapas do processo
de aprendizagem sejam experimentadas.
(*Curso FEEE, Projeto Tempo de Ser*)

RESUMO

O posicionamento com o GNSS (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) é atualmente a técnica mais utilizada para se obter a localização sobre a superfície terrestre ou próxima a essa. Depois dos efeitos causados pela ionosfera, a refração que o sinal sofre ao ultrapassar a neutrosfera pode ser considerada como uma das maiores fontes de erro no sinal, a qual gera um atraso no mesmo, denominado Atraso Zenital Troposférico (em inglês, Zenithal Tropospheric Delay - ZTD). Esse atraso gera erros no posicionamento GNSS, quando não é devidamente modelado. Os modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) são boas alternativas para minimizar esse problema, pois geram previsões do ZTD em uma grade regular. No Brasil está operacional no CPTEC/INPE um processo que gera tais previsões com resolução espacial de 15 km. No entanto, na elaboração da atual versão não se utiliza o melhor banco de dados atmosféricos sobre a América do Sul, o que é possível de se obter com a assimilação de dados realizada atualmente no CPTEC. A assimilação de dados no Brasil tem evoluído nos últimos anos, com a qual se tem obtido avanços importantes na PNT nacional. Para acessar o impacto dessas melhorias na qualidade das previsões do ZTD foi realizada uma avaliação robusta das previsões do ZTD, considerando longos períodos e estações de todo território brasileiro, utilizando os dados coletados pelas estações da RBMC. Os resultados apresentaram que a sazonalidade, continentalidade e variação de latitude tem impacto na qualidade das previsões do atraso, bem como maiores resoluções espaciais e temporais.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS; Atraso Zenital Troposférico; Previsão Numérica de Tempo; Assimilação de dados.

ABSTRACT

The positioning with the GNSS (GNSS - Global Navigation Satellite System) is the most used technique to obtain a location over terrestrial surface or close to it. After the effects generated by Ionosphere, the refraction that the signal suffers when it goes through the neutrosphere can be considered as one of the largest error sources in the signal, in which is generated a delay, called Zenithal Tropospheric Delay (ZTD). When the ZTD are not modeled, significant errors in the GNSS positioning are observed, Numerical Weather Prediction models are good alternatives to minimize this problem, because these models generate ZTD predictions in a regular grid. A process for the propose of generating ZTD predictions with 15 km of resolution is operational at CPTEC/INPE. However, in this version it is not utilized the best atmospheric data base over the region, which is possible to obtain with data assimilation applied nowadays at CPTEC. The data assimilation in Brazil has evolved in recent years, which has obtained important progress in the PNT. To access the impact of these improvements in the quality of ZTD predictions a robust evaluation of the ZTD predictions was made, which has taken into consideration long periods of data and several stations from RBMC network. The results showed that seasonality, continentality and latitude variation impact the quality of the ZTD predictions, as well as higher spatial and temporal resolutions.

Keywords: GNSS positioning, Zenith Tropospheric Delay, Numerical Weather Prediction, Data assimilation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Subdivisão da atmosfera. 30

Figura 2: Divisão das camadas da atmosfera na meteorologia de acordo com a variação de temperatura e pressão. 31

Figura 3: Divisão das camadas da atmosfera na Geodésia de acordo com a quantidade de elétrons presentes. 32

Figura 4: Efeito do ZTD nos sinais GNSS. 34

Figura 5: Grade de observação e grade regular do modelo. 48

Figura 6: Componentes do ciclo da assimilação de dados 50

Figura 7: Processo de Previsão Numérica de Tempo com Assimilação de Dados. 51

Figura 8: Distribuição espacial dos dados assimilados no CPTEC das 00h, 06h, 12h e 18h... 54

Figura 9: Avaliação dos sistemas de assimilação em 12/04/2007. 55

Figura 10: Avaliação dos sistemas de assimilação regionais em 01/06/2007. 56

Figura 11: Viés para os meses de 01/04/07/10 de 2011. 57

Figura 12: Apresenta o viés para os meses de 01/02/03/04 de 2012. 58

Figura 13: Página DSA e o produto do atraso operacional 60

Figura 14: Processo de previsão do ZTD a partir do modelo de PNT do CPTEC/INPE. 63

Figura 15: Processo de avaliação do ZTD previsto (PNT) em relação ao ZTD estimado (GNSS). 64

Figura 16: Fluxograma do script para gerar previsões do ZTD para a América do Sul. 65

Figura 17: Avaliação dos dados obtidos no LGE em relação aos centros europeus. 67

Figura 18: Localização da estação ALAC. 68

Figura 19: Comparação dos valores ZTD obtidos pelo modelo de PNT e os obtidos através do processamento dos dados GPS com os obtidos a partir de radiossondas. 68

Figura 20: Localização das estações da RBMC. 72

Figura 21: Estações, da Rede de Monitoramento Contínuo do Estado de São Paulo (GNSS-SP), disponibilizadas e utilizadas nesse trabalho. 73

Figura 22: Gráfico das latitudes das estações utilizadas. 77

Figura 23: Gráfico das longitudes das estações utilizadas. 77

Figura 24: Gráfico das altitudes em metros das estações utilizadas. 77

Figura 25: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2010. 79

Figura 26: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2011. 79

Figura 27: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2012. 80

Figura 28: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Fevereiro de 2010. 81

Figura 29: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Janeiro de 2011. 81

Figura 30: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Fevereiro de 2012. 82

Figura 31: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Janeiro de 2010. 83

Figura 32: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Janeiro de 2011. 83

Figura 33: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Fevereiro de 2012. 84

Figura 34: Análise Estatística do ZTD considerando 77 estações e 4 meses dos anos de 2010, 2011 para os modelos Eta20, RPSAS e para 2012 o modelo Eta15 em relação ao ZTD estimado. 85
Figura 35: Viés, DP e EMQ do ZTD considerando 77 estações no mês de Fevereiro de 2012 para os modelos Eta20, RPSAS e Eta15 87
Figura 36: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010 na estação BRAZ. 88
Figura 37: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011 na estação BRAZ. 89
Figura 38: Análise do ZTD utilizando o modelo Eta15 no ano e 2012 na estação BRAZ. 90
Figura 39: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010 na estação SMAR. 90
Figura 40: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011 na estação SMAR. 91
Figura 41: Análise do ZTD utilizando o modelo Eta15 no ano e 2012 na estação SMAR. 91
Figura 42: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010 na estação NAUS. 92
Figura 43: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011 na estação NAUS. 93
Figura 44: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta15 no ano e 2012 na estação NAUS. 93
Figura 45: Avaliação da Sazonalidade do ZTD (Jan e Jul de 2012) com modelo Eta15 nas estações NAUS, BRAZ, UBER, SJRP, PPTE, UFPR, PRGU e SMAR. 94
Figura 46: Análise do modelo Eta15 nas previsões do ZTD no mês de Fevereiro de 2012, estações litorâneas CEEU, ALAR, SAVO, RIOD, NEIA, IMBT e POAL 96

Figura 47: Análise do modelo Eta15 nas previsões do ZTD no mês de Fevereiro de 2012, estações diferentes altitudes, CUIB, ROSA, MTBA, PPTE, PRMA, CHPI, POLI, UFPR, PRGU e BRAZ. 97
Figura 48: Avaliação em relação à continentalidade, nas estações CEEU e NAUS, RIOD e PPTE, SMAR e POAL, com o modelo Eta15, em Fevereiro de 2012. 98
Figura 49: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20 e RPSAS, no ano de 2011, estações Ilha, PPTE e ROSA. 100
Figura 50: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20 e RPSAS, no ano de 2012, estações ILHA, PPTE e ROSA..... 100
Figura 51: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20, RPSAS e Eta15, no Fevereiro de 2012, estações PPTE e ROSA. 101
Figura 52: À esquerda spline do ZHD, à direita spline do ZWD para o dia 16/02/2012 estação ILHA, modelo Eta15. 103
Figura 53: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação ILHA. 103
Figura 54: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação ILHA. 104
Figura 55: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação PPTE. 105
Figura 56: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação PPTE. 105

Figura 57: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos para as splines obtidas com as previsão de 3h (à esquerda) e 6h (à direita) usando 2 dias, estação ILHA. 106
Figura 58: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos para as splines obtidas com as previsão de 3h (à esquerda) e 6h (à direita) usando 2 dias, estação ILHA..... 107
Figura 59: Série temporal do ZTD em junho de 2012, estação BRAZ, modelo G3DVar. 109
Figura 60: Série temporal do ZTD em junho de 2012, estação NAUS, modelo G3DVar. 109
Figura 61: ZHD em junho de 2012, estação PPTE, modelo G3DVar. 110
Figura 62: ZHD em junho de 2012, estação ROSA, modelo G3DVar. 110
Figura 63: ZWD em junho de 2012, estação ILHA, modelo G3DVar. 112
Figura 64: ZWD em junho de 2012, estação PPTE, modelo G3DVar. 112
Figura 65: Variação do ZWD na estação PPTE dia 02/01/12 considerando previsão do ZWD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield. 113
Figura 66: Variação do ZWD na estação PPTE dia 07/01/12 considerando previsão do ZWD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield. 114
Figura 67: Variação do ZHD na estação PPTE dia 02/01/12 considerando previsão do ZHD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield. 115
Figura 68: Variação do ZHD na estação PPTE dia 07/01/12 considerando previsão do ZHD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield. 115
Figura 69: Discrepância planimétrica para estação PPTE no dia 02/01/2012, em relação ao ZTD Estimado, e com os modelos Eta15, Eta20 e RPSAS. 116
Figura 70: Discrepância planimétrica para estação PPTE no dia 07/01/2012..... 117
Figura 71: Discrepância altimétrica para estação PPTE no dia 02/01/2012..... 117

Figura 72: Discrepância altimétrica para estação PPTE no dia 07/01/2012, em destaque considerando a partir das 02h00 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes e erros envolvidos nas observações GNSS. 29

Tabela 2: Apresentação dos dados referente a cada modelo utilizado, classificados através de tons de azul ao branco quanto aos dados que estão disponíveis, os indisponíveis e os dados utilizados, nos anos de 2010, 2011 e 2012. 70

Tabela 3: Apresentação das estações GNSS com dados meteorológicos disponíveis e utilizados classificados através de tons de verde ao branco quanto aos dados que estão disponíveis, os indisponíveis e os dados utilizados, nos anos de 2011 e 2012. 71

Tabela 4: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h.Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 103

Tabela 5: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 104

Tabela 6: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 104

Tabela 7: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 106

Tabela 8: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h, considerando 2 dias. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 107

Tabela 9: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h, considerando 2 dias. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior. 107

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO 22
1.2 OBJETIVOS 24
1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO 25
2. MODELAGEM DO ZTD USANDO PNT PARA O POSICIONAMENTO 26
2.1 OBSERVÁVEIS GNSS 27
2.2 ERROS NAS OBSERVAÇÕES GNSS 29
2.3 SUBDIVISÕES DA ATMOSFERA TERRESTRE 30
2.4 ATRASO NEUTROSFÉRICO 33
2.4.1 Atraso zenital na componente hidrostática 39
2.4.2 Atraso zenital da componente úmida 40
2.5 MODELAGEM DO ZTD 41
2.5.1 Modelos Teóricos do Atraso Zenital Neutrosférico 42
2.6 MODELAGEM DO ZTD USANDO PNT 46
2.6.1 Previsão Numérica de Tempo 46
2.6.2 Assimilação de Dados 49
2.6.3 Modelos de Previsão e Sistemas de Assimilação do CPTEC/INPE 51
2.6.4 Avaliação dos modelos de previsão 55
2.6.5 Previsões do ZTD usando produtos de PNT 59
3.1 MODELOS DE PNT A SEREM AVALIADOS 61
3.2 METODOLOGIA PARA GERAR AS PREVISÕES DO ZTD USANDO OS MODELOS EM AVALIAÇÃO 62
3.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS 66
3.3.1 Estimativa do ZTD GOA - II 66
3.3.2 Período de dados e estações GNSS utilizados na avaliação 69
3.3.3 Metodologia de avaliação 74

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS 78
4.1 SÉRIES TEMPORAIS PARA OS DIFERENTES MODELOS AVALIADOS 78
4.2 AVALIAÇÃO ANUAL E MENSAL DO ZTD CONSIDERANDO TODAS AS ESTAÇÕES 84
4.3 ANÁLISE ANUAL E MENSAL DO ZTD POR ESTAÇÃO 88
4.3 SAZONALIDADE 94
4.4 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO ÀS DIFERENTES LATITUDES 95
4.5 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO ÀS DIFERENTES ALTITUDES 97
4.6 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO À CONTINENTALIDADE 98
4.7 ANÁLISE DAS COMPONENTES ZWD E ZHD 99
4.8 AVALIAÇÃO CONSIDERANDO A RESOLUÇÃO TEMPORAL 102
4.9 AVALIAÇÃO DO ZTD UTILIZANDO O MODELO G3DVAR 108
5. AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO GNSS 113
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES 119
APÊNDICE – SÉRIES TEMPORAIS 122
REFERÊNCIAS 134

1. INTRODUÇÃO

A localização de um ponto específico sobre a superfície da Terra é uma necessidade desde as antigas civilizações, na busca por terras férteis e seguras para migração ou expansão das áreas habitadas, o que veio a ser crucial na era das grandes navegações e para os planos e combates de guerra, os quais permanecem até os dias de hoje. Para um cidadão comum, embora os objetivos sejam menos ambiciosos, esse posicionamento é uma necessidade para o planejamento das atividades do cotidiano, como o plano de viagens aéreas e terrestres, busca de caminhos alternativos para fugir do trânsito das grandes cidades ou de estradas a serem percorridas na viagem de férias, ou até mesmo para encontrar um bom local para almoçar.

A técnica de posicionamento baseada na utilização de satélites artificiais na localização de um ponto sobre a superfície terrestre é a mais utilizada atualmente, devido seus aspectos práticos. Os satélites artificiais que integram o Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) são: os pertencentes ao sistema norte-americano GPS (*Global Positioning System*); sistema russo GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikkovaya Sistem*); e, sistema europeu denominado Galileo; bem como ao sistema chinês Beidou/Compass.

A posição é obtida pela medida da distância entre o satélite e o usuário (receptor), por meio do processamento de suas observáveis, a pseudodistância e a fase da onda portadora. De acordo com o rigor na acurácia com que se necessite a posição, diferentes técnicas e equipamentos devem ser utilizados. Enquanto para a navegação de veículos é necessário apenas receptores simples com processamento com diversas simplificações, em aplicações que requerem rigor de qualidade como plano de voo, monitoramento de barragens, necessita-se de um processamento mais minucioso e a utilização de correções nas observáveis.

O posicionamento GNSS está sujeito a diferentes fatores que implicam em erros no sinal dos satélites, ocasionando assim a deterioração na acurácia da localização. Para uma melhor qualidade dessa localização esses erros devem ser minimizados ou eliminados. Tratando-se dos efeitos que o sinal sofre ao se propagar pela atmosfera terrestre, podem ser

citados os causados pela influência da Ionosfera e da Neutrosfera, que atualmente, representam as maiores fontes de erros nas observáveis GNSS.

A atmosfera terrestre é dividida e nomeada de diferentes maneiras que variam de acordo com a aplicação. Em relação à propagação do sinal sobre a atmosfera, essa divide em duas camadas de acordo com suas composições eletrônicas. A Ionosfera é a camada composta por elétrons livres, o que torna essa camada um meio dispersivo. Essa camada possui espessura de 50 a 1000 quilômetros, sendo que o sinal ao ultrapassa essa camada é afetado em sua velocidade e direção. A influência da Ionosfera é dependente da frequência do sinal, assim com o uso de observáveis obtidas por duas frequências distintas é possível minimizar esse erro através de combinação linear adequada.

A Neutrosfera, camada da atmosfera eletricamente neutra, se estende desde a superfície até aproximadamente 50 km de altura. Depois dos efeitos causados pela Ionosfera, a refração que o sinal sofre ao ultrapassar a Neutrosfera pode ser considerada a maior fonte de erro no sinal GNSS quando não adequadamente tratada. Os efeitos que a Neutrosfera causa no sinal GNSS se dão pelas diferenças nas concentrações dos gases que compõem essa camada, sendo eles: cintilação neutrosférica, atenuação neutrosférica e o atraso neutrosférico. Os dois primeiros podem ser desconsiderados, pela pouca interferência para a maioria das aplicações. Já o atraso neutrosférico gera erros com dimensões significativas para posicionamento com alta precisão, e deve ser estimado ou modelado através de equações matemáticas (SAPUCCI, 2001).

A modelagem do atraso troposférico envolve duas fases, a primeira se concentra na determinação do atraso gerado no sinal do satélite ao se propagar por meio da Neutrosfera na direção zenital (*ZTD – Zenital Tropospheric Delay*) a partir das medidas de temperatura, pressão e umidade do perfil vertical neutrosférico. A segunda fase relaciona o ZTD com o ângulo de elevação do satélite observado por meio das funções de mapeamento. O atraso neutrosférico pode ser dividido em duas componentes, o ZHD (*Zenital Hidrostatic Delay* - Atraso Zenital Hidrostático) e o ZWD (*Zenital Wet Delay* - Atraso Zenital Úmido).

Os principais modelos empíricos que tratam do ZTD são o de Hopfield e o de Saastamoinen (SEEBER, 2003). Como esses modelos são baseados em médias globais, não se apresentam totalmente apropriados para responder adequadamente as variações temporais e espaciais que ocorrem na América do Sul, o que pode vir a ser um problema em

alguns períodos quando se busca resultados acurados (SAPUCCI, 2001). Deve ser considerado que nessa região encontra-se a Floresta Amazônica que possui uma vasta dimensão, e exerce grande influência no clima global, o que torna essa região única. Assim, os modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) podem ser uma boa alternativa para amenizar as limitações dos modelos teóricos para a América do Sul.

Desde meados de 2004 o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) gera operacionalmente previsões dos valores do ZTD para toda a América do Sul e oceanos adjacentes (disponível no endereço eletrônico http://satelite.cptec.inpe.br/zenital). O objetivo é disponibilizar a comunidade geodésica uma alternativa para minimizar os efeitos da neutrosfera nos sinais de radiofrequência para aplicações que necessitem melhorar a acurácia em tempo real. Na versão disponibilizada inicialmente foi utilizado o modelo de previsão de tempo com resolução horizontal de 100x100 km (doravante denominado de GLB100km) (SAPUCCI et al., 2006). No início de 2007, foi disponibilizada uma nova versão da modelagem do ZTD, a qual emprega um modelo regional de previsão de tempo Eta com resolução horizontal de 20x20 km.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

A PNT tem como princípio básico a obtenção do estado futuro da atmosfera em um determinado tempo a partir de um estado inicial, chamado de análise, obtido pelas observações, utilizando-se de um modelo físico da atmosfera que possa ser integrado no tempo por procedimento numérico. O melhor resultado na previsão está relacionado com a capacidade de modelar com mais eficiência a atmosfera terrestre, e com a qualidade do estado inicial (SAPUCCI, 2007). Porém, um erro na análise do estado inicial pode ser propagado e causar maiores erros no estado previsto. Dessa forma, se faz necessário o maior número possível de dados das variáveis atmosféricas no início do processo, assim como a utilização de robusto controle de qualidade para selecionar adequadamente os dados.

O sistema de assimilação é um processo que produz condições iniciais (análises) a partir de observações atmosféricas combinadas com previsões da atmosfera geradas por um modelo numérico de previsão de tempo. A assimilação de dados tem por objetivo gerar um estado que mais se aproxime da realidade física da atmosfera e utiliza para isso, campos de previsão de curto prazo e os mais diversos tipos de observações da atmosfera, levando em consideração as incertezas do modelo e a precisão das observações. O processo de assimilação de dados em um modelo de PNT é um procedimento cíclico onde os resultados gerados pelo modelo de PNT com integração curta (FG – *First Guess*) são combinados com os valores observados em um ajuste de observações.

O único modelo de previsão de tempo com assimilação de dados operacional da América Latina encontra-se no CPTEC /INPE. Há diversas melhorias em curso na PNT em operação no CPTEC, tais como o aprimoramento da resolução espacial (grades de 20km e 15km) e temporais (previsões de 6h e 3h), quanto ao uso eficiente das observações meteorológicas disponíveis sobre a América do Sul em um processo de assimilação de dados. Atualmente é utilizado o modelo Eta em 15 km, já em testes a versão de 5 km (modelo regional Serra do Mar) que tornará possível ampliar o detalhamento das previsões para áreas em todo o Brasil. E em desenvolvimento e testes, esta sendo implementado o sistema de assimilação de dados G3DVar (*Global 3 Dimensional Variational Assimilation* - Assimilação Variacional em 3 Dimensões) com resolução de 40 km. Esse sistema assimila principalmente dados de radiância, mas também observações convencionais (estações meteorológicas, boias, radiossondas), entre outras.

O ZTD é obtido utilizando dados dos modelos de PNT operacionais no CPTEC/ INPE. As versões da modelagem do ZTD disponibilizadas até o presente no CPTEC tiveram uma melhoria na resolução espacial (de 100 km para 20 km e 15 km), no entanto, nenhuma delas contempla o uso de produtos que utilizam o melhor banco de dados atmosféricos coletados sobre a América do Sul, o qual é obtido com o emprego da assimilação de dados feita no CPTEC.

Todas essas melhorias podem e devem ser aplicadas na modelagem do atraso neutrosférico sobre a América do Sul visando beneficiar as aplicações em tempo quase real que necessitam de boa precisão. Além disso, necessita-se de uma avaliação robusta da qualidade da modelagem do ZTD/PNT usando tais melhorias, na qual diferentes aspectos

regionais do território brasileiro devem ser considerados tais como a continentalidade, sazonalidade e a variação da latitude, usando um longo período (anos de 2010, 2011 e três meses de 2012) de dados e tomando como valores de referência estimativas advindas do processamento dos dados GNSS coletados por estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sinais GNSS).

1.2 OBJETIVOS

Nesta dissertação de mestrado o objetivo principal é realizar a modelagem da neutrosfera para a América do Sul empregando as versões melhoradas dos modelos de PNT disponíveis no CPTEC com relação à resolução e com a assimilação de dados, com o intuito de disponibilizar para a comunidade geodésica o que se pode ter de melhor para essa região no que diz respeito às previsões do ZTD. Os objetivos específicos para atingir essa meta principal, são:

- Implementar as suítes de conversão das variáveis atmosféricas das diferentes versões disponíveis dos modelos de PNT para valores do ZTD;
- Implementar e operacionalizar a nova versão do atraso neutrosférico utilizando o modelo de PNT operacional no CPTEC/INPE, Eta 15km;
- Obter as séries temporais do ZTD para os diferentes modelos em períodos relativamente extensos em diferentes anos (2010, 2011 e 2012);
- Avaliar a qualidade das novas versões das previsões do atraso zenital neutrosférico em relação aos dados do atraso neutrosférico estimados em processamentos GNSS utilizando o software GOA-II (*GIPSY - GNSS Inferred Positioning System; OASIS – Orbit Analysisand Simulation Software II*). A avaliação se dará em relação à Continentalidade, e variação da latitude, e altitude e, Sazonalidade;
- Avaliar os benefícios obtidos com produtos que apresentem os resultados com uma melhor resolução temporal;
- Avaliar as componentes ZHD e ZWD separadamente utilizando as estimativas pós-processadas do GOA-II, e dados meteorológicos coletados junto as antenas GNSS;
- Avaliar a qualidade do atraso neutrosférico no posicionamento GNSS.

1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO

Visando atingir os objetivos propostos o presente trabalho foi dividido em seis capítulos contendo um embasamento teórico, descrição dos experimentos e a metodologia utilizada bem como os resultados e análises dos mesmos.

No capítulo 2 são tratados assuntos relativos às observáveis GNSS e as fontes de erros, com ênfase para atmosfera, e para camada eletricamente neutra e suas componentes, úmida e seca, em que esta é dividida. Os modelos utilizados na previsão do atraso neutrosférico assim como a metodologia adotada na avaliação são tratados no capítulo 3. No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos bem como a análise dos mesmos. O capítulo 5 aborda a avaliações das previsões do atraso neutrosférico no posicionamento GNSS. E finalmente no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as conclusões do trabalho, como também sugestões para trabalhos futuros.

2. MODELAGEM DO ZTD USANDO PNT PARA O POSICIONAMENTO

O posicionamento por satélites foi desenvolvido e utilizado primeiramente por militares. Surgem cada vez mais aprimoramentos e aplicações dessa técnica, tanto na área acadêmica quanto no meio civil comercial. Algumas aplicações podem ser citadas, como em construções, controle de barragens, monitoramento de frotas, navegação aérea e naval, dentre outras.

O GNSS, uma das tecnologias espaciais de posicionamento mais avançadas, é constituído principalmente pelo sistema desenvolvido pelos militares norte-americanos o GPS, o GLONASS desenvolvido pela antiga URSS (*União das Repúblicas Socialistas Soviéticas*) e atualmente mantido pela Rússia, o sistema em desenvolvimento pela comunidade europeia Galileo e o Beidou/Compass em desenvolvimento pela China.

O GPS é um sistema operacional com 31 satélites, e está em fase de modernização (http://www.gps.gov/ - Acesso em: 20 dez. 2012). O sistema Russo GLONASS é composto atualmente por 29 satélites, desses 23 operacionais (http://www.glonass-ianc.rsa.ru/ - Acesso em: 20 dez. 2012). O sistema europeu Galileo, a partir de 12 de outubro de 2012, está composto por 4 satélites (http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation - Acesso em: 20 dez. 2012), com previsão do sistema estar completo e operacional em 2020, por enquanto existem alguns receptores com simuladores para que se possa obter posição e testar esse sistema. O Chinês Beidou/Compass possui satélites de órbita geoestacionária (*GEO - Geostationary Earth Orbit*), e não geoestacionária (*Non-GEO - Non-Geostationary Earth Orbit*), dentre esses últimos os de órbita média (*MEO - Medium Earth Orbit*) e os de órbita geoestacionária inclinada *(IGSO - Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) (*http://www.beidou.gov.cn/ - Acesso em: 20 dez. 2012). Em setembro de 2012 foram lançados dois satélites com previsão de lançamento da constelação completa até 2020, sendo que atualmente em orbita possuem 5 satélites MEO (http://www.globaltimes.cn/content/734114.shtml - Acesso em: 20 dez. 2012).

Há também os sistemas de aumentação denominados SBAS (*SatelliteBasedAugmentation System*), dentre eles o WAAS (*Wide Area Augmentation System*) dos Estados Unidos e o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), dentre outros. Todos esses sistemas integrados em um único o GNSS é

possível obter alta acurácia, disponibilidade e, integridade no posicionamento (SEEBER, 2003).

O posicionamento GNSS, assim como outras técnicas de posicionamento, está sujeito a diferentes efeitos que implicam em erros no sinal dos satélites causando deterioração na acurácia do posicionamento. Para uma melhor qualidade dessa localização esses erros devem ser minimizados ou eliminados por meio do emprego de modelagem matemática no processamento das observáveis GNSS.

2.1 OBSERVÁVEIS GNSS

O posicionamento pelo GNSS, basicamente se dá por medidas de distâncias entre o usuário e os satélites, chamadas de pseudodistância devido ao não sincronismo dos relógios do receptor e do satélite, e a fase da onda portadora que possui sua parte fracionária e número inteiros de ciclos que se repetem.

A medida de pseudodistância é obtida pelo tempo de propagação do sinal multiplicado pela velocidade da luz no vácuo. Mas devido aos efeitos que afetam as observáveis, serão apresentadas as modelações em relação ao sistema GPS, mas que podem ser expandidos aos demais sistemas, a modelagem da pseudodistância entre o satélite (*s*) e o receptor (*r*) pode-se ser dada pela equação 1 (Adaptada de MONICO, 2008):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Ion_r^s + Neutro_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s} \qquad 1$$

sendo:

ρ_r^s: distância geométrica obtida do intervalo de tempo de propagação do sinal do satélite até o receptor, no tempo de transmissão (*s*) e de recepção (*r*) multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (*c*);

dt_r: erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS;

dt^s: erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;

Ion_r^s: erro causado pela ionosfera;

$Neutro_r^s$: erro causado pela neutrosfera;

dm_r^s: erro causado pelo multicaminho;

$\varepsilon_{PD_r^s}$: erros da medida de pseudodistância.

A observável mais utilizada é a medida de fase da onda portadora (fase de batimento da onda portadora), uma observável mais precisa que a pseudodistância, porém ambígua devido ao número inteiro de ciclos entre o receptor e o satélite, no instante da primeira observação. A fase da onda portadora pode ser obtida pela diferença entre a fase gerada no satélite, e a réplica gerada no receptor, ambas no instante de recepção. Apenas uma parte fracionária é medida, e o número inteiro de ciclos que é desconhecido é chamado de ambiguidade (N_r^s). A equação da fase da onda portadora é dada por (MONICO, 2008):

$$\phi_r^s(t) = f\left(\frac{\rho_r^s - Ion_r^s + Trop_r^s + dm_r^s}{c}\right) + f(dt_r - dt^s) + (\phi_t^s(t_0) - \phi_r(t_0)) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^{\ s} \qquad 2$$

onde:

f: frequência do sinal;

$\phi_t^s(t_0)$: fase gerada no satélite, na época de referência t_0;

$\phi_r(t_0)$: fase recebida no receptor, na época de referência t_0;

N_r^s: ambiguidade da fase;

$\varepsilon_{\phi_r^s}$: erros da fase da onda portadora.

2.2 ERROS NAS OBSERVAÇÕES GNSS

As observáveis necessárias para obter a posição, a velocidade e o tempo, são a pseudodistância e a fase de onda portadora, como apresentado na seção anterior. Mas essas observáveis estão sujeitas a diferentes tipos de erros, podendo ser aleatórios (que são inerentes às observações), sistemáticos (que podem ser parametrizados ou eliminados) ou grosseiros (que podem ser identificados e eliminados pelo controle de qualidade). Para se obter melhores resultados é necessário realizar uma modelagem matemática adequada para a realidade física que pretende-se descrever, e também ser capaz de detectar problemas. Na Tabela 1 são apresentados os diversos erros nas observações GNSS e suas respectivas fontes (MONICO, 2008).

Tabela 1: Fontes e erros envolvidos nas observações GNSS.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita; erro do relógio; relatividade; atraso entre as portadoras no *hardware* do satélite; centro de fase da antena do satélite, fase *wind-up*.
Propagação do sinal	Erros relacionados à neutrosfera e à ionosfera; perdas de ciclos; multicaminho ou sinais refletidos; rotação da Terra.
Receptor/antena	Erro do relógio; erro entre os canais; atraso entre as portadoras no *hardware* do satélite; centro de fase da antena do receptor; fase *wind-up*.
Estação (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos e devem ser corrigidos)	Erro nas coordenadas; multicaminho ou sinais refletidos; marés terrestres; movimento do polo; carga oceânica; pressão da atmosfera.

Fonte: Adaptado de MONICO, 2008.

Os sinais GNSS sofrem interferências do meio ao se propagar pela atmosfera terrestre, as quais geram erros no posicionamento. Do ponto de vista da propagação dos sinais de radio frequência a atmosfera é dividida em duas camadas denominadas Ionosfera e Neutrosfera, que atualmente, representam as maiores fontes de erros nas observáveis GNSS.

Em destaque na tabela 1, os erros relacionados à neutrosfera podem ser estimados ou modelados. Para isso existem diversos modelos juntamente com as funções de mapeamento para as devidas correções desses erros. Mas primeiramente é necessário conhecer esses erros para então poder estimá-los ou modelá-los.

2.3 SUBDIVISÕES DA ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre pode ter divisões e denominações diferentes de acordo com a área de pesquisa. Podendo ser dividida e denominada de acordo com a temperatura, ionização, propagação do sinal e altitude. As divisões e denominações mais comuns de acordo com a altitude podem ser verificadas na figura 1.

<table>
<tr><th>Altitude (km)</th><th>Temperatura</th><th>Ionização</th><th>Propagação</th><th>Técnica</th></tr>
<tr><td>100 000</td><td rowspan="3">Termosfera</td><td rowspan="2">Protonosfera</td><td rowspan="3">Ionosfera</td><td rowspan="3">Alta Atmosfera</td></tr>
<tr><td>10 000</td></tr>
<tr><td>1 000</td><td rowspan="2">Ionosfera</td></tr>
<tr><td>100</td><td>Mesosfera</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>50</td><td>Estratosfera</td></tr>
<tr><td>10</td><td>Troposfera</td><td>Neutrosfera</td><td>Neutrosfera</td><td>Baixa Atmosfera</td></tr>
</table>

Figura 1: Subdivisão da atmosfera.
Fonte: Adaptado de Seeber, 2003.

Na meteorologia, a variação da temperatura de acordo com a variação da altitude é uma das bases de classificação das camadas da atmosfera, sendo esta dividida em cinco camadas, sendo três relativamente quentes, separadas por duas camadas relativamente frias. Os encontros dessas camadas são áreas de descontinuidade, e tem como sufixo “pausa”, precedido do nome da camada anterior. Sendo essas: Troposfera, Tropopausa, Estratosfera, Estratopausa, Mesosfera, Mesopausa, Termosfera e a Exosfera, como podem ser verificadas na figura 2.

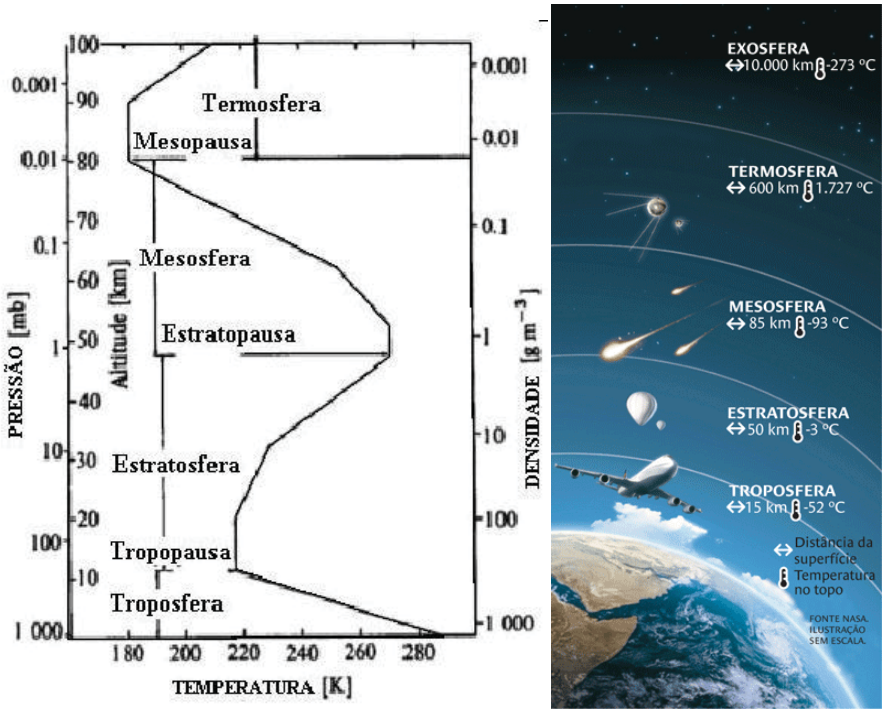


Figura 2: Divisão das camadas da atmosfera na meteorologia de acordo com a variação de temperatura e pressão.

Na Geodésia, a divisão das camadas se dá pela quantidade de elétrons que as compõem, para esta aplicação a atmosfera é dividida em ionosfera e neutrosfera. A neutrosfera é uma camada eletricamente neutra e por essa razão tem sido usada à denominação de Neutrosfera e não mais Troposfera (camada onde se encontra a maior concentração de gases).

A Ionosfera é a camada com espessura de 50 a 1000 quilômetros, e é composta por elétrons livres, que afetam a propagação de ondas eletromagnéticas quanto à velocidade e sua direção, e esse efeito é proporcional ao conteúdo total de elétrons (*TEC – Total Electron Content*) nela presente (CAMARGO, 1999). Por ser um meio dispersivo, a influência da Ionosfera é dependente da frequência do sinal, e dessa maneira com o uso de observáveis obtidas por dupla frequência é possível minimizar esse erro a partir de uma combinação linear adequada.

A Neutrosfera é a camada da atmosfera eletricamente neutra, se estende em média 50 km, da superfície até a Ionosfera (figura 3). Em relação à atmosfera na meteorologia, essa camada se estende desde a superfície até parte da Estratopausa, contendo a Troposfera, Tropopausa e Estratosfera.

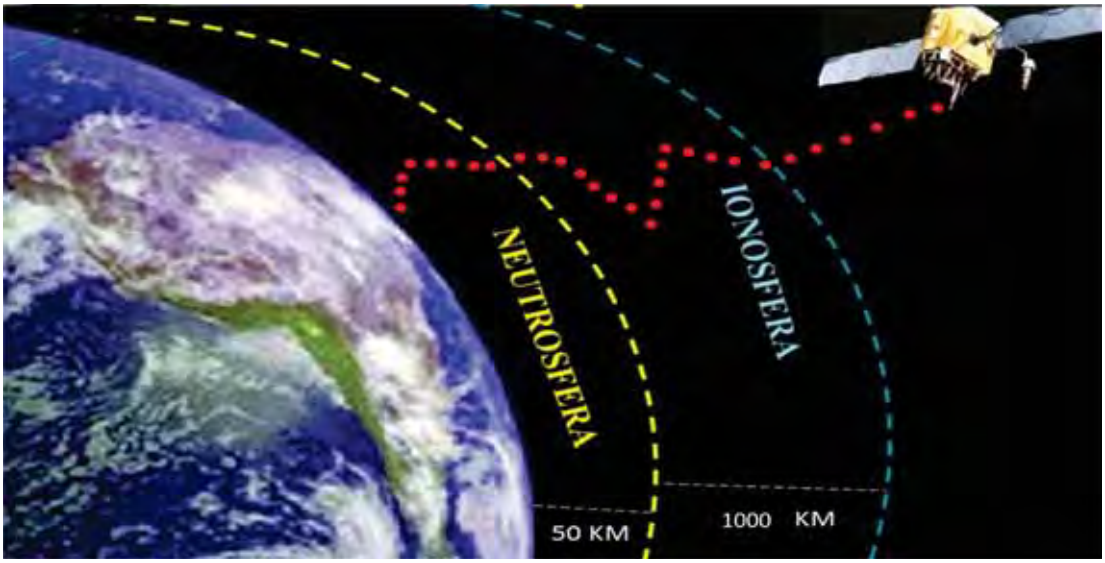


Figura 3: Divisão das camadas da atmosfera na Geodésia de acordo com a quantidade de elétrons presentes.

A camada neutrosférica é composta por uma alta concentração de gases como o nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio e vapor d'água, entre outros, representando em média 70% da massa total da atmosfera (principalmente pela composição da Troposfera). Nessa camada, ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos.

Devido a Neutrosfera ser composta por gases secos e vapor d'água, essa pode ser dividida, em duas componentes: seca (*dry)* e úmida (*wet*). A componente seca também denominada hidrostática é formada por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e outros gases em pequenas proporções. Já a componente úmida, é composta apenas pelo vapor d'água.

Os efeitos causados pela Neutrosfera são denominados de cintilação neutrosférica, atenuação neutrosférica e o atraso neutrosférico. A atenuação é o efeito que causa a diminuição da potência da onda eletromagnética, devido a um dos elementos que constituem a atmosfera, esse elemento varia para cada frequência. Para bandas de frequências de 1 a 2 *GHz*, a atenuação é causada pelo oxigênio. A oscilação na amplitude da onda eletromagnética é denominada cintilação, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refratividade neutrosférica, são alterações na fase de batimento da onda portadora no receptor. Esses dois efeitos, de atenuação e cintilação neutrosférica devem ser levados em consideração quando se trata de pequenos ângulos de elevação e curto período de tempo. Mas para ângulos acima de 10º e períodos longos, esses efeitos são muito pequenos (SAPUCCI,

2001). Já o atraso neutrosférico, gera erros em escalas maiores, podendo chegar até 25 metros no horizonte, nas observações GNSS, devendo ser tratado de forma adequada.

2.4 ATRASO NEUTROSFÉRICO

O sinal GNSS ao se propagar na Neutrosfera sofre mudança de velocidade e de direção, por atravessar dois meios (camadas) com composições diferentes, o que ocorre devido à Refratividade. O mesmo acontece ao olharmos um lápis semi-imerso em um copo d'água, que parece estar partido, o efeito se dá pela refração da luz ao passar de um meio ao outro (água para o ar).

O atraso neutrosférico é independente da frequência do sinal dos satélites, em consequência da Neutrosfera ser eletricamente neutra. Assim, o atraso depende apenas das características termodinâmicas da atmosfera (o estudo das causas e efeitos das mudanças na temperatura, pressão e volume, com o intuito de descobrir o comportamento e transformações atmosféricas). O atraso neutrosférico pode então ser dividido em duas componentes, devido à composição da própria camada, sendo elas: a componente seca composta de gases, chamada de atraso hidrostático (*Hydrostatic Delay*), e outra composta de vapor d'água, o atraso úmido (*Wet Delay*). O atraso causado pela componente D_H tem a ordem de grandeza de 2,3 m no zênite e varia de acordo com a temperatura, a altitude e a pressão atmosférica. No entanto, representa 90% do atraso total com baixa variação temporal. Já na D_W o atraso é menor e representa aproximadamente 10% do atraso total, porém, sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas (SEEBER, 2003), devido a variação do vapor d'água ao longo de poucas horas do dia. A melhor predição dessa variável pode ser dada pela boa qualidade e distribuição de medidas de umidade e vapor d'água. A soma das duas componentes resulta no D_{NEUTRO}.

O atraso neutrosférico é causado pela variação do índice de refração (n) dos gases atmosféricos em relação ao espaço livre. Entende-se por índice de refração o valor com o qual é medida a capacidade de um meio causar mudanças na direção e alteração da velocidade de uma onda eletromagnética que por ele se propaga.

Em outras palavras, o índice de refração (*n*) é a razão entre as velocidades da onda no vácuo (*c*) e sua velocidade em um meio qualquer (*v*), isto é:

$$n = \frac{c}{v} \quad , \qquad 3$$

A variação do índice de refração causa na trajetória do sinal GNSS, uma leve curvatura quando comparada à trajetória geométrica (*Sg*) no vácuo, entre um satélite e o receptor na superfície terrestre, como mostra de forma exagerada à figura 4.

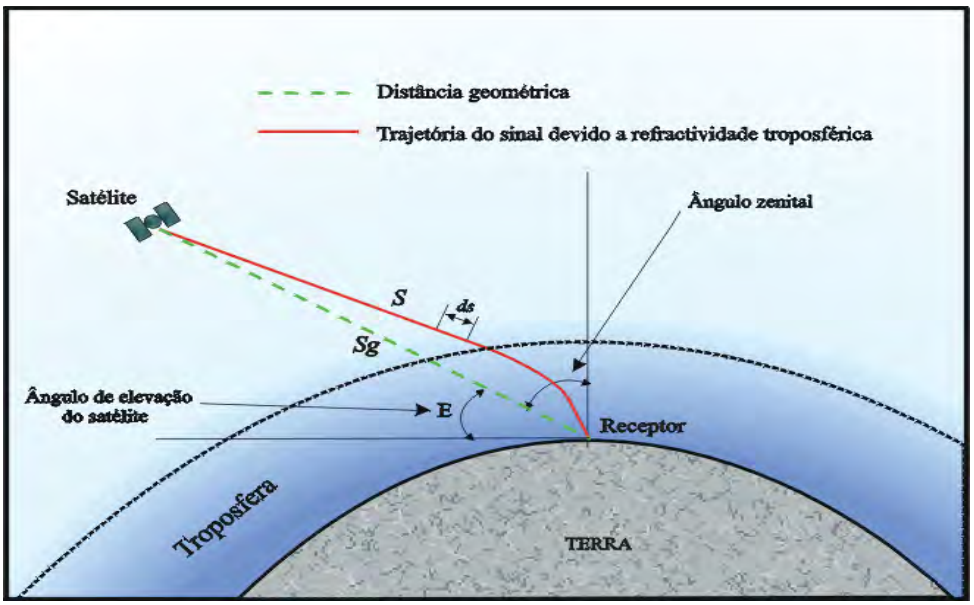


Figura 4: Efeito do ZTD nos sinais GNSS.
Fonte: SAPUCCI, 2001.

A trajetória curva (traço contínuo) difere da distância geométrica (traço intermitente) devido à influência dos gases que compõem a neutrosfera (SAPUCCI, 2001). Sendo assim considerando *ds* como parte infinitesimal do comprimento da trajetória (*S*) realizada pelo sinal GNSS (Figura 4), devido o efeito causado pela Neutrosfera ocorre um atraso de tempo *dt*, sendo:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad , \qquad 4$$

onde v é a velocidade média pontual do sinal GNSS. E nesse ponto considerado, v é diferente de c (pela propagação do sinal ser na neutrosfera e não no vácuo), logo existe um índice de refração no ponto considerado (n).

Assim pelas equações (3) e (4) obtêm o atraso de tempo *dt*, para esse ponto, tal que:

$$dt = \frac{nds}{c}. \quad (5)$$

Reescrevendo a equação (5), tem-se:

$$cdt = nds. \quad (6)$$

Realizando a integração da equação 6, chega-se ao comprimento da trajetória (S), ao caminho efetivamente percorrido pela onda eletromagnética do satélite ao receptor, em função do índice de refração:

$$S = \int nds. \quad (7)$$

A diferença entre a distância S e a distância geométrica S_g causada pelo efeito na Neutrosfera é o *TD* (Tropospheric Delay).

$$TD = S - S_g = \int nds - \int ds = \int (n-1)ds. \quad (8)$$

O índice de refratividade *n* tem valores muito próximos à unidade, por essa razão é importante expressá-lo por meio de outra grandeza, que é denominada refratividade do ar (N), obtida por:

$$N = (n-1)10^6. \quad (9)$$

Tendo em vista que a refratividade está relacionada com a coluna vertical da atmosfera deve ser integrada na equação (10) com relação à *h*, na altura efetiva da neutrosfera. E aplicando (8) e (9), tem-se:

$$TD = 10^{-6} \int N ds. \quad 10$$

A refratividade do ar (*N*) pode ser expressa em função de parâmetros meteorológicos como a temperatura do ar, a pressão parcial do ar hidrostático, a pressão parcial do vapor d'água e da umidade relativa, variando em função da altitude (*h*). De onde é possível a divisão da refratividade em duas componentes: a componente seca (hidrostática), e a úmida (composta por vapor d'água), devido ao comportamento diferenciado dos gases hidrostáticos e do vapor d'água.

A espessura da camada da neutrosfera, a que o sinal atravessa, é proporcional ao ângulo de elevação do satélite. O TD é obtido na direção do zênite, denominado então ZTD (Zenital Tropospheric Delay), o sinal depende do ângulo de elevação do satélite. A relação entre o atraso troposférico e o ângulo de elevação é feita pela função denominada função de mapeamento. Mas o atraso ZTD é melhor aproximado, pela soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida multiplicadas por funções de mapeamento, específicas para cada componente. De tal maneira que a expressão simplificada pode ser dada por:

$$ZTD = ZHD \,.\, mh(E) + ZWD \,.\, mw(E)\,, \quad 11$$

Sendo ZHD o atraso zenital da componente hidrostática, adotado sempre que for tratado da componente seca, ZWD o atraso zenital da componente úmida, utilizado para represente a componente úmida, e as funções de mapeamento $mh(E)$ e $mw(E)$ que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida, respectivamente, com o ângulo de elevação (E) do satélite.

Pela equação (11) são utilizadas duas estratégias para a modelagem do atraso neutrosférico. Sendo a primeira a determinação do atraso na direção zenital, que está sobre o perfil da coluna atmosférica sobre a estação, logo sobre os valores de pressão e

temperatura ao longo da coluna. Já a segunda estratégia é o de relacionar o atraso na direção zenital com o ângulo de elevação e azimute do satélite observado, através da função de mapeamento.

Para analisar o atraso zenital neutrosférico é necessário investigar o comportamento da refratividade em relação à variação da altitude dentro do intervalo da altura efetiva dessa camada atmosférica (SAPUCCI, 2001).

A refratividade atmosférica pode ser dada por (DAVIS *et al.*, 1985):

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{P_w}{T^2} Z_w^{-1}; \quad 12$$

onde:

P_d : pressão parcial dos gases secos (*dry)*;

P_w : pressão parcial do vapor d'água (*wet*), normalmente usado *e*;

Z_d^{-1}: inverso da constante de compressibilidade da componente seca;

Z_w^{-1}: inverso da constante de compressibilidade da componente úmida.

T: temperatura em *Kelvin*;

k_1, k_2, k_3: contantes.

A pressão parcial é dada por:

$$P_i = Z_i \, \rho_i \, R_i \, T \; ; \quad 13$$

com:

Z_i : compressibilidade;

ρ_i : densidade de massa;

R_i : constante de gás específico ($R_i = R/M_i, R$ constante de gás universal e

M_i : massa molar;

T: temperatura absoluta.

Temos o inverso das constantes de compressibilidade das componentes seca e úmida (DAVIS *et al.*, 1985):

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57{,}97 * 10^{-8} \left(1 + \frac{0{,}52}{T}\right) - 9{,}4611 * 10^{-4} \frac{t}{T^2}\right] \quad 14$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \left[\left(\frac{e}{T^3}\right)(1 - 0{,}01317t + 1{,}75 * 10^{-4}t^2 + 1{,}44 * 10^{-6}t^3)\right] \quad 15$$

onde:

t: temperatura em ºC;

P_d, P_w: pressão parcial seca e úmida em milibares;

T: temperatura em K.

As constantes de compressibilidade são necessárias para descrever o comportamento de um gás não ideal, como é o caso das componentes hidrostática e úmida. Por essa razão, a integração da refratividade requer o conhecimento dos perfis da componente úmida e seca, composto por uma mistura variável, sendo possível tornar um dos elementos independente da razão da mistura, por meio da equação 12 e da equação da pressão de gases ($P\,V = n\,R\,T\,Z_i$), tem-se N em duas componentes (DAVIS *et al.*, 1985):

$$N = N_h + N_w = k_1 R_h \rho + k'_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \quad , \quad 16$$

sendo:

N_h e N_w: refratividade da atmosfera hidrostática e úmida, respectivamente;

k_1, k'_2 e k_3: valores constantes obtidos experimentalmente (BEVIS *et al.*, 1994);

R_h: constante universal dos gases;

ρ: densidade do ar atmosférico;

e: pressão parcial do vapor d'água, em hPa.

O primeiro termo da equação 16 refere-se à componente hidrostática, e sendo assim depende apenas da densidade total da atmosfera e não da razão de mistura das componentes hidrostática e úmida. Logo a componente hidrostática pode ser determinada com razoável precisão a partir de medidas atmosféricas efetuadas na superfície (SAPUCCI, 2001).

2.4.1 Atraso zenital na componente hidrostática

A partir da equação 10 e considerando a primeira parte da equação 16, tem-se o atraso da componente hidrostática. A seguinte equação mostra como obter o atraso da componente hidrostática ZHD:

$$\mathrm{ZHD} = 10^{-6} \int N_h \, ds = 10^{-6} \int k_1 \, R_h \, \rho dh \, , \qquad 17$$

Na equação (10) utilizou-se a variável s (distância entre o satélite e o receptor) para a integração. Onde o atraso é considerado na direção zenital, a variável foi substituída por h (altitude do ponto em um perfil vertical da camada dos gases hidrostáticos).

Integrando a equação (17) e considerando os fatores físicos envolvidos pode-se obter a expressão do atraso neutrosférico da componente hidrostática, dada por:

$$\mathrm{ZHD} = (2{,}27683157 \times 10^{-3} \pm 5{,}0 \times 10^{-7} \frac{P_0}{(1-0{,}0026 \cos 2\varphi - 0{,}00028\, h_0)} \, . \qquad 18$$

onde:

P_0: pressão parcial dos gases, em hPa;

φ: latitude local em graus decimais;

h_0: altitude acima do elipsóide, em metros.

A qualidade das medidas de pressão atmosférica determina a precisão do ZHD, ou seja, com medidas de pressão de qualidade, o resultado do ZHD será de valores mais precisos.

2.4.2 Atraso zenital da componente úmida

Os dois últimos termos da equação (16), referentes à componente úmida, estão totalmente relacionados com a razão de mistura entre o vapor d'água e os gases hidrostáticos.

$$\mathrm{ZWD} = 10^{-6} \int \mathrm{N_w}\,\mathrm{dh} = 10^{-6} \int (k'_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1})\, dh \quad , \tag{19}$$

onde e representa a pressão parcial do vapor d'água e T a temperatura, ambos variam em função da altitude (h). O termo Z_w^{-1} é a constante de compressibilidade do vapor d'água, e k'_2 e k_3 são constantes de refratividade da atmosfera.

Os valores de e estão relacionados com o vapor d'água e os gases hidrostáticos, que são muito variáveis ao longo da atmosfera e do tempo, por essa razão torna-se difícil determiná-lo com medidas de superfície. Contudo esses valores podem ser obtidos pelo radiômetro, onde é possível obter estimativas da refratividade que são geradas pela componente úmida, ou a partir de radiossondas em que possibilita a integração numérica da equação (19) utilizando os valores de e e T (SAPUCCI, 2001). Embora esses métodos convencionais, como os radiômetros e as radiossondas, forneçam esses valores com precisão, estas são técnicas de alto custo, o que restringe o número de lançamentos diários das radiossondas, e o número de estações, no caso dos radiômetros (Bevis *et al*., 1992).

Uma alternativa se dá pela utilização do sistema GNSS, ao realizar a modelagem do atraso zenital neutrosférico, com o uso de algoritmos que utilizam as funções matemáticas que relacionam a refratividade com os valores de temperatura e pressão, que são coletados na superfície. Essas estratégias são empregadas tanto na influência da componente úmida quanto da hidrostática. O mesmo ocorre, com os valores de pressão medidos a partir das estações meteorológicas instaladas ao lado das estações GNSS.

2.5 MODELAGEM DO ZTD

A modelagem neutrosférica pode ser dividida em duas fases: A primeira é a de determinação do atraso gerado no sinal do satélite ao se propagar por meio da Neutrosfera na direção zenital, em função do perfil da coluna atmosférica sobre a estação e assim, dos valores de pressão e temperatura ao longo dela, denominado de Atraso Zenital Total (ZTD); E a segunda fase, onde se relaciona o ZTD com o ângulo de elevação do satélite observado, por meio das funções de mapeamento. Essas funções projetam o atraso neutrosférico da direção zenital para a direção satélite-receptor permitindo a modelagem da influência neutrosférica a partir das medidas de temperatura, pressão e umidade do perfil vertical neutrosférico.

As funções de mapeamento aumentam o espaço útil de observação na modelagem dos efeitos causados pela Neutrosfera, principalmente quando utilizadas próximas ao horizonte. Segundo Niell (1996), os erros na coordenada vertical, normalmente são maiores do que os erros nas coordenadas horizontais, e estão relacionados com a baixa qualidade modelagem das observações efetuadas em pequenos ângulos de elevação. Existem diversas funções de mapeamento desenvolvidas com o objetivo de melhorar a acurácia no posicionamento GNSS de alta precisão. Entre elas: as funções de Lanyi (LANYI, 1984), Davis (DAVIS *et al*, 1985) e Niell (NIELL, 1996) podem ser destacadas, porém essas funções consideram uma atmosfera padrão. Já as funções que utilizam valores de PNT, ou seja, a partir dos valores medidos, fazem a previsão dos parâmetros utilizados apresentando melhor qualidade nos valores obtidos, podem ser citadas as funções de Vienna VMF (BOEHM e SCHUH, 2004) e a função isobárica (NIELL, 2001).

Para minimizar os efeitos causados pela influência da neutrosfera nos sinais GNSS existem vários métodos. A escolha do qual se utilizará vai depender do tipo de aplicação e da precisão fornecida pelo método de posicionamento empregado.

Em aplicações onde se busca obter resultados com alta acurácia, o ajustamento das observações GNSS com aplicação de filtros como o filtro de Kalman, apresenta-se como a melhor maneira para determinar os valores do atraso zenital neutrosférico.

Alguns métodos aplicados para minimizar o atraso neutrosférico utilizam modelos matemáticos, sendo que os resíduos são parametrizados e estimados a partir das

observações GNSS. Tais modelos foram desenvolvidos pela determinação de coeficientes por meio de ajustamento de observações atmosféricas empregando um grande conjunto de medidas obtidas por diferentes métodos de coleta. Para aplicações de baixa precisão, empregam-se apenas modelos matemáticos sem considerar os resíduos da modelagem da neutrosfera.

2.5.1 Modelos Teóricos do Atraso Zenital Neutrosférico

Os modelos matemáticos que são mais utilizados por usuários de receptores GNSS são basicamente dois: o de Saastamoinen (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTEGGER; WALES, 2008) e o de Hopfield (SEEBER, 2003).

No modelo de Saastamoinen as equações que tratam do atraso neutrosférico, são dadas por (HOFFMANN-WELLENHOF; LICHTEGGER; WALES, 2008):

$$\mathrm{ZHD} = 0{,}002277\ DP_0. \tag{20}$$

$$\mathrm{ZWD} = 0{,}002277\ D\left(\frac{1255}{T_0} + 0{,}05\right)e_0. \tag{21}$$

onde:

$P_{0:}$ pressão parcial dos gases, em *hPa*;

$e_{0:}$ pressão parcial do vapor d'água, em *hPa*;

T_0: temperatura, em C^o/Km;

A constante 0,002277 advém da constante k_1, a constante específica dos gases hidrostáticos (R_h), e a constante gravitacional efetiva (gm), sendo k_1 adimensional.

Sendo a constante gravitacional dada em função da latitude e altitude do local, o fator de correção D em metros, corrige as variações que ocorrem nessas variáveis, dado por:

$$D = (1 + 0{,}0026\ cos2\varphi + 0{,}00028\ h_0). \tag{22}$$

Sendo a altitude h_0 em metros. O modelo de Saastamoinen é baseado no equilíbrio hidrostático dos gases que compõem a atmosfera, ou seja, considera a densidade do ar proporcional à pressão e inversamente proporcional à altitude e à gravidade.

Outro modelo é o de Hopfield. Nesse modelo tem-se a refratividade atmosférica (*N*) ao longo do sinal GNSS a partir de parâmetros de temperatura e pressão que são obtidos pelos dados meteorológicos medidos da superfície, e da altura da camada atmosférica sobre o local observado. Esse modelo é dado pelas seguintes equações (SEEBER, 2003):

$$ZHD = 155{,}2 \times 10^{-7} \frac{P_0}{T_0} H_H \ , \qquad 23$$

$$ZWD = 155{,}2 \times 10^{-7} \frac{4810\, e_0}{{T_0}^2} H_W, \qquad 24$$

Onde:

- ZHD e ZWD: atraso na direção zenital em relação a componente hidrostática, e a úmida, respectivamente;
- a constante $155{,}2 \times 10^{-7}$, presente nas equações trata de uma das variáveis da refratividade do ar (k_1) e do coeficiente que associa a espessura da camada atmosférica com o atraso zenital;
- o índice "$_0$" refere-se medidas que foram realizadas na superfície;
- Pressão (*P*) em *hPa;*
- Temperatura (*T*) em Kelvins;
- H_H e H_W: alturas das camadas atmosféricas das componentes: hidrostática e úmida, respectivamente, em unidades métricas.

  Sendo H_H e H_W (SEEBER, 2003):

$$H_H = 40{,}136 + 148{,}72\,(T_0 - 273{,}16). \quad (25)$$

$$H_W = 11000. \quad (26)$$

A altura da componente hidrostática H_H é dada em função da temperatura. Já altura da componente úmida, de acordo com Seeber (2003), é considerada para latitudes próximas ao equador como constante (11000), porém de acordo com a latitude local a espessura da camada que contém o vapor d'água pode variar. Sendo assim uma correção deve ser feita ao considerar a variação da latitude local (φ) (SAPUCCI, 2001):

$$H_W = 11000 - 44{,}44\varphi. \quad (27)$$

Nos modelos de Saastamoinen e Hopfield os valores de temperatura e pressão podem ser obtidos pelos métodos diretos ou indiretos. Com o método direto, essas variáveis são adquiridas por termômetros e barômetros que devem ser instalados próximos ao ponto de coleta dos dados GNSS. Pórem, há incidência de muitos erros e dificuldades para deter essas medidas, logo essas medidas são pouco utilizadas. Outra opção para adquirir os valores dessas variavéis, também de maneira direta seria por meio de estações meteorológicas automáticas. Elas possuem sensores que medem a temperatura, pressão, úmidade relativa, velocidade e direção do vento. Nelas são registrados, automaticamente, arquivos texto com os valores medidos em um intervalo de tempo que é previamente configurado.

Por meio de metódos indiretos é possível obter as variavéis atmosféricas, sem maiores gastos ou dificuldades. Pois essas variáveis são aproximações grosseiras, e emprega-se métodos de ajustamento para estimar resíduos que advém dessa modelagem. Com a determinação indireta considera-se os valores de temperatura e pressão que se baseiam em condições normais do tempo atmosférico. Na determinação indireta das variáveis atmosféricas utiliza valores de referência ao nível dos mares, que são mapeadas para qualquer localidade, que decresce a medida que cresce a altitude. Essas aproximações podem ser consideradas validas se considerar períodos longos de tempo. A qualidade das variáveis se darão em função das condições de continentalidade e maritmidade do local, onde utilizadas (SAPUCCI, 2001).

Os valores utilizados à nível dos mares, são: pressão atmosférica padrão (P_p) de 1 atm que equivale a 1013,25 *hPa*; temperatura padrão (T_cp) de 18ºC; e considera-se a umidade relativa padrão (*RHp*) em 50%.

Mas para uma localidade em que se conhece a altitude ortométrica (*H*), na falta desta, a altitude geométrica (*h*) pode ser utilizada sem causar diferenças significativas devido a baixa precisão obtida com a aplicação dessas equações. Assim pode se obter a pressão atmosférica média na superfície (P_0), por:

$$P_0 \cong P_p\ (1 - H\ 2{,}26 * 10^{-5})^{5{,}225}. \qquad 28$$

A temperatura (T_{c0}) na localidade considerada pode ser expressa pelo valor médio:

$$T_{c0} \cong T_c p - H * 0{,}0065\ . \qquad 29$$

A pressão parcial do vapor d'água na superfície considerando essas condições de valor médio pode ser obtida pela equação 29, sendo 'e' o número neperiano:

$$e_0\ \cong RHp\ \mathrm{e}^{\frac{\left(19{,}2082 - \frac{4086{,}19}{T_cP + 273{,}15} - \frac{181961}{(T_cP + 273{,}15)^2}\right)}{100}} \qquad 30$$

Os modelos teóricos não apresentam bons resultados em muitas aplicações, quando trata-se da região da América do Sul, uma vez que as coletas das observações meteorológicas utilizadas para o desenvolvimento desses modelos foram realizadas em sua maioria no hemisfério norte, por terem poucas estações meteorológicas no hemisfério sul na época de coleta, adotando-se valores empíricos para todo o globo. Sendo assim os valores de pressão e temperatura que são considerados nesses modelos foram adotados de acordo com os valores apresentados na região norte, que apresenta grandes diferenças em relação aos valores encontrados para essas variáveis na região sul, principalmente porque nessa região encontramos um clima tropical e bruscas variações de temperatura e pressão ao longo das estações do ano e ainda de acordo com localização do ponto de estudo. No Brasil, por

exemplo, encontramos para o mesmo período do ano diferentes temperaturas e pressão de acordo com a localidade (ex.: região Norte e região Sul).

Por essa razão os modelos de PNT podem ser considerados melhores opções para essa região, uma vez que a partir da previsão do tempo realizada no CPTEC, que gera previsões para toda a América do Sul, é possível obter os parâmetros utilizados na modelagem do atraso neutrosférico com as devidas variações que representam a realidade dessa região.

2.6 MODELAGEM DO ZTD USANDO PNT

A modelagem do atraso zenital neutrosférico apresenta-se como uma alternativa para minimizar os efeitos da neutrosfera nos sinais de radiofrequência em regiões da América do Sul. Como foi discutido na seção 2.1, o atraso zenital da componente hidrostática (ZHD) pode ser determinado a partir da localização e de valores de pressão atmosférica previstos em produtos de PNT aplicados na equação 18 e na equação 19 para a previsão do atraso neutrosférico da componente úmida (ZWD). Nessa seção, conceitos básicos da PNT serão tratados bem como a aplicação de seus produtos na modelagem do atraso neutrosférico.

2.6.1 Previsão Numérica de Tempo

A Previsão Numérica de Tempo é uma técnica utilizada pelas ciências atmosféricas para prever o tempo por meio de processos computacionais com aplicação de equações matemáticas que descrevem o comportamento da atmosfera com base em leis físicas em relação ao tempo. Porém, prever o tempo para épocas futuras é algo complexo que requer técnicas de modelagem numérica, contempladas em modelos de Previsão Numérica de Tempo, bem como alto desempenho computacional para executá-los.

A PNT tem como base a obtenção do estado futuro da atmosfera em um instante ($t = t_0+\Delta t$), ao considerar as leis de evolução do estado da atmosfera com base em seu

estado inicial no instante t_0. Para isso, utiliza-se um modelo teórico da atmosfera que possa ser integrado no tempo por meio de procedimentos numéricos.

O melhor resultado na previsão está relacionado com a capacidade de modelar, com mais eficiência, a atmosfera terrestre a partir de uma boa descrição de seu estado inicial, que se dá a partir das leis da mecânica e termodinâmica para o ar e água encontrados na atmosfera, como também das variáveis atmosféricas com boa distribuição sobre a região e suas incertezas conhecidas. Nessa modelagem é considerada a interação de fenômenos físicos, químicos que ocorrem na atmosfera, o que pode ser expressa por equações que relacionam as grandezas meteorológicas, como a pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, entre outras.

A derivação dessas equações com relação ao tempo *t* e as coordenadas geográficas formam um grande complexo sistema de derivadas parciais, sendo difícil e demorada uma solução exata, onde se busca uma boa aproximação da solução desse sistema, gerando valores previstos com qualidade, mais que podem conter erros. Esses processos numéricos utilizados são viabilizados com o uso de computadores de alto desempenho, assim como sistemas eficazes de armazenamento, os chamados supercomputadores.

Os modelos de PNT podem ser divididos pela área de abrangência da superfície modelada. Podendo ser globais, cobrindo toda a superfície do globo, ou regionais abrangendo apenas partes da superfície terrestre, mas que em geral apresentam melhor resolução espacial. Os valores observados das variáveis meteorológicas são obtidos em diversas localidades sobre o globo em uma grade irregular de observação.

A grade regular do modelo, grade de interpolação, pode ser interpretada como uma matriz que é utilizada pelos programas durante a integração, sendo que para cada célula é calculado um valor. Na figura 5 é apresentada a diferença entre a grade de observação, onde as variáveis atmosféricas são medidas, e a grade de interpolação, pontos com valores das variáveis atmosféricas interpoladas para os valores previstos em toda a grade do modelo utilizado.

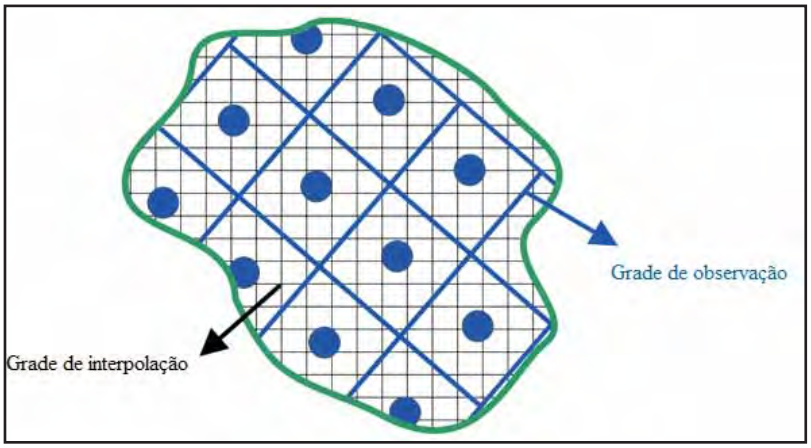


Figura 5: Grade de observação e grade regular do modelo.
Fonte: Adaptado de www.falker.com.br. Acesso em 20 dez. de 2012.

O tamanho da grade de interpolação é definido de acordo com a abrangência dos modelos, sejam eles regionais ou globais. Se a grade do modelo for igual a 5 km, isso implica que os pontos que serão interpolados estarão em uma cobertura de 5 em 5 km. Isso defini a resolução da grade, e varia de acordo com cada modelo, assim como da capacidade computacional do centro de processamento, pois quanto maior a resolução maior esforço computacional é requerido.

Quanto maior a resolução do modelo tem-se um maior detalhamento sobre a área, o que implica em um maior detalhamento das previsões. Assim como, quanto menor resolução (100 km, por exemplo) menor detalhamento das previsões, porém o processo é mais rápido. Por isso, o modelo a ser usado deve estar de acordo com a aplicação, podendo variar quanto à abrangência e a resolução. Assim no caso de se usar um mesmo valor para uma área de 50 km não há necessidade se ter uma grade de 5 m.

Dentre os modelos globais, pode-se citar: o modelo GFS (*Global Forecast System)* do centro *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) dos EUA e o modelo do centro europeu ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Já nos modelos regionais destacam-se o modelo Eta, desenvolvido pelo NCEP, atualmente substituído pelo WRF; o *Mesoscale Model* (MM5), desenvolvido pela PSU (*Pennsylvania State Univesity*) e pela NCAR/UCAR (*National Center for AtmosphericResearch of University Corporation for Atmospheric Research*); o modelo *High-Resolution Limited AreaModeling* (HIRLAM), desenvolvido por institutos europeus de meteorologia, e o BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling

System) adaptado do RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), desenvolvido nos EUA (Colorado).

2.6.2 Assimilação de Dados

A assimilação de dados meteorológicos é um processo onde toda informação disponível deve ser utilizada para descrever adequadamente o estado da atmosfera em um determinado instante como condição inicial para um modelo de PNT. Os dados observados são combinados com as previsões de curto prazo do próprio modelo ("*First Guess*"), gerando assim condições iniciais para novas integrações (TALAGRAND, 1997 *apud* GONÇALVES, 1999).

A assimilação de dados pode ser dividida em um ciclo com quatro componentes (figura 6), nos quais existem diversos passos para se obter a condição inicial a ser implantada nos modelos de PNT (DALEY, 1991 *apud* GONÇALVES, 1999). Sendo eles:

1. Controle de qualidade, onde o objetivo é encontrar erros nas observações ou a não representatividade;
2. Análise objetiva, onde as observações são combinadas com previsão numérica, uma vez que essas, as observações, são obtidas de diversas origens e apresentam distribuição irregular no espaço e no tempo, buscando-se melhores resultados da representação da atmosfera para os pontos de grade;
3. Inicialização, onde são reduzidas ou filtradas as energias de alta frequência;
4. Previsão, onde os campos que são obtidos na inicialização passam por um modelo numérico que faz previsão de curto prazo (de até 6 horas) gerando campos dinâmicos e consistentes.



Figura 6: Componentes do ciclo da assimilação de dados
Fonte: Adaptado de Bengtsson, 1975 *apud* Gonçalves, 1999.

Na assimilação de dados sequencial, que é utilizada na PNT, os modelos são integrados em um intervalo de tempo onde as observações estão distribuídas. Quando o modelo chega a um instante em que existe uma observação disponível, o estado previsto pelo modelo (*background*) é corrigido por essa observação. Assim a integração do modelo é reiniciada dessa correção, e esse processo é repetido para todas as observações disponíveis. Essa operação onde a correção de um campo se dá pela integração do modelo com novas observações é chamada de análise.

Juntamente com os métodos variacionais é usado um ajuste global de uma solução do modelo para todas as informações que estejam disponíveis no período de assimilação, onde defini-se uma função escalar para as soluções do modelo, no intervalo de assimilação que calcula o erro entre a solução e as observações que estejam disponíveis, denominada função objetiva. Essa função é obtida pela soma do quadrado das diferenças entre as observações e os correspondentes valores do modelo, que é utilizada com o intuito de minimizar o erro com base nos dados obtidos pelo modelo.

O processo de assimilação de dados em um modelo de PNT é um procedimento cíclico (como mostra na Figura 7), os resultados gerados pelo modelo de PNT com integração curta no tempo (*t*-6), são usados como valores iniciais (FG – *First Guess*) pelo sistema de assimilação. O FG é combinado com observações disponíveis em um instante *t*, gerando um estado da atmosfera chamado de análise, que mais se aproxima da realidade física

nesse instante. Essa análise é utilizada para integração do modelo de PNT como condição inicial para gerar o próximo FG (t+6), e previsões do estado da atmosfera para épocas futuras (t+6, t+12, t+18, t+24...).

Portanto, quanto melhor os dados iniciais, melhores os modelos de previsão (bem calibrados para conseguir fazer previsões com qualidade mesmo sobre condições de perturbações) e assimilação utilizados para maiores intervalos de tempo, e consequentemente os dados previstos estarão próximos dos reais observados em cada dado instante (00h, ..., 12h, ..., 24, ...) (SAPUCCI, 2007).

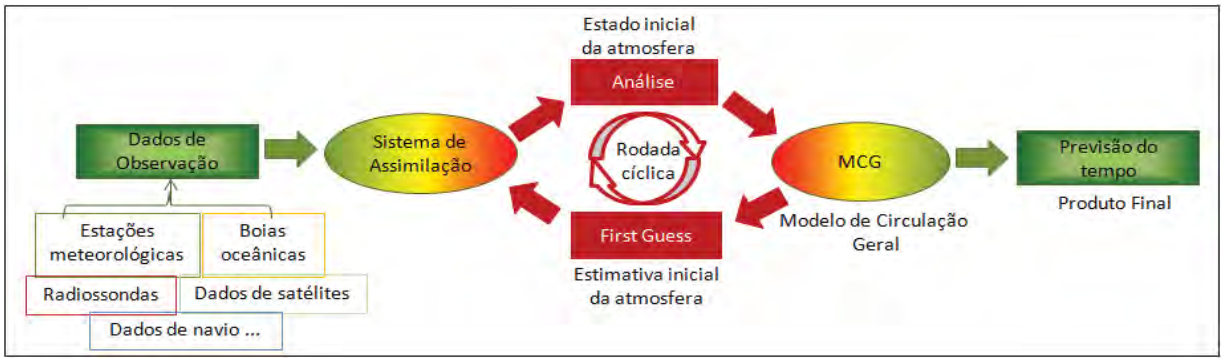


Figura 7: Processo de Previsão Numérica de Tempo com Assimilação de Dados.
Fonte: Adaptado de SAPUCCI, 2005.

2.6.3 Modelos de Previsão e Sistemas de Assimilação do CPTEC/INPE

No Brasil, o modelo global em uso no CPTEC/INPE é o (MCGA - Modelo de Circulação Geral Atmosférico). A origem no modelo MCGA foi adaptado do COLA (*Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies*) para as necessidades do CPTEC com condições iniciais do NCEP para previsão de tempo de médio prazo, sendo então denominado de CPTEC/COLA (CPTEC/INPE). As condições iniciais além de não serem as mais adequadas para o modelo do CPTEC por serem preparadas para o modelo Americano, representam uma dependência a um centro estrangeiro, que na falta dessas análises prejudicaria a qualidade das previsões e produtos do CPTEC.

O MCGA está operacional para previsão de tempo e com algumas modificações para previsão de clima, com resoluções de 200 x 200 km, 100 x100 km e 63 x 63 km, e atualmente com 45 x 45 km. Essas resoluções indicam que os valores previstos pelo

modelo das variáveis meteorológicas são valores médios sobre uma grade de 200 x 200km, 100 x 100km, 63 x 63km e 45 x 45 km (KINTER, 1997). As rodadas do modelo são para previsão de sete dias nos horários 00 e 12 UTC (Tempo Universal Coordenado), 09 e 21 horário local. Nos horários intermediários, 06 e 18 UTC, o modelo é rodado para previsão de doze horas produzindo um ciclo de assimilação de seis horas (http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/#) no caso das novas versões com assimilação de dados.

O sistema de assimilação de dados atualmente utilizado é o PSAS (*Physical-space Statistical Analysis System*), ele foi implementado no CPTEC em 2002, em parceria com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O PSAS é habilitado para assimilar dados de diferentes sistemas de observações. A quantidade de dados assimilados é obtida de processos que visam diminuir a densidade excessiva de informações (*thinning*), bem como eliminar valores errados por meio de uma análise estatística. Na fase de *thinning* busca-se aumentar a eficiência computacional ao eliminar dados redundantes. Na análise estatística, primeiro é associado o desvio entre a observação e a previsão de curto prazo (*background check*), e outra fase onde as observações são comparadas com observações mais próximas (*buddycheck*) (ANDREOLI *et al*. 2008).

O sistema de assimilação GPSAS (*Global Physical-spaceStatisticalAnalysis System*) é proveniente da combinação do MCGA do CPTEC (CPTEC/COLA) e o esquema de assimilação de dados PSAS. O GPSAS assimila informações de pressão e vento que são coletados por bóias, navios e plataformas no oceano, dados convencionais são obtidos por meio de radiossondas, que fornecem informações de geopotencial, temperatura, vento e umidade (ANDREOLI *et al.* 2008) além de perfis de umidade e altura geopotencial provenientes de satélites bem como informações de vento por satélites.

O Modelo Eta é um modelo regional atmosférico utilizado para fins de pesquisa e operação. O modelo advém do modelo HIBU (Instituto Hidrometeorológico e Universidade de Belgrado), desenvolvido nos anos setenta na ex-Iugoslávia. Hoje utilizado em diversos países no mundo. O código fonte do modelo está disponível para download no site do NCEP, ou no site do CPTEC/INPE em uma versão atualizada. O código pode ser executado em computadores pessoais nos sistemas UNIX ou LINUX. O nome do modelo vem da letra grega (η - eta) que denota a coordenada vertical, uma das características do modelo (Eta, 2011).

O sistema de assimilação regional operacional no CPTEC foi desenvolvido em 1998, com o uso do modelo Eta e o sistema de assimilação PSAS, e foi então denominado RPSAS (Regional PSAS) implementado em 1998 (HERDIES *et al*, 2007). Esse sistema foi configurado para uso no mesmo domínio do modelo Eta, abrangendo praticamente toda a América do Sul. Nesse sistema, são assimilados dados de superfície como componentes de vento e conteúdo de água precipitável, sobre os oceanos, assim como componente de vento e umidade específica. As medidas de superfície são obtidas por meio de sensores a bordo de navios e em boias oceânicas. As medidas em altitude são realizadas por balões, sensores a bordo de aviões assim como por radiossondas. Mas como a distribuição dos sistemas de observações espacial dos dados é irregular, as informações obtidas por satélite apresentam um avanço significativo na qualidade da análise, logo na previsão de tempo, principalmente sobre a América do Sul, em que existe escassez de observações convencionais, devido também às áreas oceânicas (HERDIES *et al*, 2007). Esse sistema foi desligado em Fevereiro de 2012.

O modelo Eta produz previsões para América do Sul, operacional no CPTEC/INPE desde 2005 com resolução de 100 km, passando para a resolução de 40 km e 20km, e com resolução atual de 15 km sem assimilação de dados, em relação ao modelo global, apresenta um detalhamento maior, com perspectivas futuras de aumentar essa resolução para 5 quilômetros, o que possibilitará um aumento significativo do detalhamento das previsões para todo o Brasil.

Podendo citar também o BRAMS que é um projeto da ATMET, IME/USP, IAG/USP e CPTEC/INPE, financiado pela FINEP (Financiadora brasileira), com o objetivo de produzir uma nova versão do RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*) (http://www.cptec.inpe.br/). Com intuito de ter um modelo regional único para os centros meteorológicos brasileiros (http://brams.cptec.inpe.br/), atualmente com resolução de 20 km e em pré-operação há atualmente a versão 5 km.

Em 2011 iniciou-se a implementação e testes com um novo sistema de assimilação de dados global o GSI 3Dvar (G3DVar - sistema variacional em 3 dimensões), uma parceria do CPTEC, da NASA e do NCEP. O G3DVar utiliza o sistema de assimilação do tipo 3DVar implementado no GSI acoplado com o MCGA/CPTEC, sendo que o GSI é responsável por gerar as análises (condições iniciais do MCGA) e o MCGA por gerar o *First Guess* e calcular as previsões. A previsão é que em 2013 esse sistema esteja operacional na versão global e que comece seu desenvolvimento ao ser integrado com os modelos regionais, iniciando pelo BRAMS com 5 km de resolução.

O G3DVar assimila principalmente dados de radiância, além dos dados convencionais. Sua resolução na versão global está atualmente em 40 km.

O CPTEC/INPE é o maior centro de previsão de tempo da América Latina e é o único que roda operacionalmente um modelo global com assimilação de dados do próprio centro, e em desenvolvimento um modelo regional com a assimilação do próprio centro.

Com a aquisição do maior supercomputador da América Latina e um dos maiores do mundo, foi possível ter acesso a sistemas computacionais mais eficientes e robustos, o que proporcionou mais rapidez nos cálculos, detalhamento nas resoluções e maior qualidade dos resultados dos modelos numéricos de tempo e do clima.

Para obter um melhor resultado na PNT os dados utilizados na análise são provenientes de diferentes fontes sobre os pontos de grade do modelo, considerando que passem pelo processo de avaliação de qualidade, como dados de radiossondas (altura geopotencial, vento e umidade), bóias oceânicas (altura geopotencial), aviões (vento), satélite (altura geopotencial, vento e a TPW - *Total Precipitable Water*), navio (altura geopotencial). A disposição desses dados é dada na figura 8. Eles devem ser empregados para gerar um conjunto de parâmetros (temperatura, pressão, umidade, condições do vento, altura geopotencial, etc.) como condição inicial a um modelo matemático de previsão de tempo.

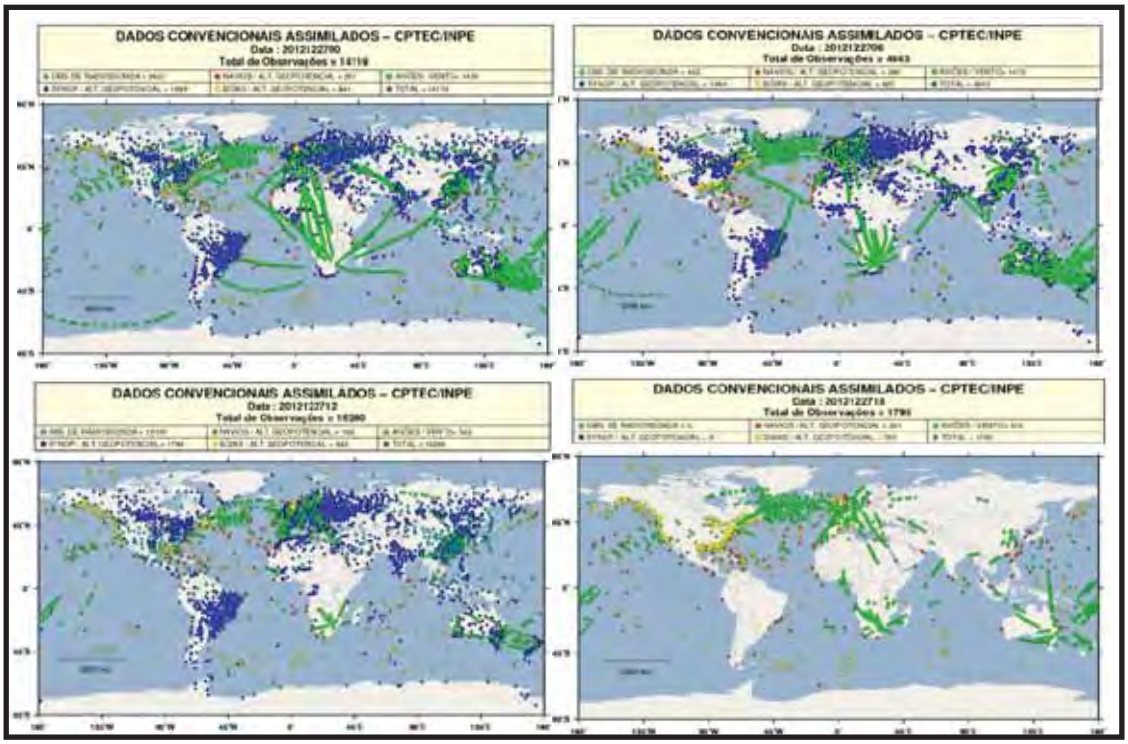


Figura 8: Distribuição espacial dos dados assimilados no CPTEC das 00h, 06h, 12h e 18h (esquerda para direita de cima para baixo).
Fonte: CPTEC/INPE (http://assimila.cptec.inpe.br/).

2.6.4 Avaliação dos modelos de previsão

Os modelos de previsão apresentam comportamentos distintos devido aos diferentes sistemas de assimilação que estão acoplados, como também pela resolução da grade utilizada. O GPSAS (versão global) quanto o RPSAS (versão regional) assimila observações em superfície, como altura geopotencial, valores do conteúdo total de água precipitável e componentes do vento (apenas sobre os oceanos), assim como perfis de altura geopotencial, componentes do vento e umidade específica (em altitude), considerando-se nesse caso apenas os níveis isobáricos padrões (HERDIES *et al*, 2007).

O RPSAS apresenta um bom desempenho em seu desenvolvimento, podendo ser comparado com outros modelos utilizados no CPTEC, que utilizam a análise do NCEP. As figuras 9 e 10 apresentam um nível de acerto médio para as previsões de pressão de diversos modelos rodados no CPTEC, no período de janeiro a abril de 2007. Essas análises são em relação aos modelos regionais RPSAS, ETA 40 km e ETA 20 km e globais GFS, T213 e GPSAS (HERDIES *et al*, 2007).

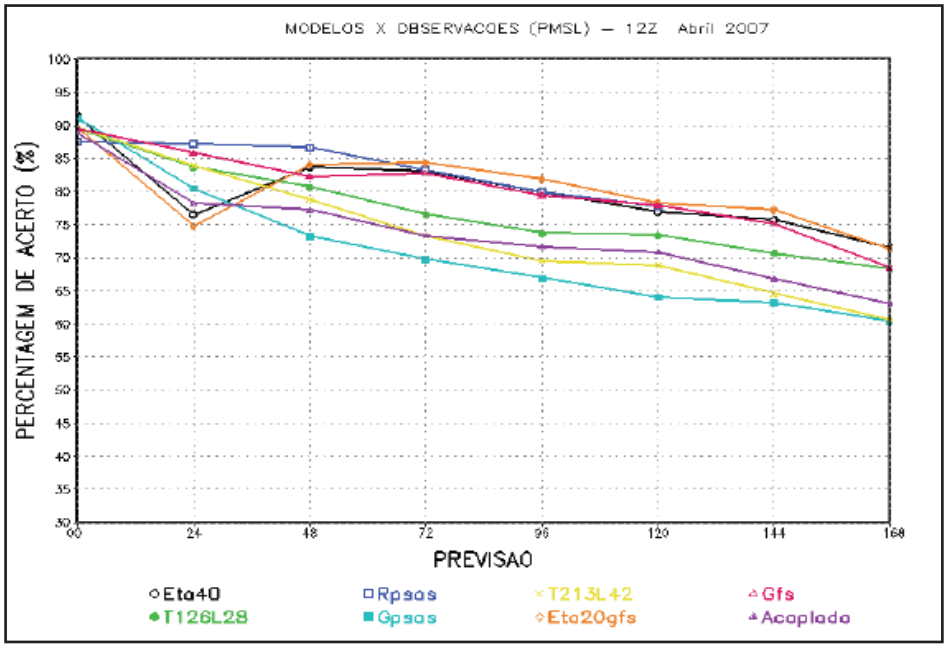


Figura 9: Avaliação dos sistemas de assimilação em 12/04/2007.
Fonte: Herdies *et al*, 2007.

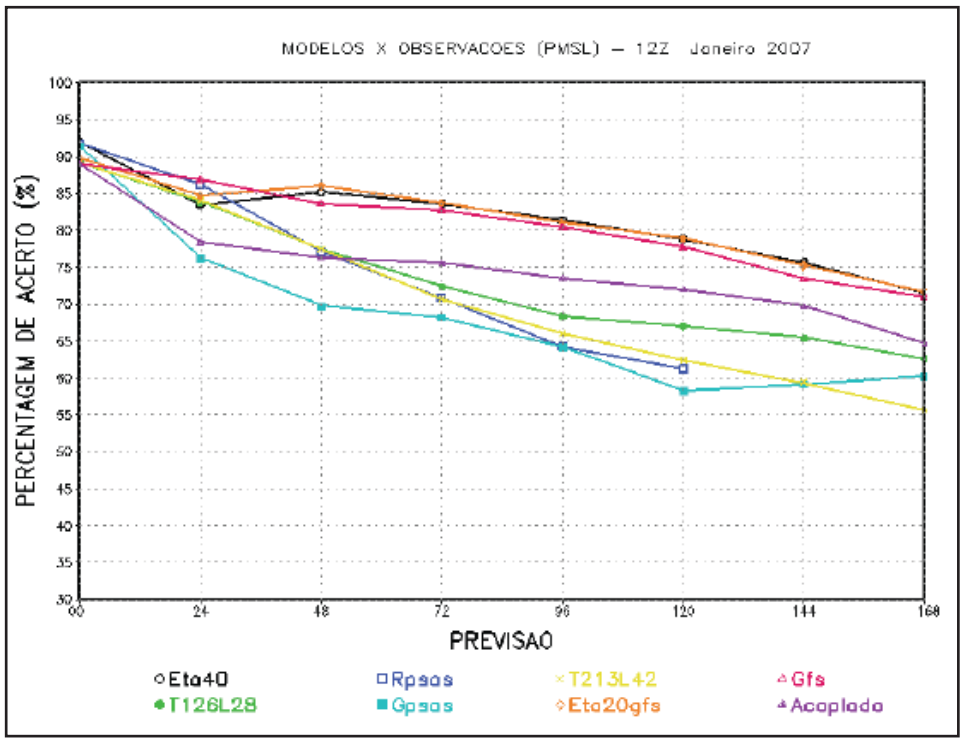


Figura 10: Avaliação dos sistemas de assimilação regionais em 01/06/2007.
Fonte: Herdies *et al*, 2007.

Os resultados obtidos pelo modelo RPSAS (linha em azul escuro) apresentam boa qualidade no nível de acerto, principalmente na previsão de 48 horas, onde os níveis de acertos chegam a 87%, e não apresenta queda de qualidade na previsão de 24 horas, porém os modelos (Eta40 e o Eta20) que utilizam como condição inicial a análise do modelo global do NCEP, para a previsão de 24 horas, apresentam declínio, que se dá ao tempo de ajuste necessário entre o modelo regional e a análise do modelo global (que ocorre após as 24 horas de previsão) (HERDIES *et al*, 2007).

Outra avaliação apresentada é a avaliação categórica, o critério de acerto ou erro da previsão de precipitação baseia-se na ocorrência ou não desse fenômeno. Além dessa avaliação existem outras 10 avaliações diferentes dos modelos operacionais do CPTEC/INPE, que são avaliados de diferentes maneiras relacionando dados de radiossondas, previsão com dados de análise, considerando variáveis de geopotencial, precipitação entre outras, essas avaliações podem ser encontradas em: http://avaliacaodemodelos.cptec.inpe.br/. A Figura 11 apresenta o viés (*bias*) para a componente chuva em milímetros, dos dados observados em relação aos previstos pelos modelos. Para os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro de 2011 os modelos Eta 20 km e RPSAS.

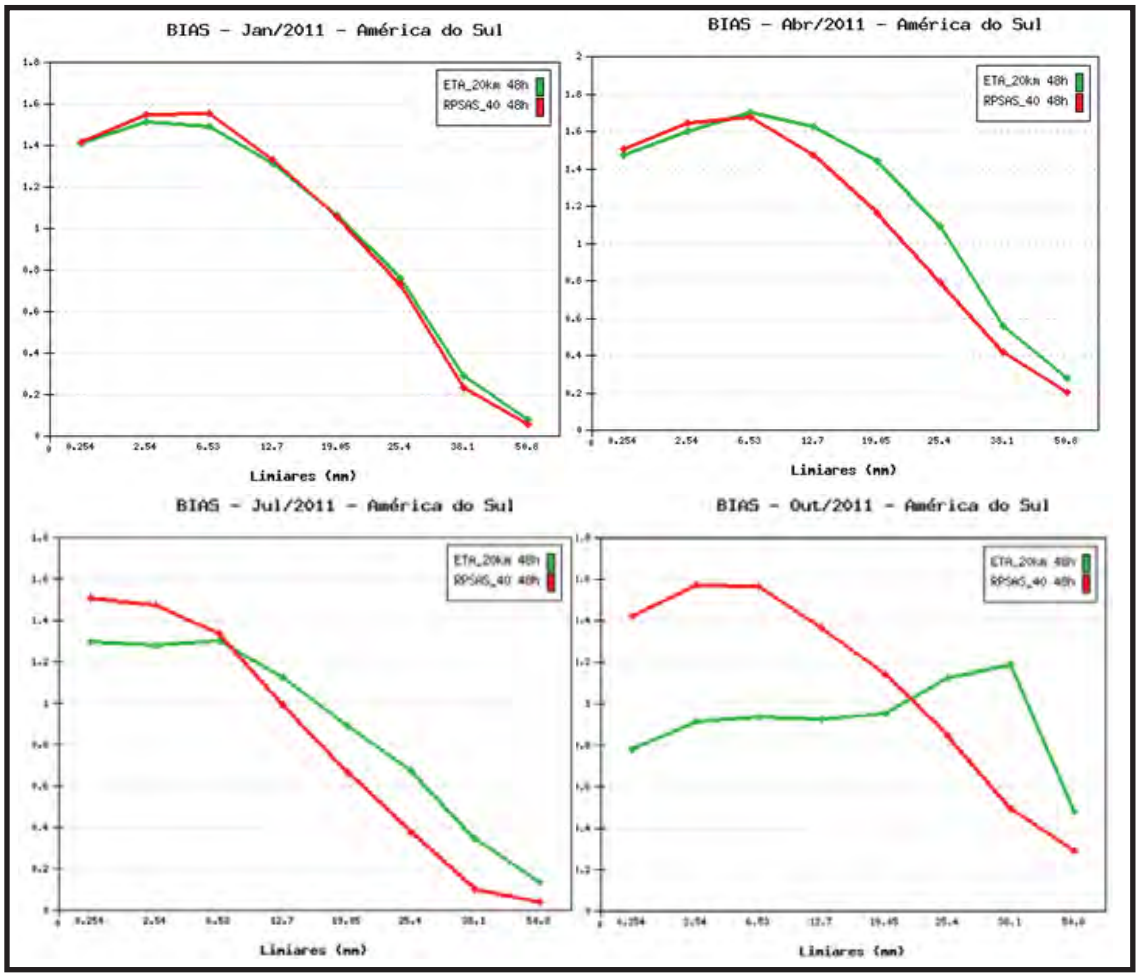


Figura 11: Viés para os meses de 01/04/07/10 de 2011.
Fonte: http://avaliacaodemodelos.cptec.inpe.br/obs/qpf/phps/index.php.

O modelo RPSAS apresenta uma variação de até 1.6 em janeiro, 1.7 em abril, nos meses de julho a variação esteve em 1.5 e em outubro de 1.4 à 1.6. Já o modelo Eta20 apresenta variação de até 1.6 nos meses de janeiro e abril, em julho atingiu 1.3 e em outubro esteve de 0.8 à 1.2 período que apresentou maior variação. Ambos os modelos apresentam melhor desempenho nos limiares acima de 50 mm, mas pode ser observado que o RPSAS tem a mesma qualidade em todas as estações, representadas por cada mês, e principalmente em outubro o RPSAS apresenta qualidade superior ao do Eta20 de até 0.6, podendo assim o RPSAS apresentar melhor qualidade da variação de chuva que ocorre nesses períodos.

A figura 12 apresenta a avaliação em relação ao viés para o período de Janeiro, Fevereiro, Março e Abril de 2012, período onde os modelos Eta 20 km, RPSAS e Eta15 km estão simultaneamente disponíveis.

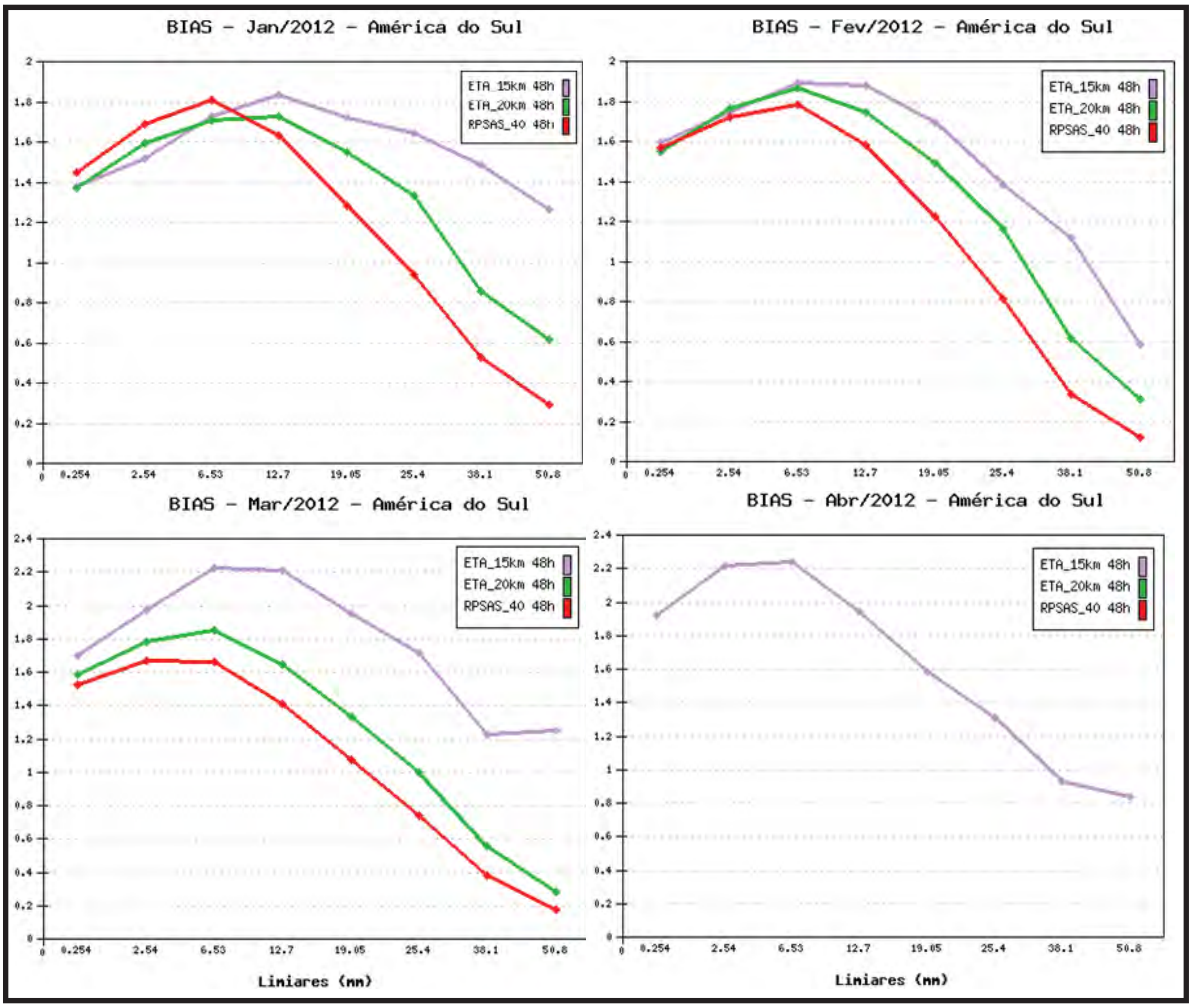


Figura 12: Apresenta o viés para os meses de 01/02/03/04 de 2012.
Fonte: http://avaliacaodemodelos.cptec.inpe.br/obs/qpf/phps/index.php.

Os modelos Eta 20km e RPSAS apresentam viés similares, porém o Eta 15 km apresenta um viés alto em relação aos outros dois modelos, e isso se mantém em Abril.

2.6.5 Previsões do ZTD usando produtos de PNT

Com a modelagem regional (ETA20 km), que utiliza para as previsões dos pontos de contorno da América do Sul o modelo global (MCGA), tem como resultados a previsão das principais variáveis meteorológicas para todos os pontos da grade, determinada pela resolução do modelo. A partir das previsões da PNT/CPTEC têm-se as previsões dos dados meteorológicos como temperatura, pressão e umidade (ponto de orvalho) para os 19 níveis verticais. Através desses valores, da equação do ZWD (18) e da integração numérica pode-se determinar o atraso zenital neutrosférico úmido, nos mesmos intervalos de tempo em que o modelo numérico gera as previsões. E assim aplicando os valores de pressão atmosférica à superfície, na equação do ZHD (equação 19), tem-se o atraso zenital na componente hidrostática. Com a soma de ZHD e ZWD, obtêm assim o ZTD, para um determinado ponto. Realizando esse processo para todos os pontos de uma grade, obtém-se uma malha de informações sobre a distribuição espacial de ZTD. Por uma interpolação é possível ter as previsões dessa variável para qualquer outro ponto dentro de grade (CPTEC, 2011).

Na página da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do INPE, no item de Radiação da Atmosfera é apresentado o Atraso Zenital (http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/). Onde são abordados alguns conceitos e definições do ZTD, como também são disponibilizados através de um banco de dados às previsões do ZTD, com dados binários e figuras no formato GIF (*Graphics Interchange Format*).

Nessas figuras pode ser verificado a intensidade do atraso zenital na América do Sul e para cada região (figura 13), e também através de um mapa dinâmico em que podem ser vistas as previsões dos últimos 3 dias.

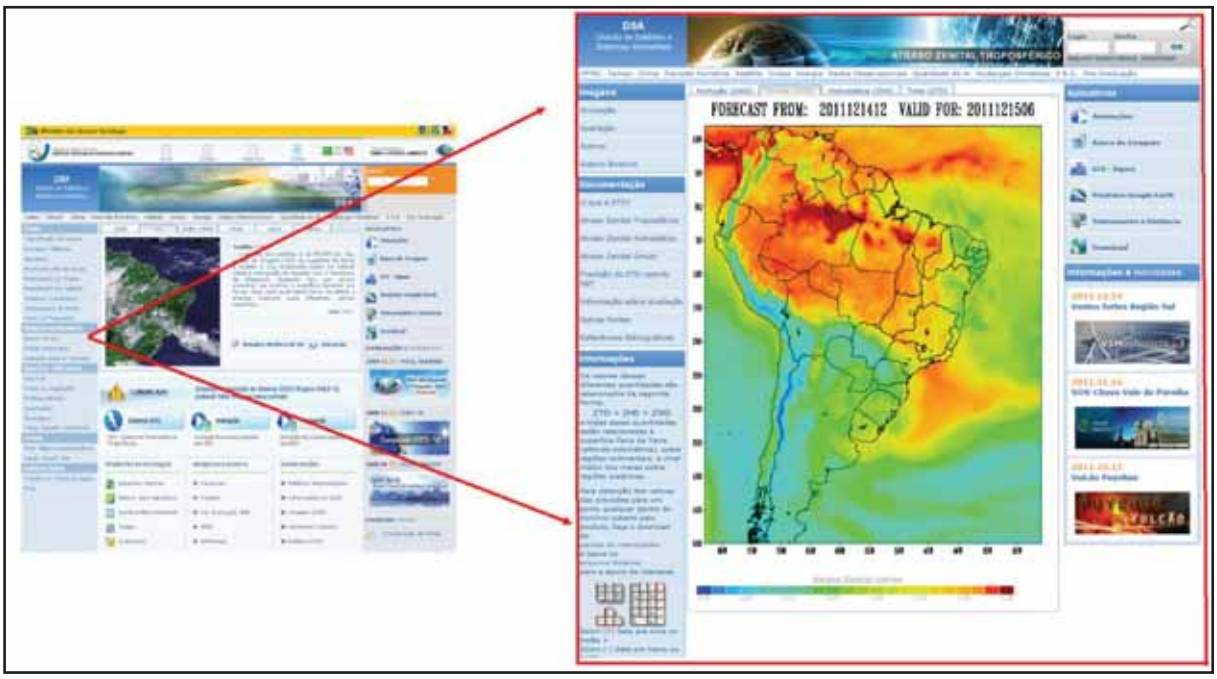


Figura 13: Página DSA e o produto do atraso operacional
Fonte: CPTEC/ZENITAL, 2011.

A versão atual da modelagem do atraso zenital neutrosférico disponível no CPTEC utiliza um modelo de previsão adaptado para a região da América do Sul. As análises são geradas pelo modelo externo ao CPTEC/INPE, o que pode não apresentar a melhor representação da realidade climática dessa região (como já discutido no item 4.7) não contemplando o uso de produtos que utilizam o melhor banco de dados atmosféricos coletados sobre a região, o qual pode ser obtido o emprego da assimilação de dados regional. Atualmente o modelo em desenvolvimento e testes G3DVar apresenta-se como uma solução a essa limitação.

3. MODELOS AVALIADOS E METODOLOGIA UTILIZADA

O presente capítulo apresenta a relação dos modelos avaliados, o período considerado nesse estudo e a metodologia utilizada para a modelagem do ZTD bem como a utilizada na avaliação dos resultados.

3.1 MODELOS DE PNT A SEREM AVALIADOS

Os modelos selecionados para essa pesquisa procuram considerar dois aspectos importantes: a maior resolução temporal e espacial, e a possível contribuição da assimilação de dados (CPTEC/INPE). Na seleção dos modelos foi levada em consideração à disponibilidade e acessibilidade dos arquivos para o maior período de tempo possível. Os modelos a serem considerados são:

- Modelo Eta com resolução de 20 quilômetros, o qual esteve operacional até 05 de fevereiro de 2012 e que não possui a assimilação de dados integrada. Esse modelo foi escolhido, pois até essa data mencionada foi o modelo utilizado na modelagem do ZTD operacional disponível no DSA/CPTEC;
- Modelo Eta com resolução de 15 quilômetros, que em relação ao de 20km apresenta um detalhamento maior sobre a região da América do Sul. Um ponto forte dessa versão é a disponibilidade dos dados a cada 3 horas. Esse modelo foi escolhido, pois foi o modelo que substituiu a versão anterior e o que encontra-se operacional no CPTEC, atualmente;
- Modelo RPSAS apresenta resolução horizontal de 40 quilômetros, mas possui em seus cálculos de previsão o processo de assimilação de dados regional integrado, o que pode representar melhores estimativas do ZTD nas primeiras horas de previsão, esse sistema foi desativado em fevereiro de 2012;
- Modelo global do CPTEC com o sistema de assimilação de dados G3DVar, o qual utiliza um banco de dados relativamente grande, no qual se inclui dados de radiância, o que pode impactar positivamente as estimativas do ZTD. Embora esse modelo ainda se encontra em

desenvolvimento no CPTEC/INPE, a participação do mesmo nesse estudo pode revelar seu potencial futuro nessa modelagem. A resolução espacial desse modelo é de 45 km.

3.2 METODOLOGIA PARA GERAR AS PREVISÕES DO ZTD USANDO OS MODELOS EM AVALIAÇÃO

A metodologia a ser empregada na implementação de novas versões das previsões do atraso neutrosférico se dá através da adaptação das versões já desenvolvidas anteriormente no CPTEC, para os novos formatos de arquivos com novas resoluções e com assimilação de dados. Junto a essa adaptação foi realizada melhorias no código. Uma avaliação do impacto dessas melhorias será feita, e se positivo as mesmas deverão ser incorporadas nas novas versões do produto.

Com os valores previstos de umidade e temperatura nos 22 níveis desses modelos será obtido o ZWD, por meio da equação 19, tem-se a previsão do atraso zenital na componente úmida nos mesmos intervalos de tempo em que os modelos numéricos geram as previsões.

Aplicando os valores de pressão atmosférica na superfície, juntamente com a integração numérica, na equação do ZHD, poderá ser obtido à previsão do atraso zenital na componente hidrostática.

Com a soma dessas duas componentes o ZWD e o ZHD têm-se o ZTD, o atraso total. Esse processo é realizado para todos os pontos da grade dos modelos utilizados, podendo posteriormente, por interpolação, determinar esses valores para qualquer ponto pertencente ao domínio espacial de cada modelo. Os valores são obtidos a partir das previsões geradas as 00h00 e 12h00, com intervalo de previsão de 6 horas até 36 horas de integração. Esse processo pode ser melhor compreendido através da figura 14.

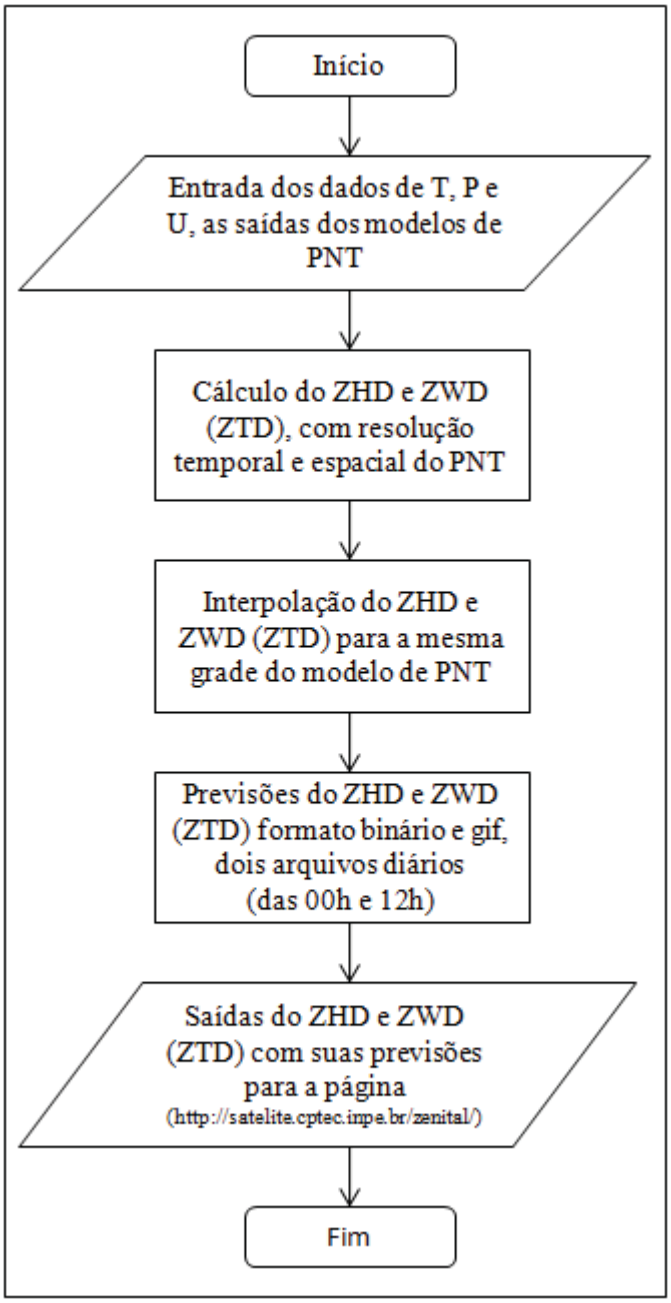


Figura 14: Processo de previsão do ZTD a partir do modelo de PNT do CPTEC/INPE.

Para a modelagem do ZTD com dados de PNT foram utilizados programas já desenvolvidos no sistema LINUX, na linguagem FORTRAN e no software GRADS (*Grid Analysis and Display System*), com adaptações quanto à resolução temporal e espacial para processar os novos dados. O processo de avaliação é apresentado na figura 15, e na figura 16, pode ser observado todo o processo de obtenção do ZTD previsto até sua validação.

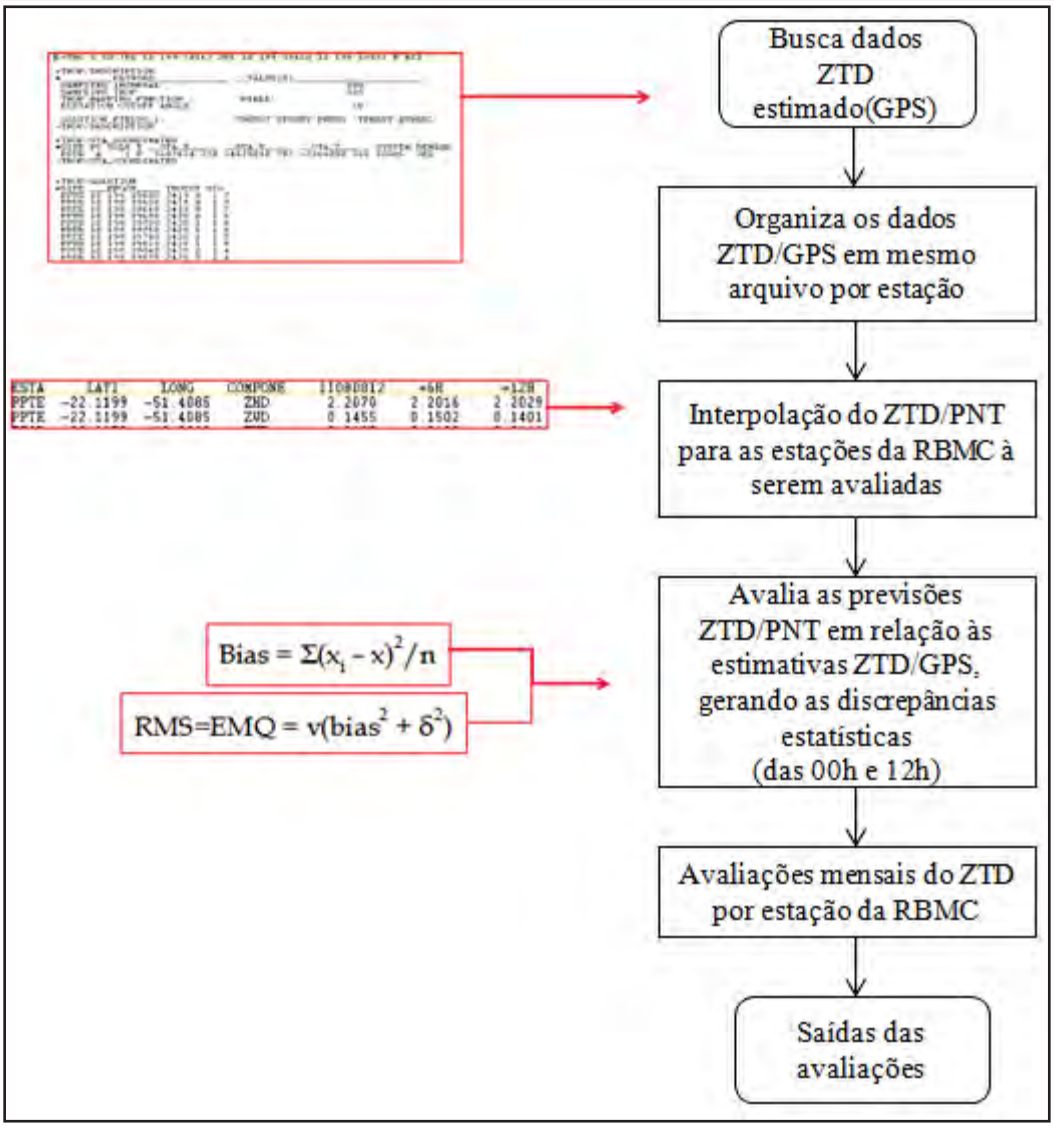


Figura 15: Processo de avaliação do ZTD previsto (PNT) em relação ao ZTD estimado (GNSS).

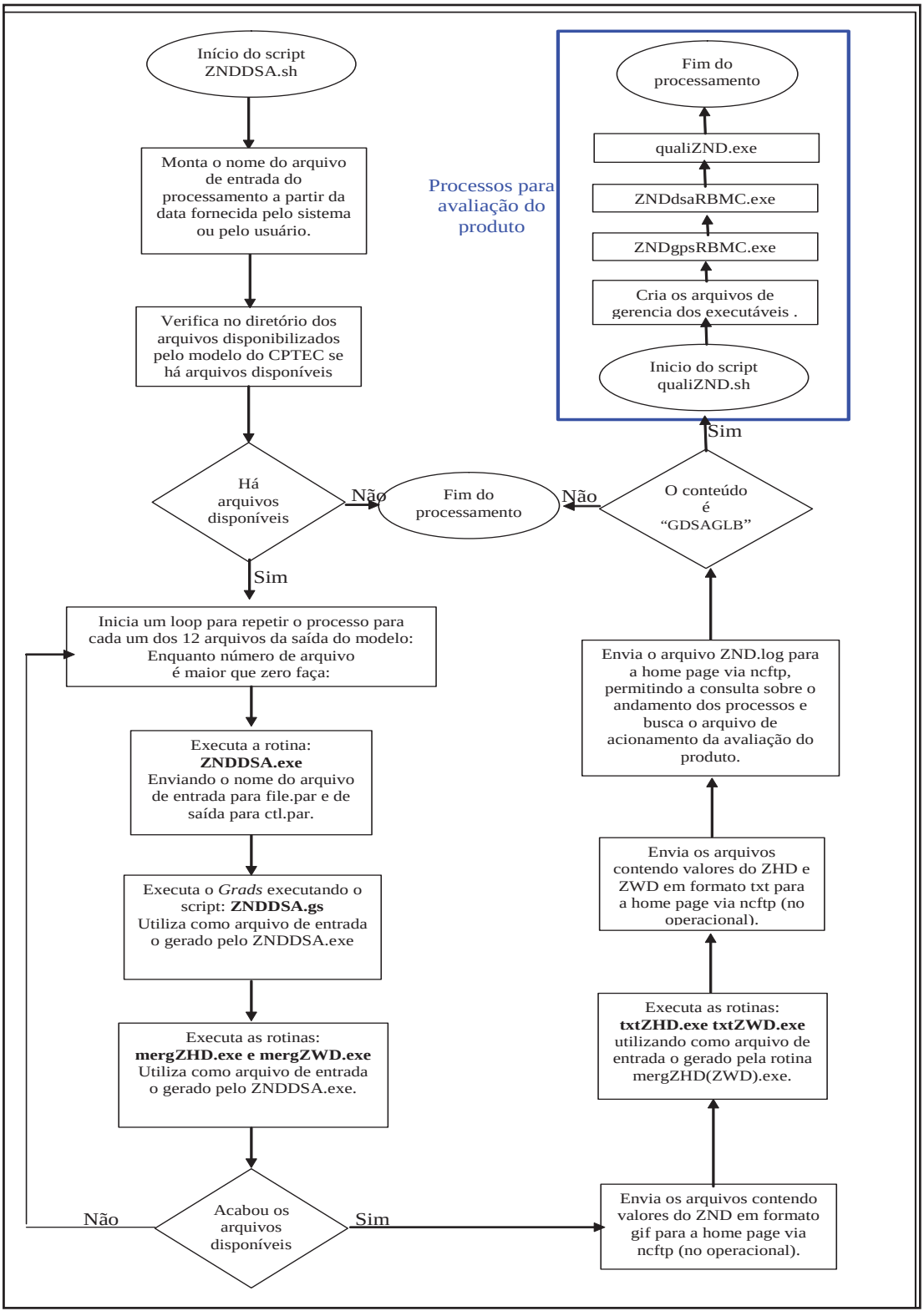


Figura 16: Fluxograma do script para gerar previsões do ZTD para a América do Sul.

3.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar os resultados da previsão do ZTD obtidos pelos diferentes modelos disponíveis, foi realizada a comparação do atraso obtido via modelos de PNT em avaliação (ZTD previsto) e as estimativas do ZTD via processamento de dados GNSS utilizando o software GOA-II (valores de referência) para períodos concomitantes das estações da RBMC. Utilizando-se de dados meteorológicos coletados pelas estações meteorológicas junto aos receptores GNSS da rede GNSS-SP foi possível fazer uma avaliação específica para cada uma das componentes (ZHD e ZWD) com o software GIPSY, uma vez que com dados de pressão, temperatura e umidade, é possível obter ZWD a partir da diferença do ZTD com ZHD. Detalhes da metodologia são apresentados nessa seção.

3.3.1 Estimativa do ZTD GOA - II

O software GOA-II foi desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e é utilizado para vários tipos de processamento, tais como dados GPS, SLR (*Satellite Laser Range*) e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*). Os dados de entrada GPS estão no formato RINEX (*Receiver Indenpedent Exchange format*). O Laboratório de Geodésia Espacial (LGE) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT-UNESP) possui a licença desse software desde 1998, a partir de um acordo de cooperação com o JPL.

O GOA-II pode ser considerado como um dos programas que representa o estado da arte em processamentos de dados GPS. Esse software proporciona posicionamento por ponto de alta precisão (PPP), onde são utilizadas as duas observáveis que devem estar disponíveis nas duas portadoras, e pode se utilizar efemérides precisas juntamente com as correções dos relógios (receptor e satélite), sendo processada uma estação de cada vez. Com os dados de dupla frequência é possível reduzir os efeitos da ionosfera a partir do uso de combinação linear apropriada.

As estimativas do ZTD utilizando GOA-II são obtidas através do PPP estimando-o como um parâmetro juntamente na equação das observáveis, o qual apresenta alta qualidade, podendo se ter o posicionamento em tempo quase real (*NRT - Near Real Time).*

Na figura 17 pode se observar uma análise temporal das discrepâncias dos dados da estação ALAC da rede européia EUREF (*EUropean REFerence Permanent Network*) (figura 18) nos dias entre 058 e 063 de 2012, onde foi utilizado o software GOA-II, no método de processamento GNSS PPP realizado no LGE/FCT. Os mesmos dados obtidos, dos centros de processamentos ASI (*Agenzia Spatiale Italiana*), IGE na Espanha (*Instituto Geografico Nacional*) e IGN na França (*Institut Géographique National*) são também apresentados nessa figura. Pode-se observar a alta correlação do resultado do processamento realizado no centro europeu em relação aos processados no LGE (LGExASI, LGExIGN e LGExIGE), o que mostra a qualidade ZTD obtido pelo processamento com o GOA-II.

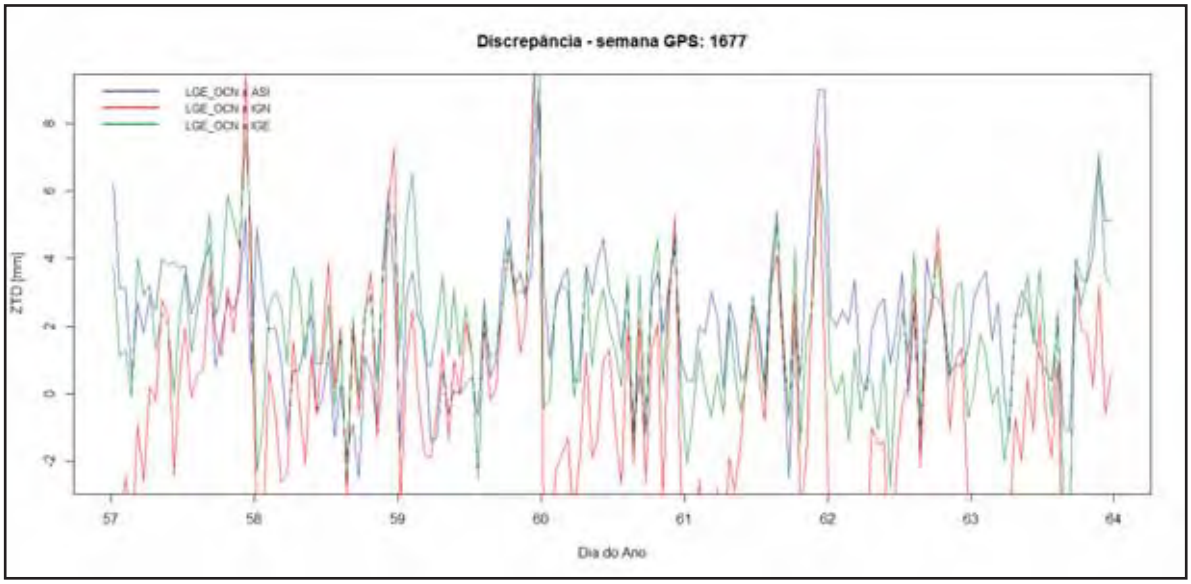


Figura 17: Avaliação dos dados obtidos no LGE em relação aos centros europeus.
Fonte: Dissertação em andamento Roffato, 2012.

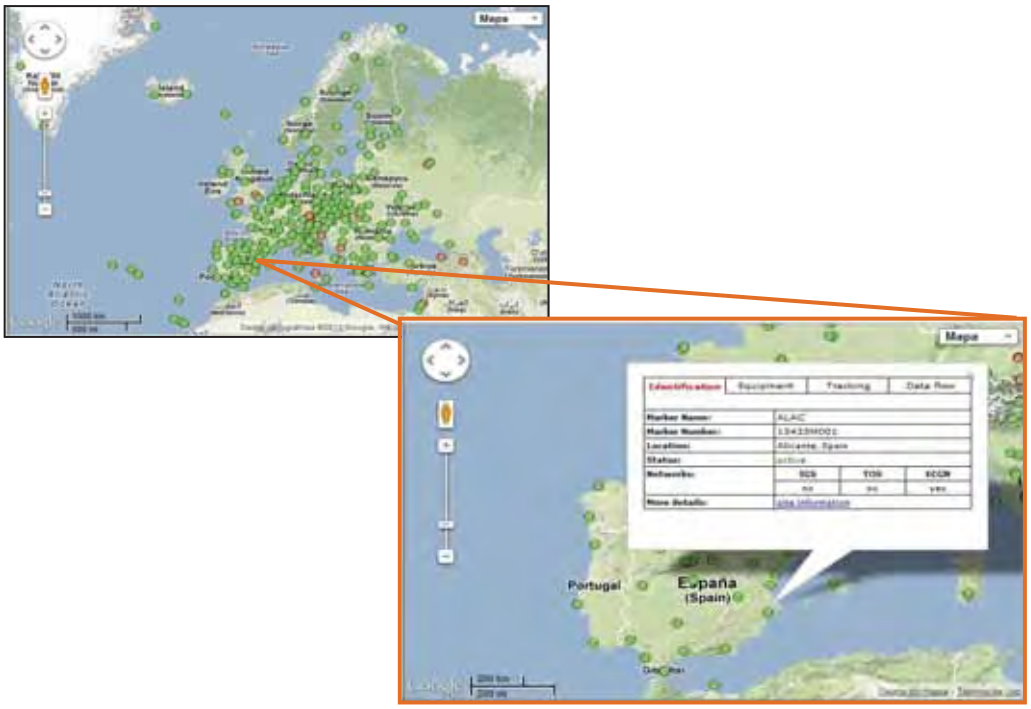


Figura 18: Localização da estação ALAC.
Fonte: http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php. Acesso em 03/01/2013.

Na figura 19 podem são apresentados o ZTD previsto obtido pelos modelos de PNT em função dos valores obtidos pelos dados de radiossondas. Também são apresentados os valores do ZTD estimado, onde será possível avaliar a qualidade dos valores estimados (utilizados nesse trabalho como referência) e os dados de radiossondas.

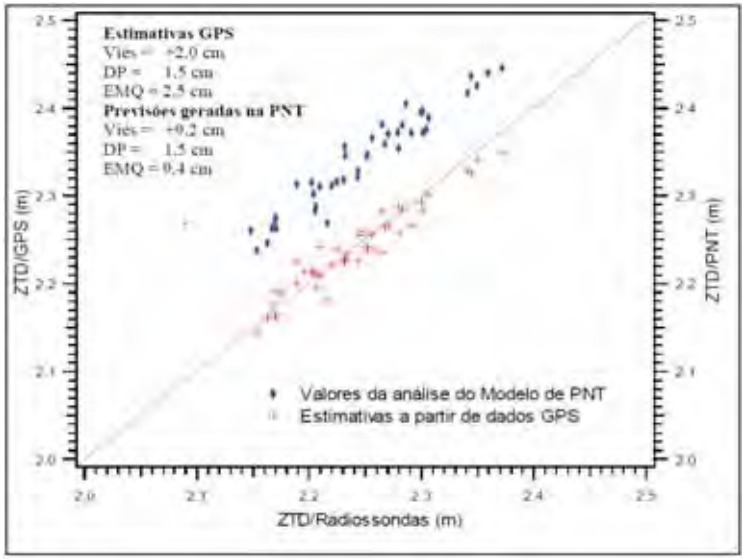


Figura 19: Comparação dos valores ZTD obtidos pelo modelo de PNT e os obtidos através do processamento dos dados GPS com os obtidos a partir de radiossondas.
Fonte: SAPUCCI, 2005.

Como pode ser observado os valores obtidos via GPS apresenta concordância com os gerados a partir de radiossondas, o que representa a qualidade desses dados e mostra que são adequados para avaliar a qualidade do ZTD obtido através da PNT o ZTD/PNT.

O que também pode ser observado é o efeito sistemático nas previsões do ZTD, pois embora o desvio padrão tanto do ZTD previsto quanto das estimativas GPS em relação aos dados de radiossondas serem ambos de 1,5 cm, o viés se apresenta discrepante em 7,2 cm (viés ZTD/GPS de 2,0cm, e viés ZTD/PNT de 9,2 cm). A possível causa desse efeito sistemático na estação em Curitiba pode estar associado ao fato dela estar situada em região montanhosa. Uma vez que a resolução do modelo PNT utilizado nesses resultados é de 100 km, e devida a essa baixa resolução o modelo pode não ser capaz de modelar de forma adequada essa variação no relevo (SAPUCCI, 2005).

Os valores estimados do atraso neutrosférico do GNSS obtidos através do processamento de dados com o GOA-II, e disponível na FCT/UNESP são usados nesse trabalho como referência.

Através da obtenção do ZTD foi estimada a componente úmida e calculada a componente seca (equação 19). Com os dados de pressão, temperatura e umidade (arquivos extensão ".m") obtidos pelas estações meteorológicas pode-se obter o ZHD pela equação 20, e o ZTD estimado a partir da diferença dessas duas variáveis é possível obter o ZWD.

3.3.2 Período de dados e estações GNSS utilizados na avaliação

O período dos dados utilizados será os meses de janeiro (verão), abril (outono), julho (inverno) e outubro (primavera) dos anos de 2010, 2011 e 2012, onde tem-se as quatro estações do ano e a variação de umidade e temperatura para cada época. Utilizando os mesmos meses para três anos busca-se observar se o mesmo comportamento da variação do atraso neutrosférico pode ser observado nas diferentes estações e se apresentam regularidade ou não nos diferentes anos.

Para a série temporal do Atraso Zenital Neutrosférico Total foram processados e comparados dados no período apresentado na tabela 2, onde buscou-se obter

dados em períodos concomitantes para os quatro modelos utilizados e para os dados estimados pelo GIPSY. Na tabela 3, são apresentados os dados disponíveis e os utilizados em relação aos dados meteorológicos (Gipsy/Met) obtidos pelas estações meteorológicas instaladas próximas as estações GNSS.

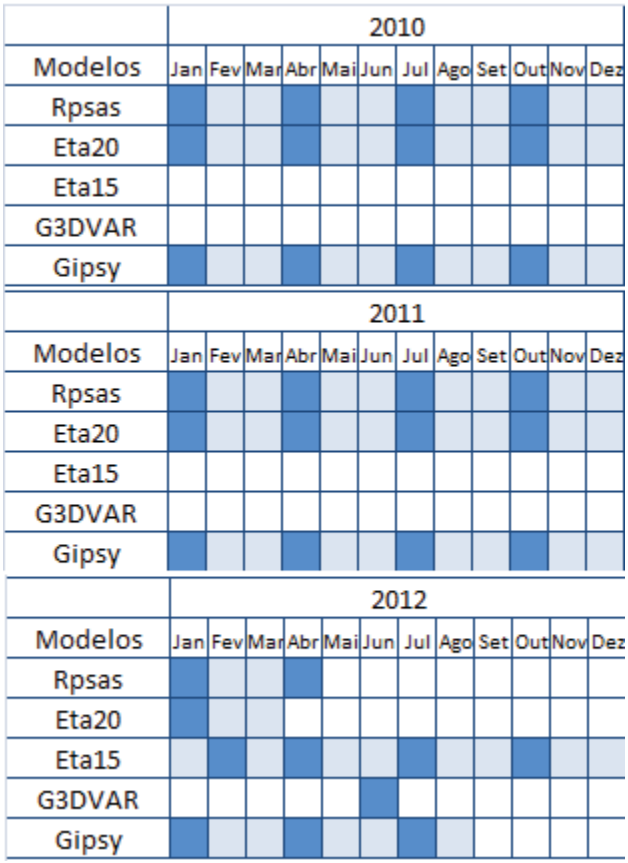


Tabela 2: Apresentação dos dados referente a cada modelo utilizado, classificados através de tons de azul ao branco quanto aos dados que estão disponíveis, os indisponíveis e os dados utilizados, nos anos de 2010, 2011 e 2012.

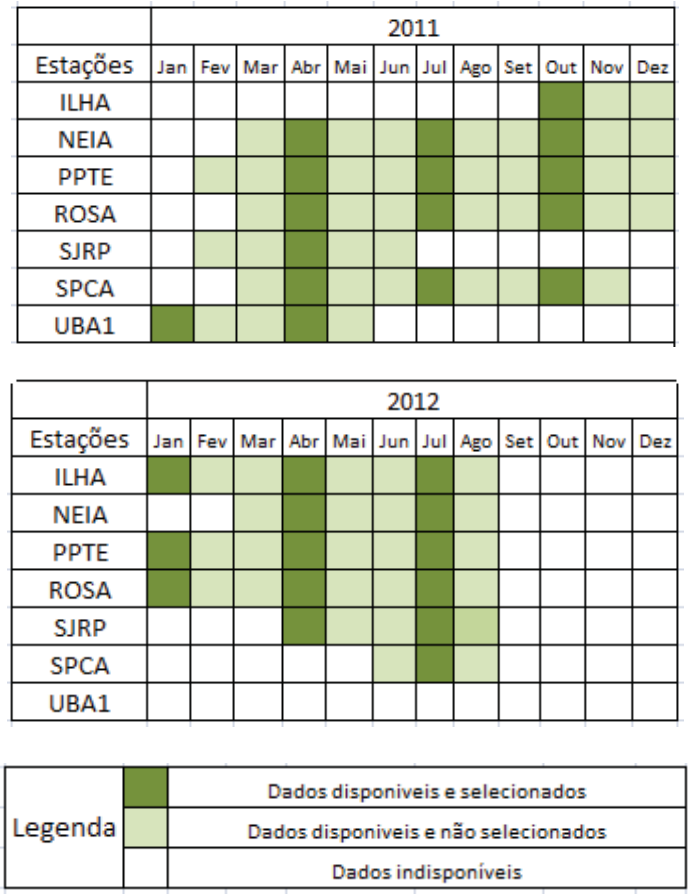


Tabela 3: Apresentação das estações GNSS com dados meteorológicos disponíveis e utilizados classificados através de tons de verde ao branco quanto aos dados que estão disponíveis, os indisponíveis e os dados utilizados, nos anos de 2011 e 2012.

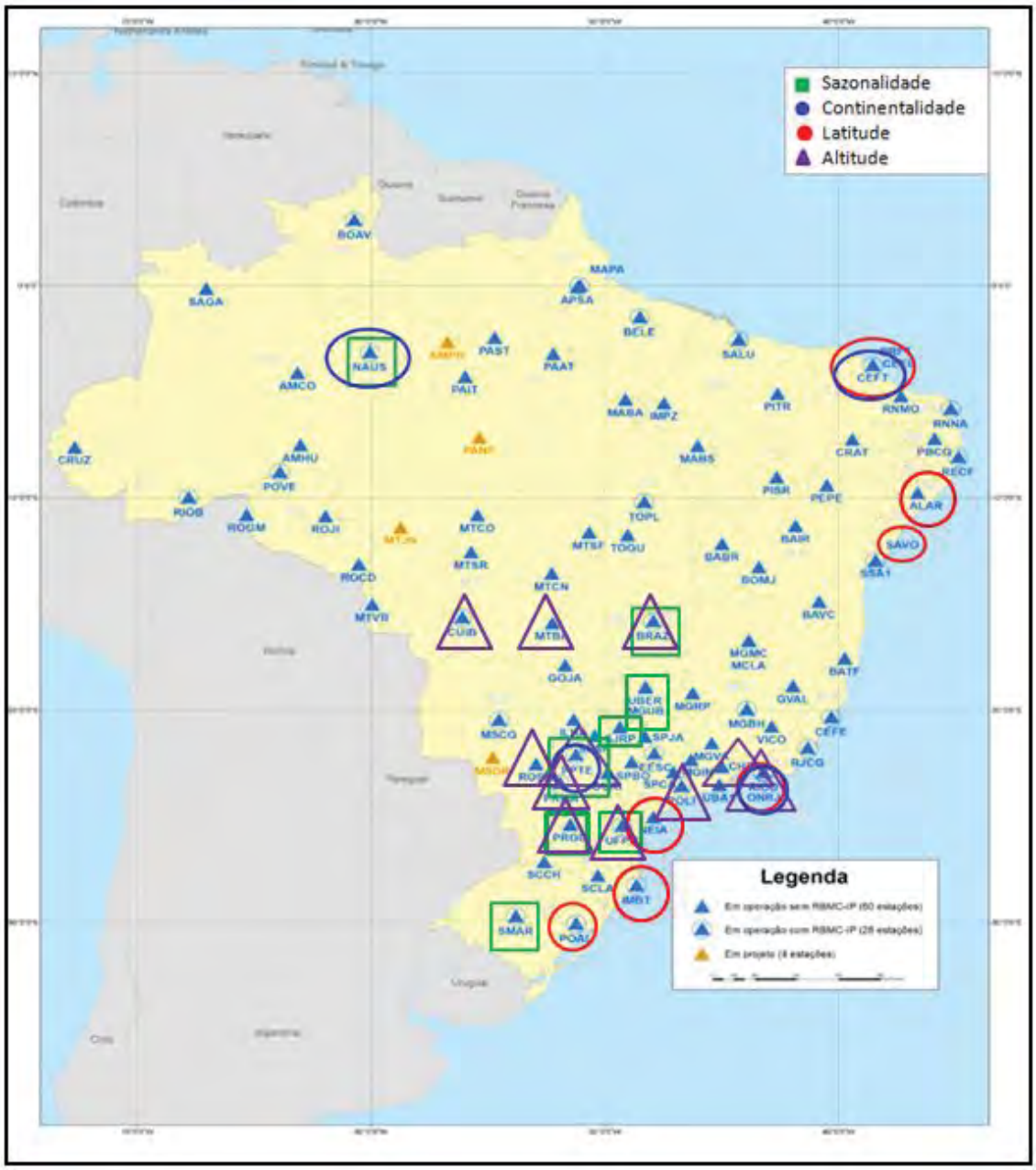


Figura 20: Localização das estações da RBMC.
Fonte: Adaptada de IBGE.

As 77 estações da RBMC utilizadas são apresentadas na figura 20, dentre as 77 estações foram selecionadas algumas para cada tipo de análise. De acordo com a latitude foram selecionadas as estações CEEU, SAVO, RIOD, POAL, que estão a diferentes latitudes sobre a costa do país, em destaque com círculos vermelhos; em relação a sazonalidade foram selecionadas as estações NAUS, BRAZ, PPTE e SMAR que estão localizadas distantes da costa litorânea e regiões climáticas distintas, destacadas em quadrados verdes; as estações selecionadas devido a variação de altitude foram PPTE, CHPI e SMAR (considerado estações com latitudes próximas), em destaque por triângulos roxos.

Na figura 21 é apresentada a rede GNSS-SP (Rede de Monitoramento Contínuo do Estado de São Paulo), em destaque (círculo verde) as estações com dados meteorológicos disponíveis para o período de estudo (períodos apresentados na tabela 3).

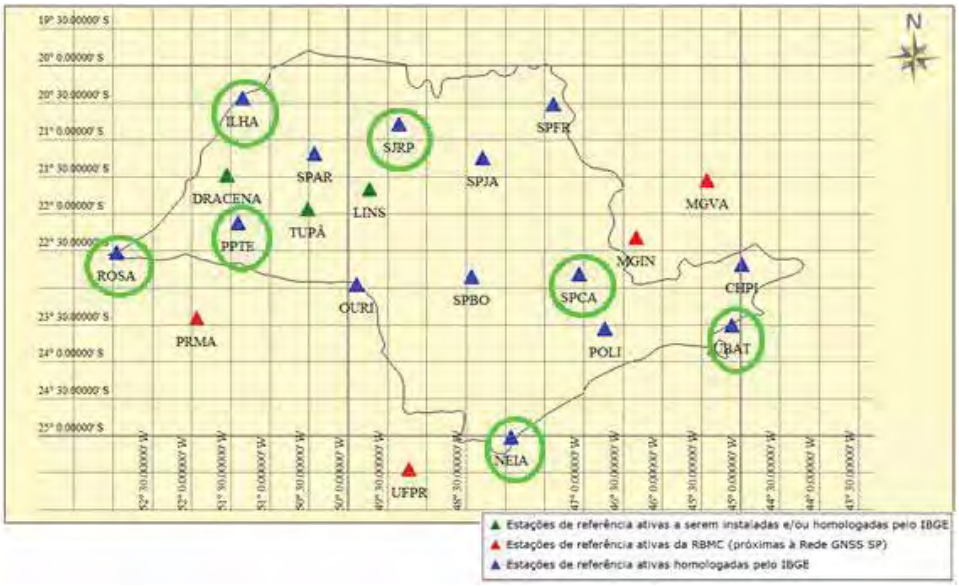


Figura 21: Estações da Rede de Monitoramento Contínuo do Estado de São Paulo (GNSS-SP) disponibilizadas e utilizadas nesse trabalho.
Fonte: http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/ (atualizada em 27/12/2012**).**

3.3.3 Metodologia de avaliação

Para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação foram utilizadas rotinas em MATLAB que calculam as seguintes métricas estatísticas:

- O viés (erro médio) mostra a tendência do valor previsto em relação ao valor tomado como referência (ZTD estimado), e é obtido pela expressão:

$$\text{vies} = \frac{\sum(x_i^p - x_i^e)}{n} \quad 31$$

sendo *x* os valores do ZTD, o índice *i* referente ao dia do processamento, o índice *p* do ZTD previsto e o índice *e* do ZTD estimado (considerado como verdadeiro);

- O desvio padrão que é dispersão em relação ao valor médio da amostra, avalia a dispersão do valor previsto em relação ao valor médio de referência, a precisão dos dados. Dado pela equação 29:

$$\text{DP} = \pm\sqrt{\frac{\sum\left[(x_i^p - x_i^e) - \text{vies}\right]^2}{n-1}} \quad 32$$

- O Erro Médio Quadrático (*RMS - Root Mean Square*) torna mais claro os resultados obtidos, mostra a acurácia de tais resultados se considerado a referência como valor correto. A equação é expressa por:

$$\text{EMQ} = \sqrt{\frac{\sum\left[x_i^p - x_i^e\right]^2}{n}} \quad 33$$

Essas estatísticas são calculadas para todos os modelos em avaliação, levando em consideração os seguintes aspectos:

- Avaliação para todo o período e todas as estações GNSS, buscando uma avaliação geral sobre a região e ao longo de cada um dos três anos;
- Avaliação ao considerar a sazonalidade, considerando dados do ZTD para todas as estações por mês para os três anos;
- Avaliação dos modelos levando em consideração latitude diferentes são as estações: POAL, RIOD, SAVO e CEEU (figura 21), onde foram selecionadas estações com altitudes de valores próximos, que pode ser observado na Figura 24, sendo as estações selecionadas as estações POAL e SAGA (altitude ~ 90 m) e as estações CRAT e PPTE (altitude ~ 440m);
- Avaliação dos modelos levando em consideração diferentes altitudes (Figura 24), e considerando a latitudes com valores aproximados. Na Figura 24, pode-se observar em destaque as estações CHPI e CEFE (~ -21 º em latitude), e BRAZ e CUIB (-16 º em latitude);
- Avaliação dos modelos levando em consideração a continentalidade das estações GNSS, ou seja, avaliação das estações que sejam próximas, porém que estejam em disposições diferentes no continente (estações dentro do continente e no litoral). As estações foram avaliadas seguindo o fato de terem latitude aproximadas, mas estarem dentro do continente e a outra no litoral (respectivamente para as demais), PPTE e RIOD (~ -23 º de latitude), SMAR e POAL (~ -30 º de latitude), NAUS e CEEU (~ -4 º em latitude);
- Avaliação dos modelos nas diferentes componentes do ZTD, com a disponibilidade dos dados de pressão é possível avaliar as componentes separadamente (ZWD e ZHD). Mas para essa etapa de avaliação o número de estações será menor (como pode ser observado nas tabelas de 2 a 4). Nessa avaliação geral foi considerado primeiramente, todo o período e todas as estações disponíveis, depois uma avaliação por estação mensal. E então por estação e por mês;
- Avaliação do impacto da melhoria na resolução temporal das previsões. O modelo operacional Eta15 tem uma resolução temporal de até 3 horas o que proporciona realizar a avaliação temporal em relação às saídas dos modelos anteriores que eram de 6 horas. Nessa avaliação foi utilizada a técnica de spline cúbica utilizada para se obter uma interpolação de previsões de cada 5 minutos (saídas do ZTD estimado) dos valores de previsão com saídas de 3 horas;

- ✓ Inicialmente uma avaliação considerando a spline por dia para as saídas de 3 e 6 horas e saída do valor estimado, para as componentes ZHD e ZWD;
- ✓ Análise estatística em relação ao valor de referência para as previsões de 3 horas, e outra para as previsões de 6 horas;
- ✓ A spline considerando somente o dia da previsão e outra considerando o dia anterior e o próprio dia para se avaliar o impacto da influência das medidas anteriores nas do dia da previsão.

- Avaliação do modelo G3DVar considerando o período de dados de teste para o mês de junho de 2012. A primeira avaliação foi em relação ao mês e todas as estações, depois em relação a cada estação por mês. Outra avaliação em relação às componentes hidrostática e úmida, por estação ao longo do mês.

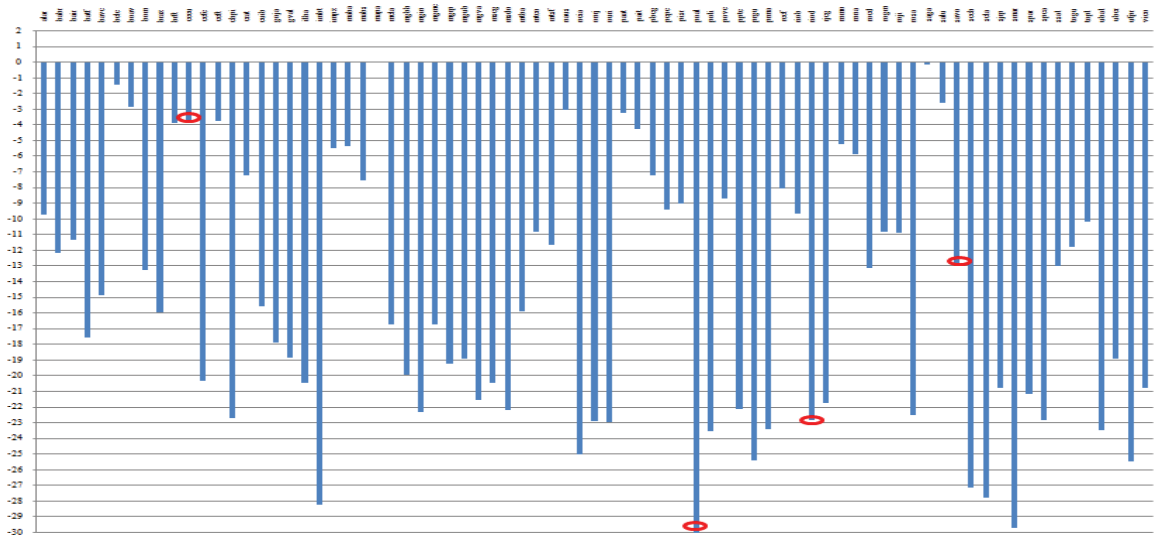


Figura 22: Gráfico das latitudes das estações utilizadas.

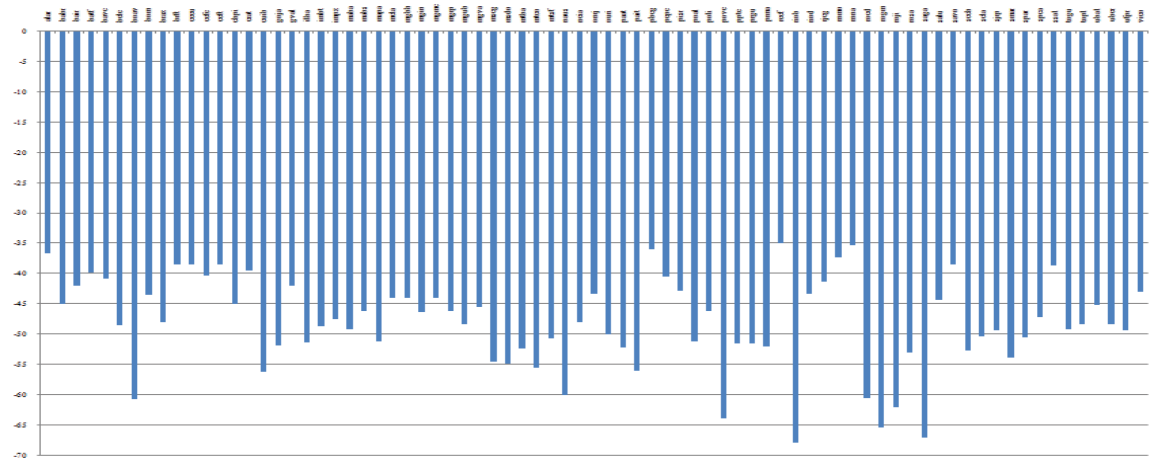


Figura 23: Gráfico das longitudes das estações utilizadas.

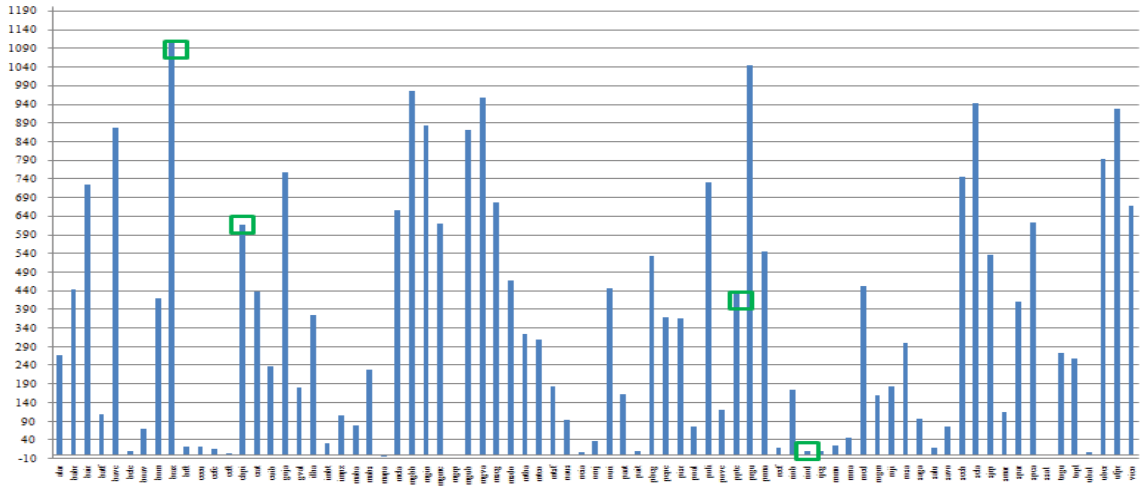


Figura 24: Gráfico das altitudes em metros das estações utilizadas.

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente serão apresentadas as séries temporais da estação BRAZ, com o intuito de mostrar as variações médias do ZTD para essa estação ao longo dos anos de 2010, 2011 e 2012. A avaliação dos resultados inicialmente apresenta uma análise geral, para as demais 77 estações da RBMC os gráficos são apresentados no Apêndice I. Depois dessa avaliação será direcionado um detalhamento maior dos resultados em relação ao período de avaliação e de acordo com as estações individualmente. Considerando a sazonalidade, a variação das altitudes, e latitudes das estações, como também em relação à localização dessas sobre regiões litorâneas ou continentais.

Essa análise será também em torno da resolução espacial e temporal para os modelos já citados no item 3.1. Toda essa avaliação será em relação ao viés, ao RMS e ao Desvio Padrão, e serão avaliadas as previsões da 00 hora considerando que estará disponível ao usuário a partir de no máximo às 09 horas UTC.

4.1 SÉRIES TEMPORAIS PARA OS DIFERENTES MODELOS AVALIADOS

As séries temporais apresentam a variação do atraso neutrosférico na componente total (ZTD) que é apresentado em metros ao longo de cada ano para a estação BRAZ, selecionada aleatoriamente, para que não houvesse uma extensão nesse item as demais estações são apresentadas no Apêndice I.

Nas figuras 25, 26 e 27 observa-se que os valores estimados do ZTD pelos modelos Eta20 e Eta15 ficam em torno de 2,25 m, enquanto que o modelo RPSAS apresenta valores em torno de 2,1 m, o que mostra uma tendência desse último à subestimar o ZTD em relação aos demais modelos.

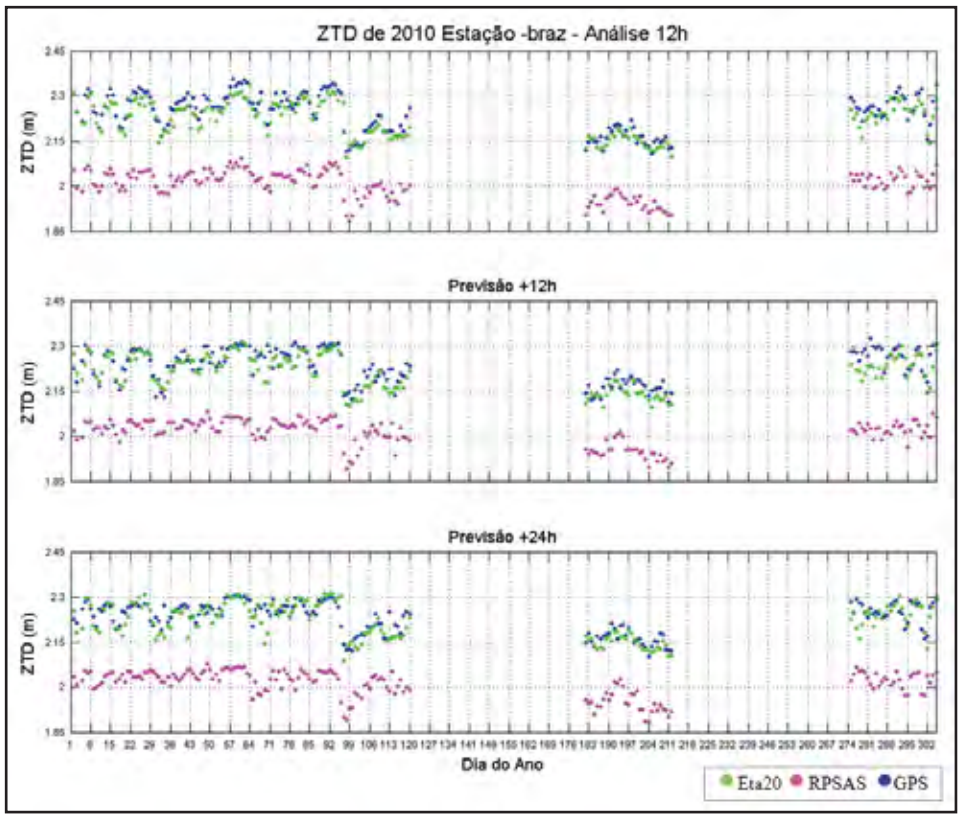


Figura 25: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2010.

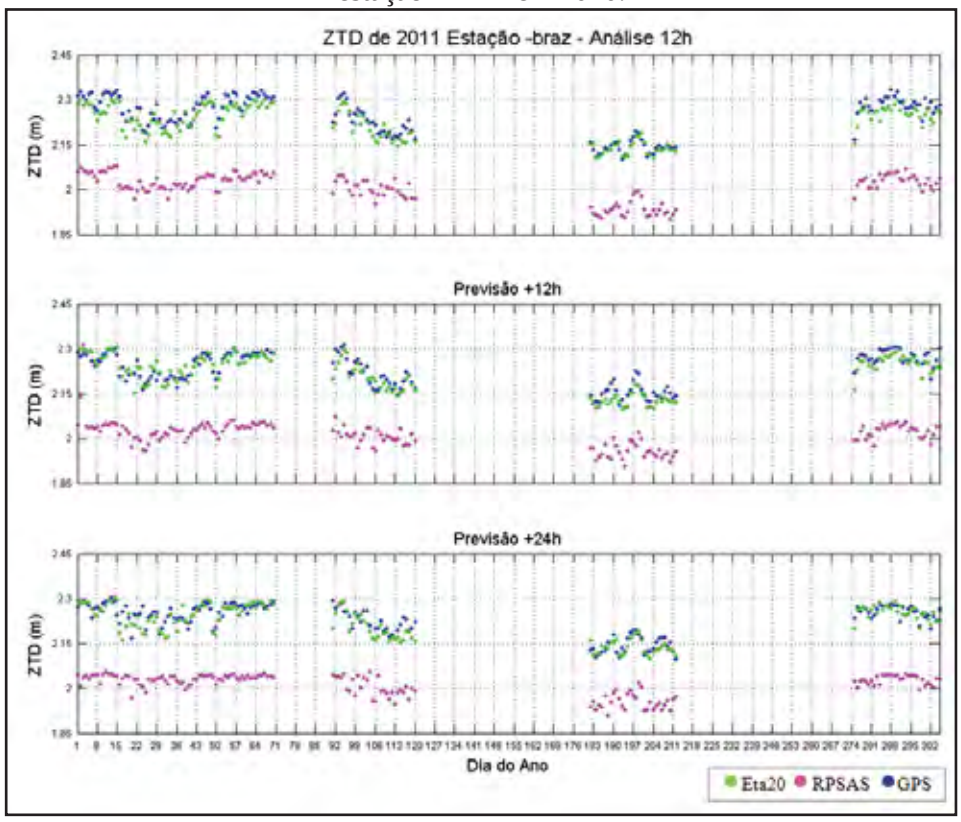


Figura 26: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2011.

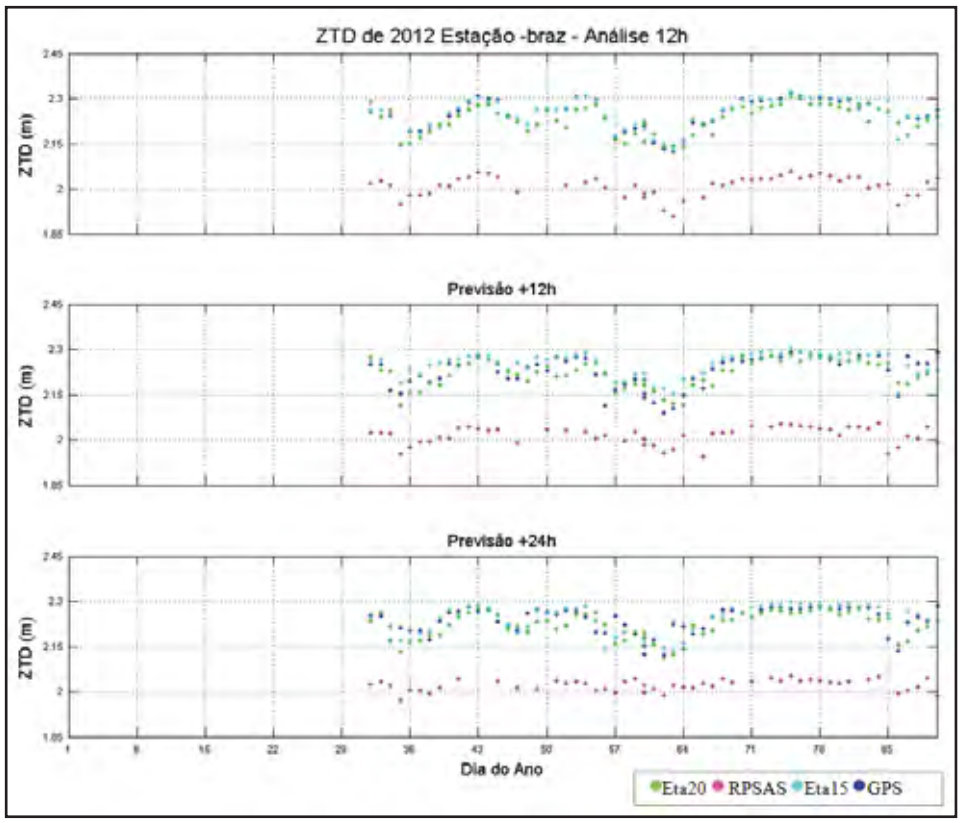


Figura 27: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em 2012.

As séries temporais anuais apresentam pouco detalhamento e variação do ZTD, por se tratar de longos períodos. Por essa razão uma análise mensal foi desenvolvida considerando o mês de Fevereiro dos anos de 2010, 2011 e 2012. Dentre as 77 estações foram selecionadas as estações que apresentaram o maior valor (NAUS) e o menor (BRAZ) em relação ao ZTD.

Na estação BRAZ em janeiro de 2010 as previsões variam em 2,3 e 2,25 aproximadamente sendo que o Eta20 se aproxima mais do valor estimado, o ZTD previsto pelo RPSAS está abaixo dessa referência em 25 centímetros, o que se mantém nos três anos (nas figuras 28,29 e 30). As linhas contínuas que ocorrem fora da curva da variação do ZTD são perda de dados que ocorreram nesses dias.

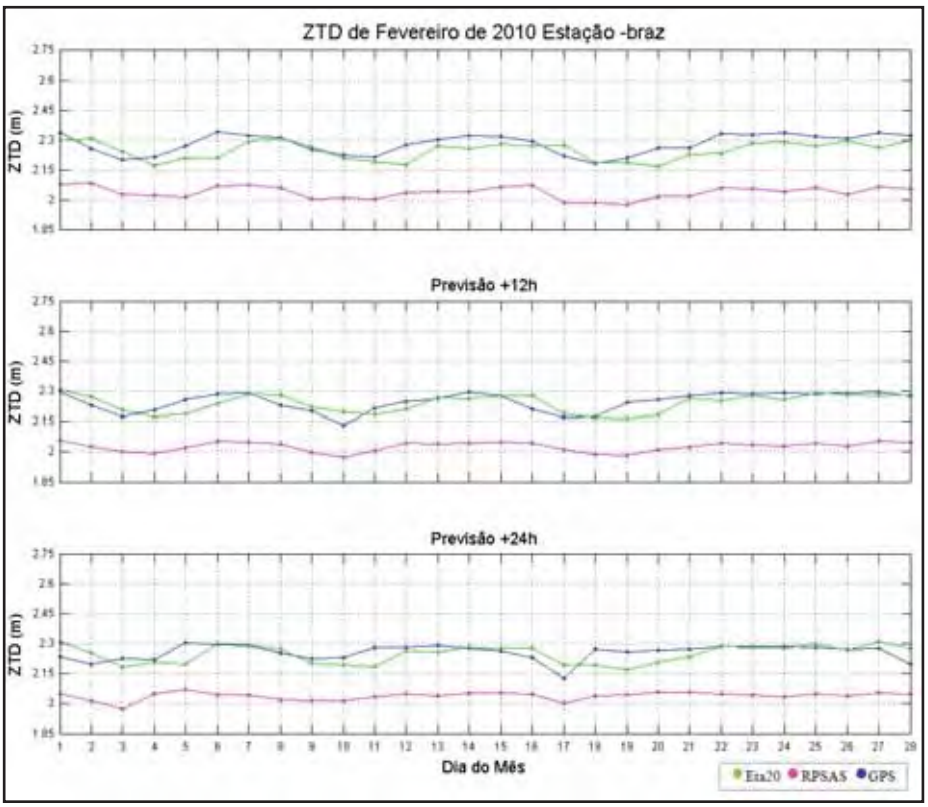


Figura 28: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Fevereiro de 2010.

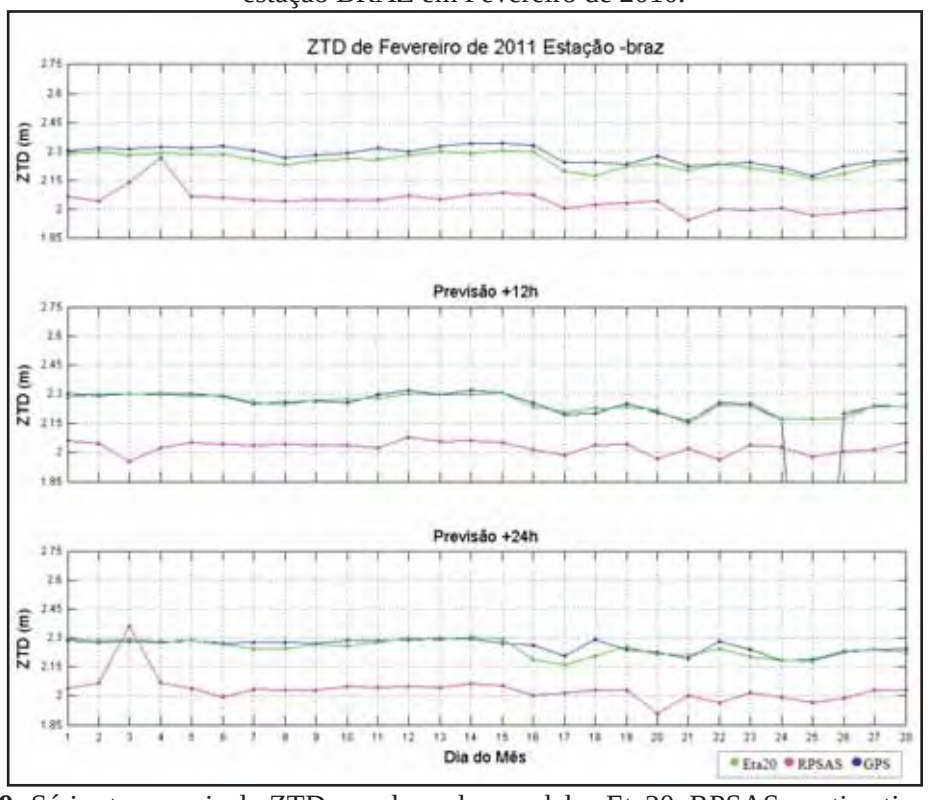


Figura 29: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Janeiro de 2011.

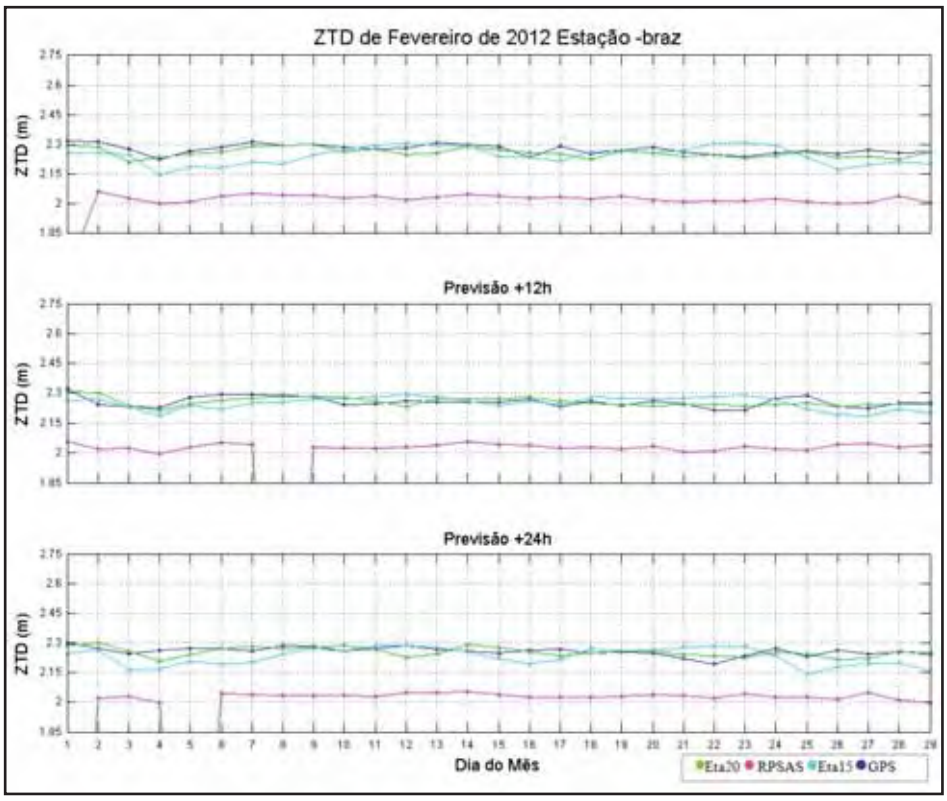


Figura 30: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação BRAZ em Fevereiro de 2012.

A estação NAUS apresenta ZTD de 2,7 a 2,75 metros valor médio para os três anos, esse alto valor pode ser devido sua localização na cidade de Manaus, região da floresta Amazônica considerada úmida, (figuras 31, 32 e 33). Sendo que os modelos de previsão, Eta20 e Eta15, estão muito próximos do valor previsto, e o RPSAS que não apresentou bom desempenho em relação à estação BRAZ, na estação NAUS apresenta-se próximo do valor de referência.

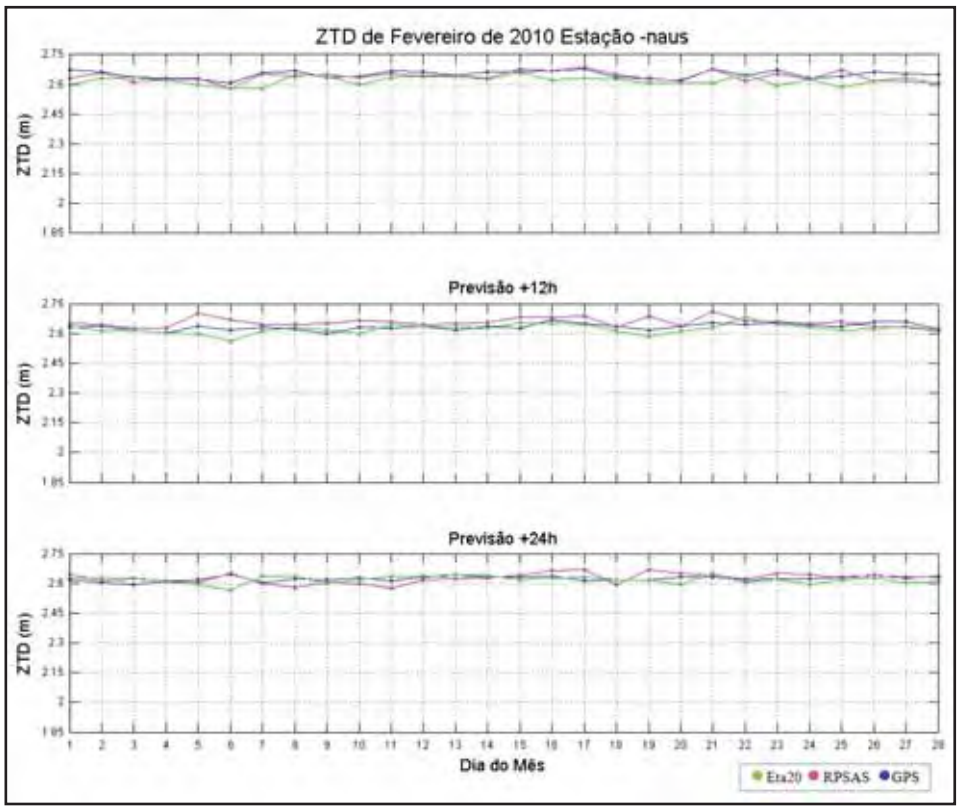


Figura 31: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Janeiro de 2010.

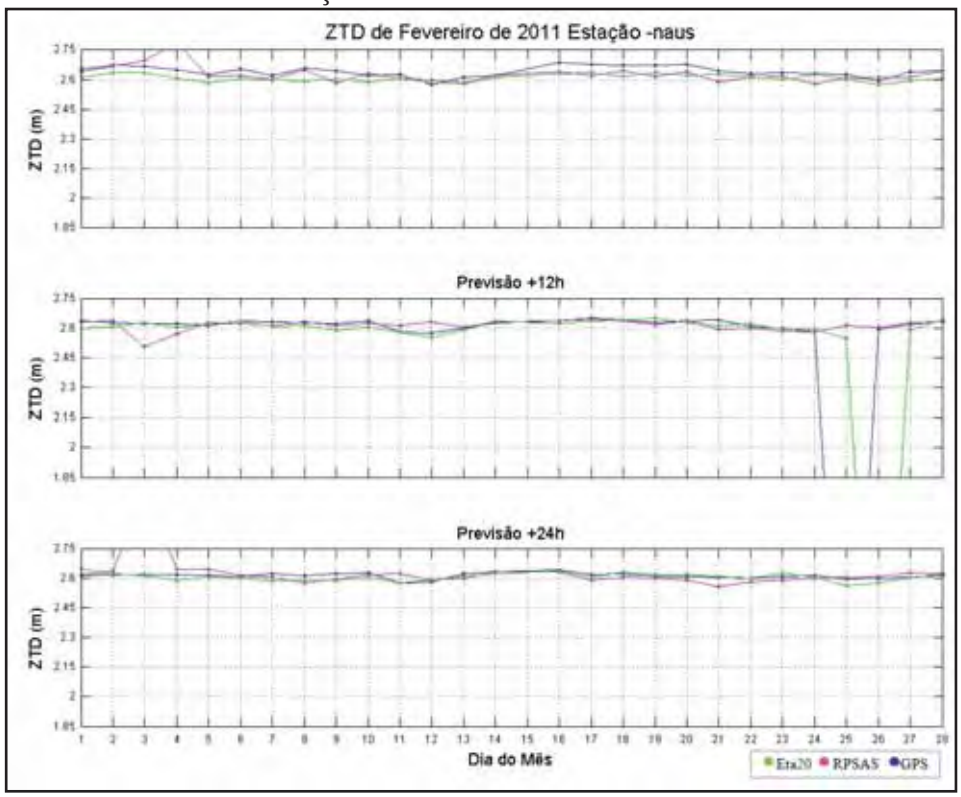


Figura 32: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Janeiro de 2011.

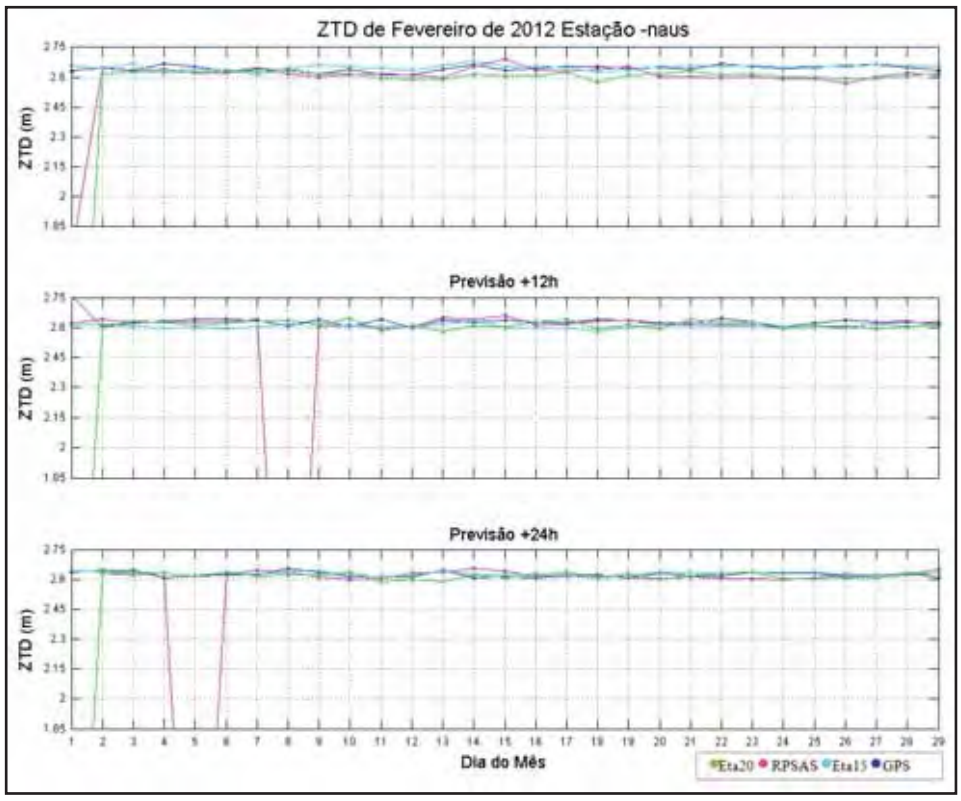


Figura 33: Séries temporais do ZTD geradas pelos modelos Eta15, Eta20, RPSAS e estimativas GPS da estação NAUS em Fevereiro de 2012.

Com um período mais curto de dados foi possível visualizar a variação de forma mais minuciosa. O diferente comportamento do ZTD para os diversos modelos pode ser devido à variação da localidade das estações como também ao período do ano a que se referem. Por isso avaliações buscando determinar as características dessas variações são apresentadas nas próximas seções.

4.2 AVALIAÇÃO ANUAL E MENSAL DO ZTD CONSIDERANDO TODAS AS ESTAÇÕES

Para uma análise geral da qualidade do ZTD foram utilizadas todas as estações 77 estações da RMBC usadas nessa pesquisa, com dados disponíveis nos períodos de janeiro e fevereiro, abril, julho e outubro dos anos de 2010, 2011 e 2012, considerando os modelos Eta20 e RPSAS para os anos de 2010 e 2011 e o modelo Eta15 operacional em 2012.

A avaliação das previsões do ZTD a partir de cada modelo é apresentada pelo viés, desvio padrão e Erro Médio Quadrático (figura 34). Para essas análises foram utilizados como valor de referência os valores do ZTD estimados utilizando o software Gipsy II.

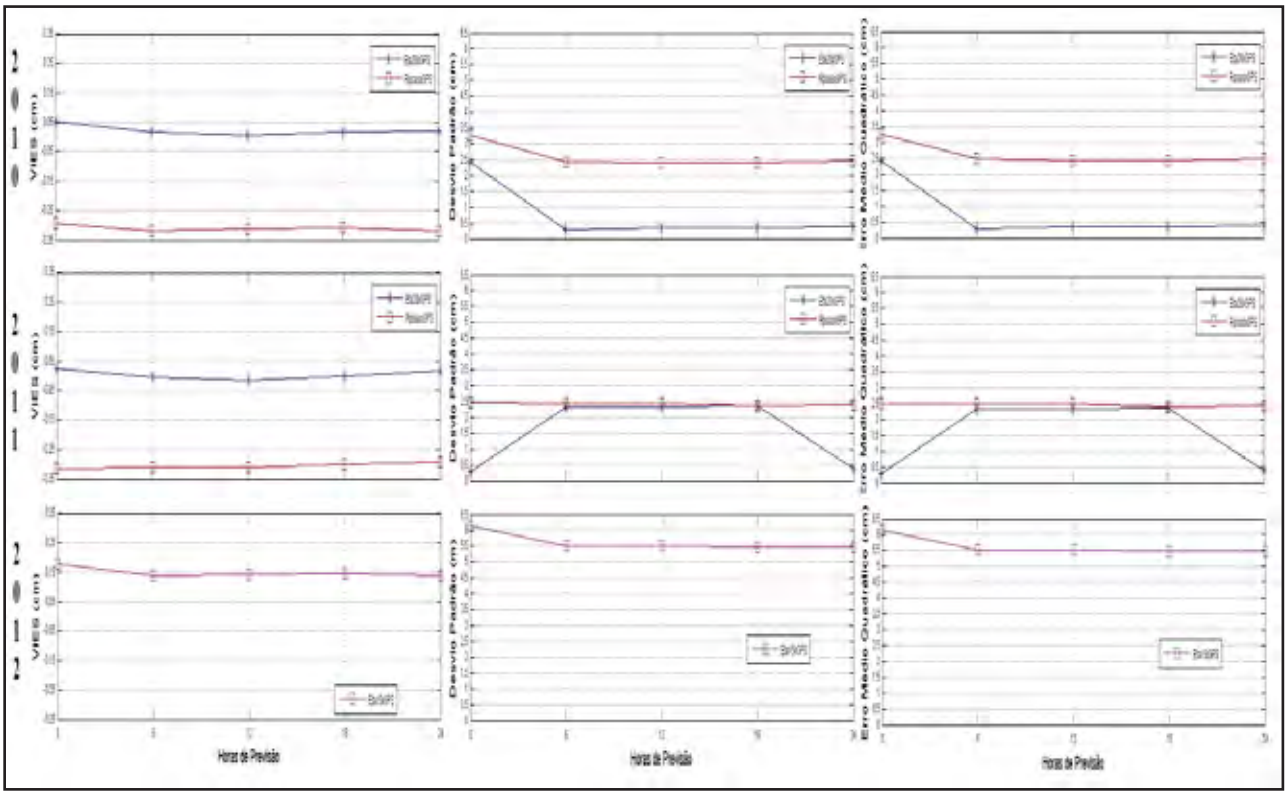


Figura 34: Análise Estatística do ZTD considerando 77 estações e 4 meses dos anos de 2010, 2011 para os modelos Eta20, RPSAS e para 2012 o modelo Eta15 em relação ao ZTD estimado.

O modelo Eta20 apresenta tendência de 0,5 mm, aproximadamente, na primeira hora chegando a 0,1 mm nas demais na análise do ano de 2010, como pode ser visto na figura 34. O modelo RPSAS apresenta 3 mm de tendência negativa (subestima os valores), apresentando-se constante em quase todo o período das horas de previsão, O que se mantêm no ano de 2011.

A partir de 2012 o modelo operacional é o Eta15, embora os modelos Eta20 e RPSAS estivessem ainda em funcionamento os períodos não seriam compatíveis para utilizá-los nessa análise geral, considerando que ambos apresentavam no máximo dois meses concomitantes ao Eta15. O modelo Eta15 apresenta uma tendência de até 2 mm, se mantendo estável em 1,5 mm.

Na avaliação da precisão do ZTD previsto com os modelos de PNT em relação ao estimado pelo Gipsy, pode ser observado que em 2010 o modelo RPSAS apresenta

até 3,5 cm nas primeiras horas e estabiliza em 2,5 cm de precisão. Já o modelo Eta20 de 2,5 cm passa a 0,5 cm.

No ano de 2011, o modelo Eta20 apresenta na primeira e última hora um aumento de 0,5 cm para 2,5 cm, que se mantêm nas demais horas. O modelo RPSAS se apresenta estável em todo o período em 2,5 cm de precisão. Em 2012 o modelo Eta15 apresenta 6 cm de precisão na primeira hora, e nas demais se matem em 5,5 cm.

Na figura 36 são apresentados os valores do EMQ em relação aos três modelos, em 2010 os modelos Eta20 e RPSAS apresentam mesma variação, mas pode ser observado uma diferença de até 2 cm do RPSAS. Sendo que o Eta20 se mantém em 0,5 cm, depois da primeira hora, e o RPSAS em 2,5 cm também apresentando um aumento de qualidade até às 6 horas de integração.

Em 2011 os dois modelos apresentam qualidades muito próximas, em torno de 2,5 cm, a menos da primeira e última hora que o modelo Eta 20 apresenta um aumento de até 2 cm. No ano de 2012 o modelo Eta15 apresenta 6 cm na primeira hora, o que diminui para 5,5 nas demais previsões.

Como avaliação geral aos modelos podemos perceber que o modelo Eta20, em período operacional apresenta qualidade superior ao modelo RPSAS, porém o RPSAS apresenta melhor qualidade nas primeiras horas, diferentemente do Eta20 que apresenta estabilidade nas previsões após 6 horas. O modelo Eta15 apresentou qualidade inferior aos demais modelos quando comparado com os anos anteriores.

Para uma avaliação desse modelo em relação aos demais é apresentada uma análise considerando o mês de Fevereiro de 2012 quando se tem dados dos três modelos. Essa análise considera Viés, Desvio Padrão e EMQ.

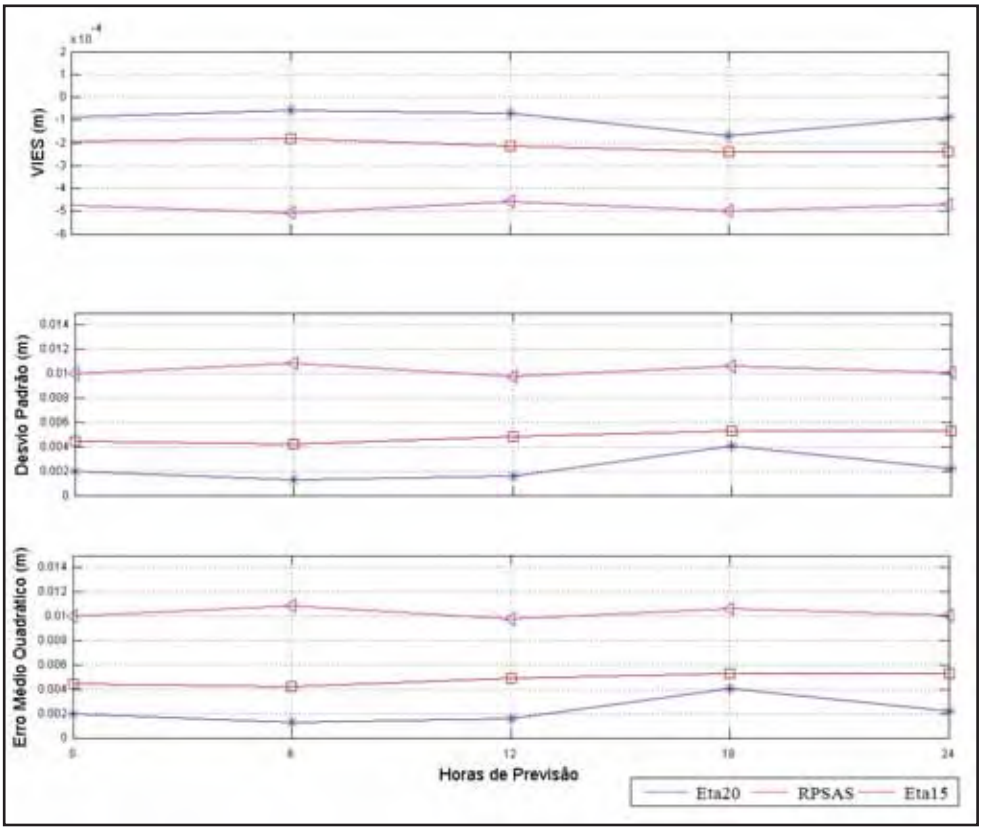


Figura 35: Viés, DP e EMQ do ZTD considerando 77 estações no mês de Fevereiro de 2012 para os modelos Eta20, RPSAS e Eta15.

Essa avaliação é importante para uma avaliação entre os modelos, embora algumas considerações tenham que ser feita: o modelo Eta15 começou a ser testado em Outubro de 2011 e só se tornou operacional após apresentar confiabilidade para previsões de tempo, ou seja, em Fevereiro já estava testada e validada sua qualidade; o modelo Eta20 atuou de forma concomitante ao Eta15 até que esse pudesse ser automatizado, por isso também estava em bom desempenho e controle de qualidade; o modelo RPSAS começou a ser desligado a partir de Dezembro de 2011, onde já não tinha mais um controle de qualidade tão expressivo, em Fevereiro de 2012 foi desligado.

O modelo RPSAS apresenta estabilidade na qualidade das previsões, embora apresente uma subestimação (viés de – 0,5 mm) variando de 0,5 à 0,45 mm. O Eta20 apresenta 0,1 mm (também subestima) variando em até 0,2 mm. O Eta 15 apresenta qualidade próxima ao Eta20, o que já é de se esperar uma vez que esses dois modelo utilizam sistemas de assimilação similares. Avaliando o modelo RPSAS este apresenta valores do EMQ de 1 cm, o modelo Eta15 apresenta EMQ de 0,4 cm e o modelo Eta20 valores variando entre 0,2 cm até 0,4 cm, o que configura o melhor desempenho em relação aos outros modelos.

4.3 ANÁLISE ANUAL E MENSAL DO ZTD POR ESTAÇÃO

A análise da qualidade das previsões do ZTD por estação foi feita considerando os modelos Eta20 e RPSAS, 2010 e 2011, e o modelo Eta15 em 2012. As estações selecionadas foram BRAZ, SMAR e NAUS, as quais apresentaram maior variação nas previsões do ZTD, assim como na qualidade dos modelos.

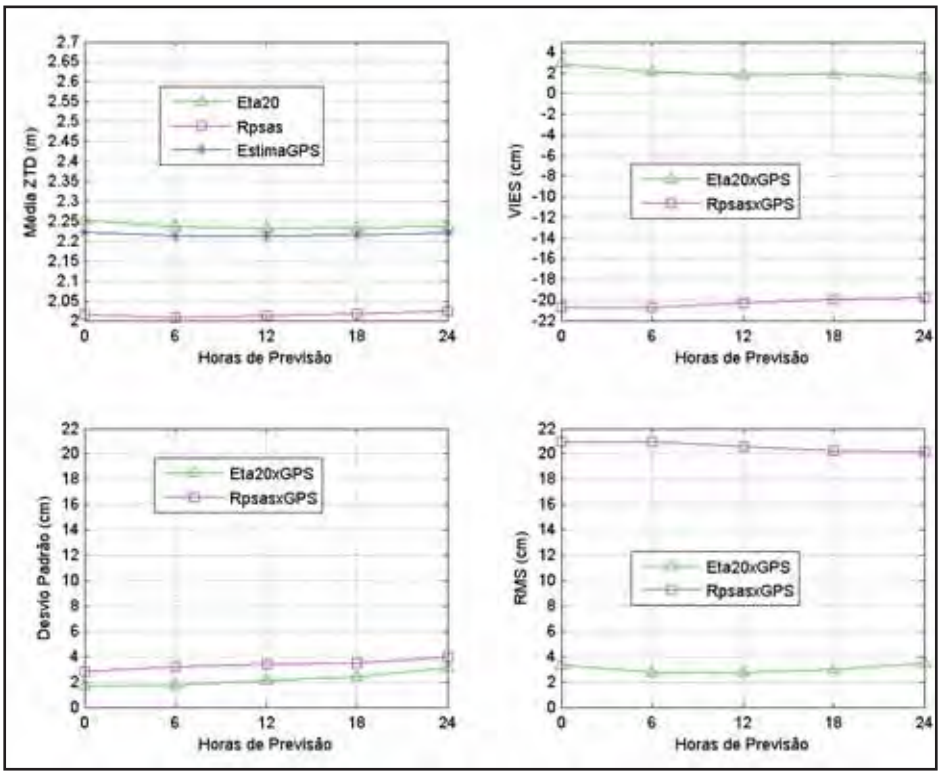


Figura 36: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010 na estação BRAZ.

Na estação BRAZ em 2010, o modelo Eta20 apresenta RMS de 3 cm, aproximadamente, enquanto que o modelo RPSAS apresenta a subestimação na qualidade do ZTD de 21 centímetros, o que já pode ser observado nas séries temporais.

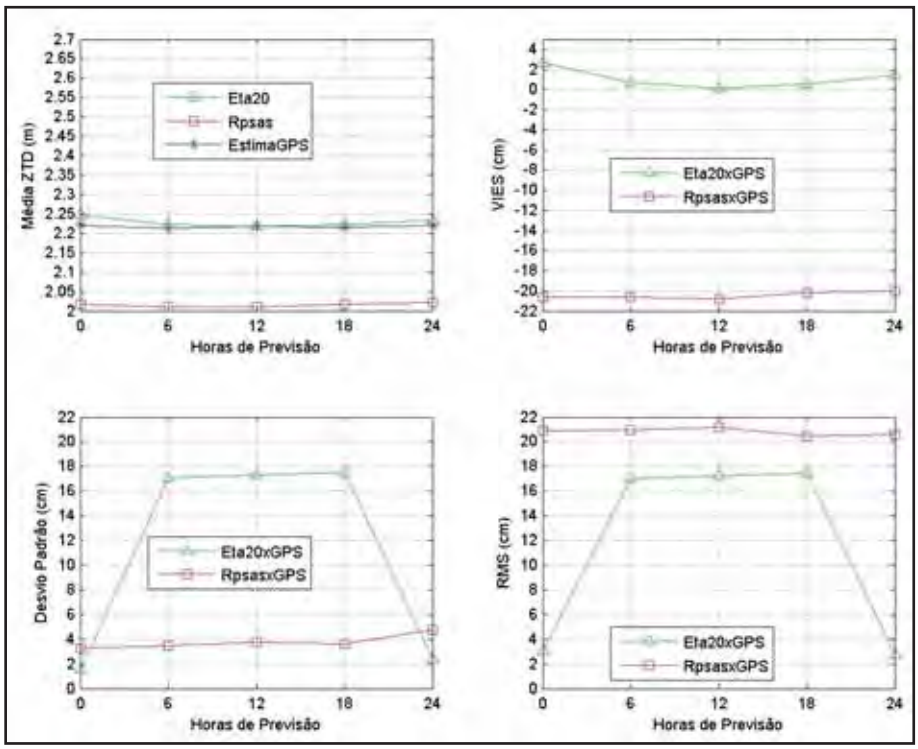


Figura 37: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011, na estação BRAZ.

Analisando a qualidade do modelo RPSAS em 2011 pode se observar a mesma qualidade em relação ao ano anterior, enquanto que o modelo Eta20 apresenta um desempenho pior em relação a 2010, chegando até 18 cm nas previsões das 06h, 12h e 18h.

O modelo Eta15 (figura 38) será avaliado isoladamente uma vez que é o único dos modelos avaliados operacional, no ano de 2012. Nas primeiras 6 horas o modelo apresenta RMS próximo a 4 cm, permanecendo de 3 cm à 3,8 cm, nas últimas horas. Dessa forma observa-se que esse modelo apresenta boa qualidade nas previsões do ZTD.

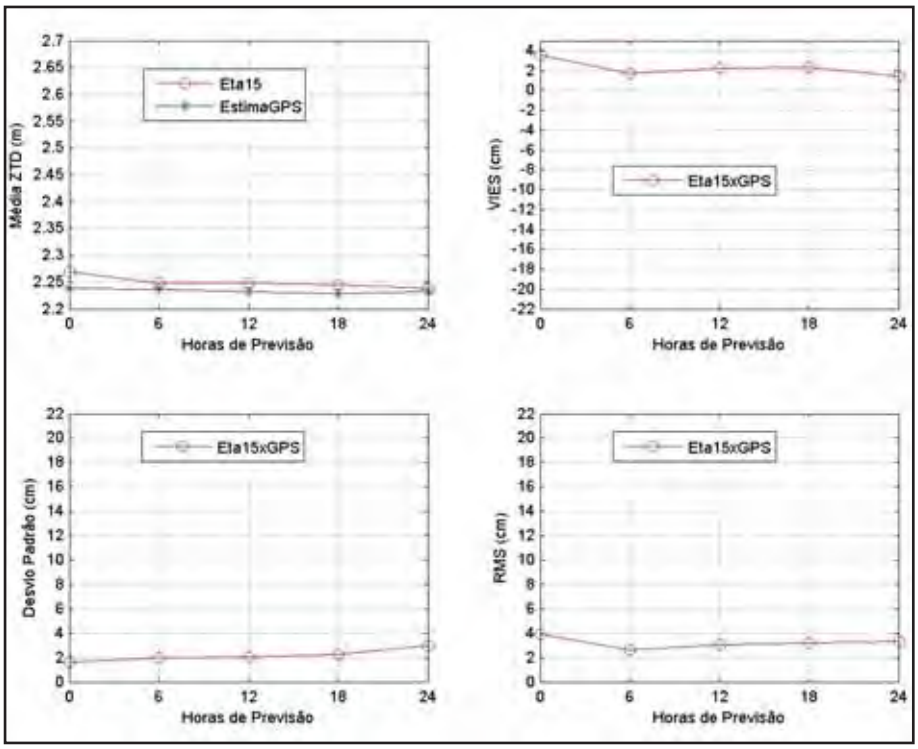


Figura 38: Análise do ZTD utilizando o modelo Eta15 no ano e 2012, na estação BRAZ.

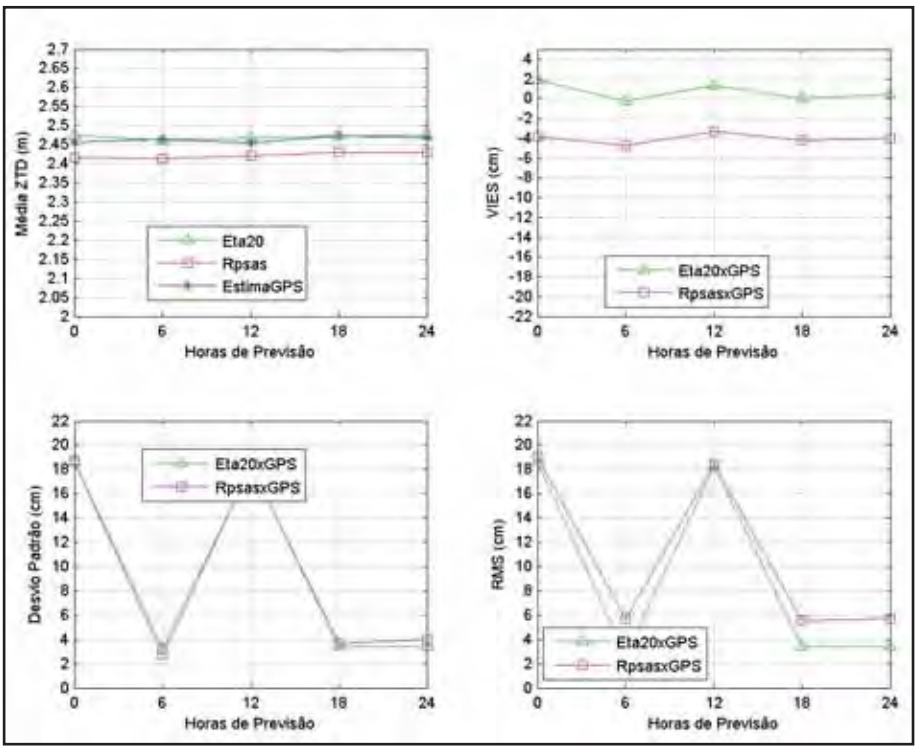


Figura 39: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010, na estação SMAR.

.

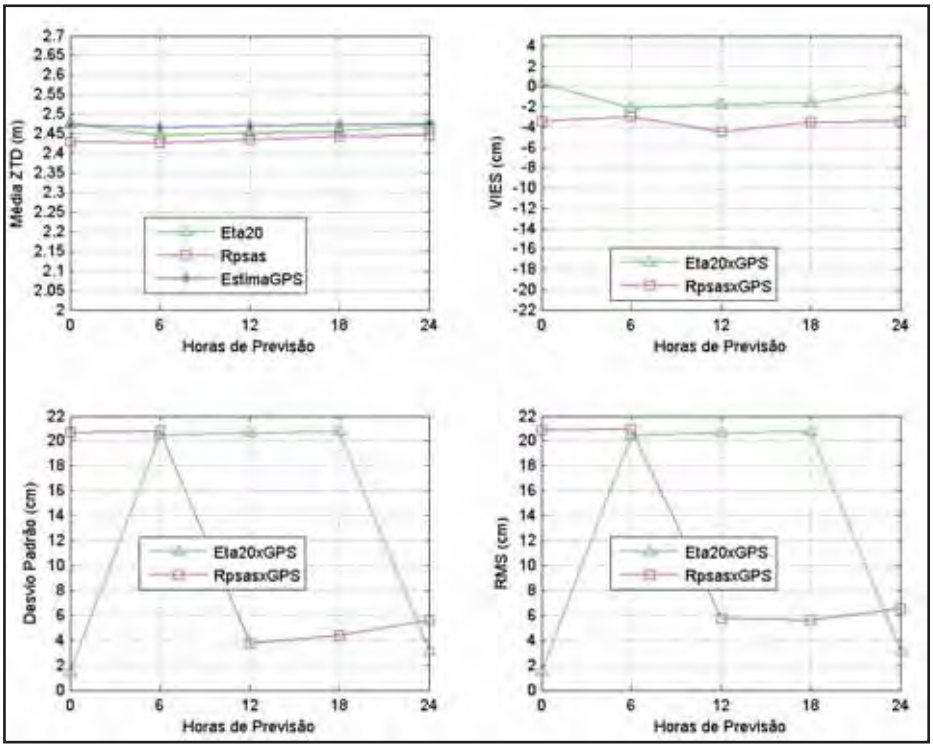


Figura 40: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011, na estação SMAR.

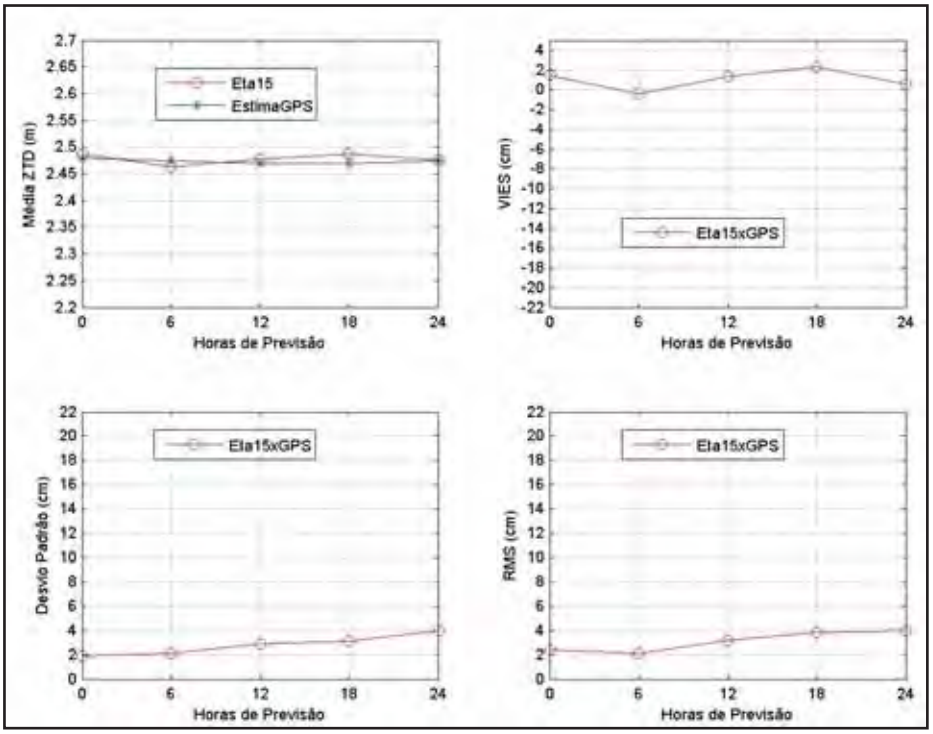


Figura 41: Análise do ZTD utilizando o modelo Eta15 no ano e 2012, na estação SMAR.

Na estação SMAR no ano de 2010 (figura 39) a dispersão do RPSAS em relação ao valor estimado é muito similar ao do modelo Eta20, em torno de 19 centímetros. Em 2011 o modelo RPSAS apresenta uma melhora de 12 centímetros a partir das 6 horas de previsão, enquanto o Eta20 se mantém em 19 centímetros, no mesmo período, embora apresente em torno de 2 cm as 00 e 24 horas . No ano de 2012 o modelo Eta15 apresenta RMS de 2 cm chegando a 4 cm nas últimas duas horas de previsão.

A estação NAUS apresenta melhor qualidade em relação aos três modelos, mas principalmente em relação ao modelo RPSAS, que nas demais apresenta qualidade muito inferior (até 18 cm em BRAZ, 2010) ao modelo Eta20. No ano de 2010, pode se observar que o modelo RPSAS apresenta 2 cm em RMS, variando em 1 cm em relação ao modelo Eta20. Em 2011, a menos da previsão das 12h em que os dois modelos apresentam uma inversão brusca, o modelo Eta20 com qualidade de 2 cm e o RPSAS de 3 cm. Em relação ao modelo Eta15 apresenta RMS de 2 cm a 3 cm.

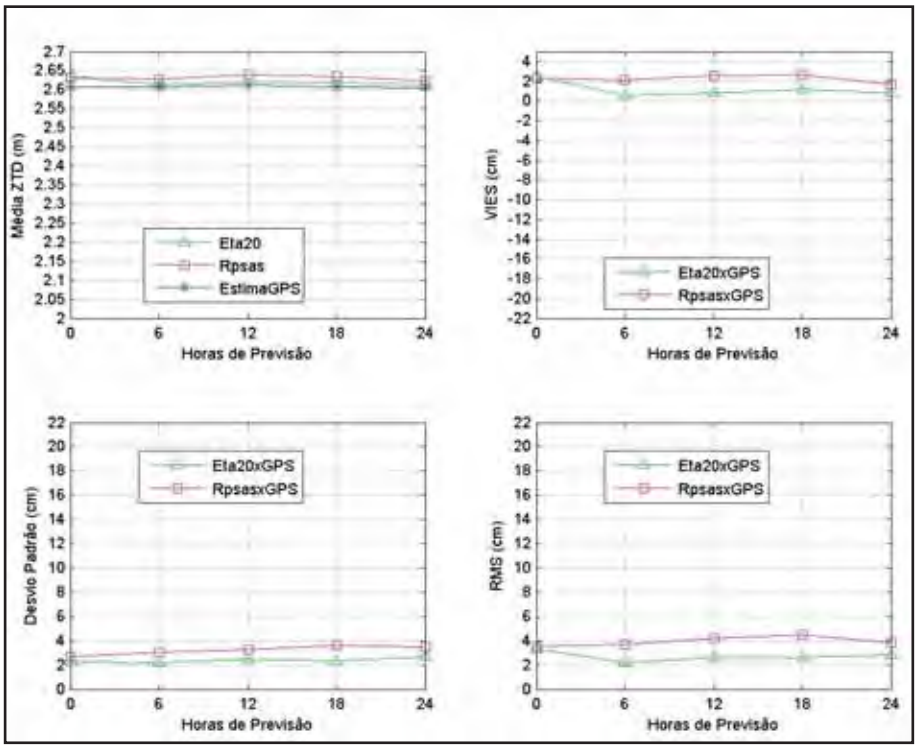


Figura 42: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2010 na estação NAUS.

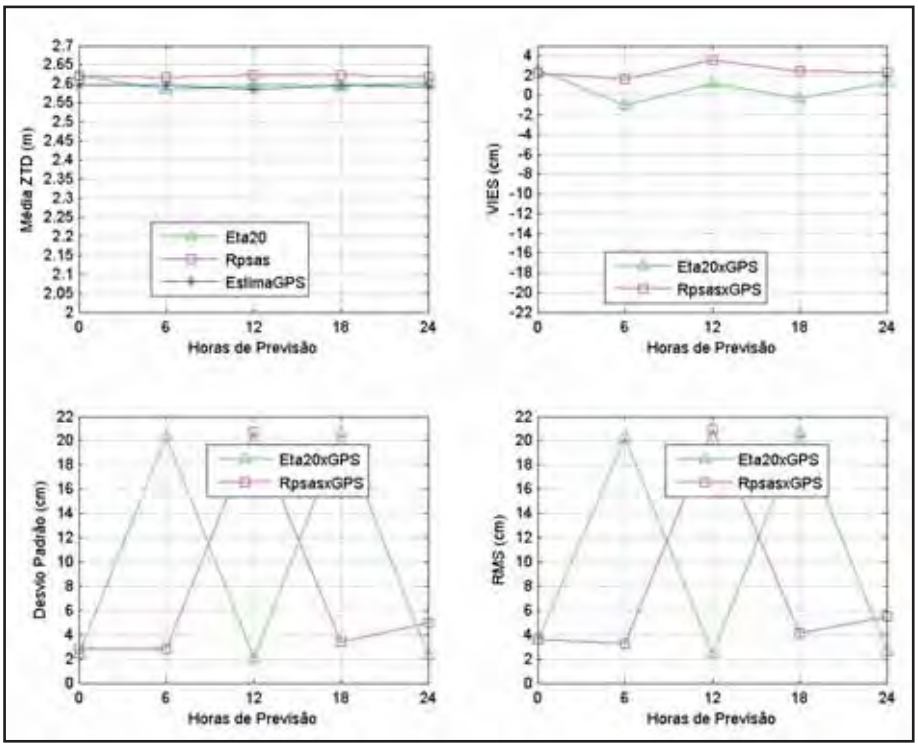


Figura 43: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta20 e RPSAS no ano e 2011 na estação NAUS.

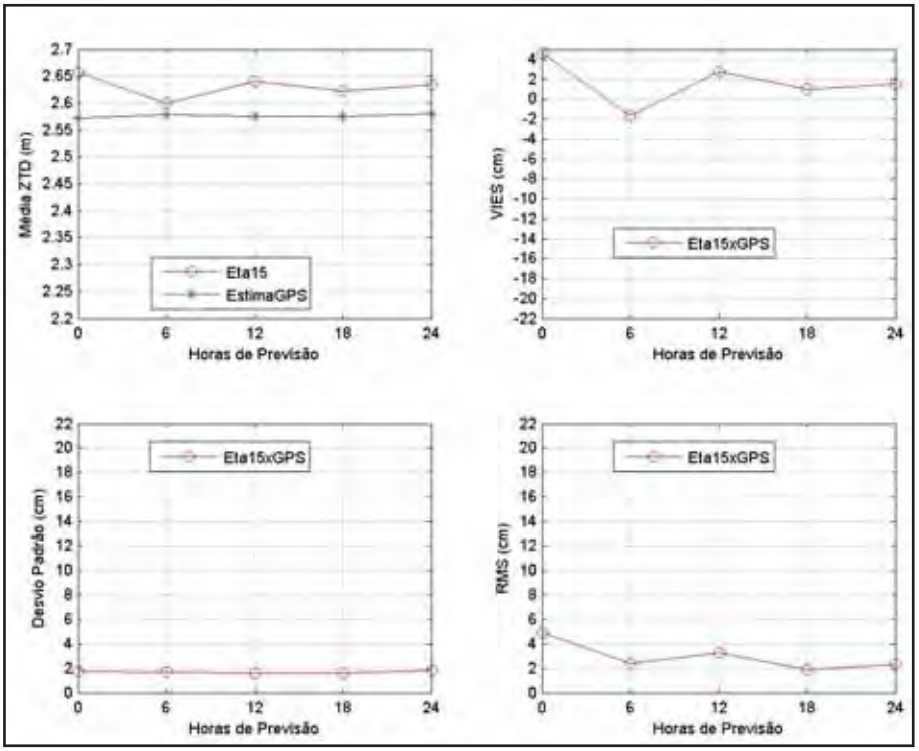


Figura 44: Análise do ZTD utilizando os modelos Eta15 no ano e 2012, na estação NAUS.

4.4 SAZONALIDADE

A sazonalidade é a variação periódica anual do comportamento da atmosfera em relação com as estações do ano, e o impacto no clima se dá, de forma mais ou menos intensa, dependente da localização das estações. Para regiões próximas ao Equador há pouca variação devido à incidência e refração do Sol quase que constante ao longo do ano. Já em regiões subtropicais, a incidência do Sol é maior em uma época que em outra (maior no verão e menor no inverno). Essa variação impacta na qualidade das previsões do ZTD mais em um período que em outro, em função direta com a latitude do local.

A avaliação em relação à sazonalidade considera a interferência do ciclo sazonal climático sobre o desempenho dos modelos de PNT em gerar suas previsões. Para essa avaliação foram utilizados o modelo e Eta15 nos períodos de Fevereiro para caracterizar o verão e Julho para o inverno, ambos os meses em 2012, e as estações NAUS, BRAZ, UBER, SJRP, PPTE, UFPR, PRGU e SMAR foram as selecionadas. As estações foram selecionadas devido as suas localizações (como pode ser observadas na figura 20), de menores latitudes (próximas ao Equador) às latitudes maiores (próximas e ao sul do Trópico de Capricórnio). Essas estações estão localizadas na região continental do Brasil, visando isolar a influência das características costeiras.

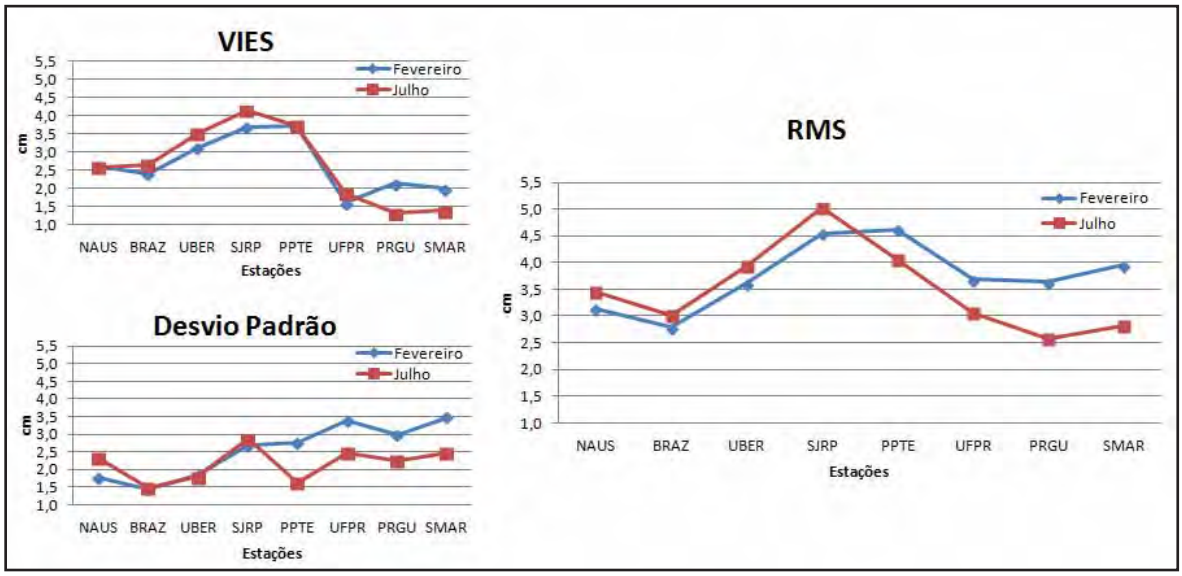


Figura 45: Avaliação da Sazonalidade do ZTD (Jan e Jul de 2012) com modelo Eta15 nas estações NAUS, BRAZ, UBER, SJRP, PPTE, UFPR, PRGU e SMAR.

As previsões do ZTD utilizando o modelo de PNT, apresentam RMS de 3 à 3,5 cm para o mês de fevereiro nas três primeiras estações, e nas demais de 3,5 cm à 4,5 cm em SMAR. No mês de Julho, os valores do RMS das estações próximas do equador são ligeiramente maiores no verão, mas a partir da estação SJRP os valores do RMS no inverno são menores do que no verão para as estações GNSS mais ao sul. O resultado mais importante nessa figura é que a qualidade das estimativas do ZTD para as regiões ao sul do Brasil é melhor no inverno do que no verão. Uma justificativa para esse resultado é o maior número de acertos do modelo de PNT em relação às previsões no mês de julho do que no verão, pois no inverno a chegadas das frentes frias e sua propagação sobre o continente são melhores detectadas e previstas pelo modelo. Quanto que no verão, Fevereiro, com o forte aquecimento pelos raios solares, as frentes frias podem não se propagar como previsto pelo modelo.

A variação sazonal pode ser observada com menor intensidade nas estações mais ao equador (por exemplo, NAUS e BRAZ) do que as ao sul, onde um aumento gradativo na sazonalidade de acordo com o aumento da latitude das estações é observado.

4.5 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO ÀS DIFERENTES LATITUDES

Nessa avaliação são consideradas estações litorâneas que apresentem diferentes latitudes, com o intuito de avaliar a qualidade das previsões do ZTD nessas condições. Como apresentado na metodologia as estações selecionadas foram CEEU, ALAR, SAVO, RIOD, NEIA, IMBT e POAL, no mês de fevereiro de 2012 (verão), avaliando as previsões do modelo Eta15.

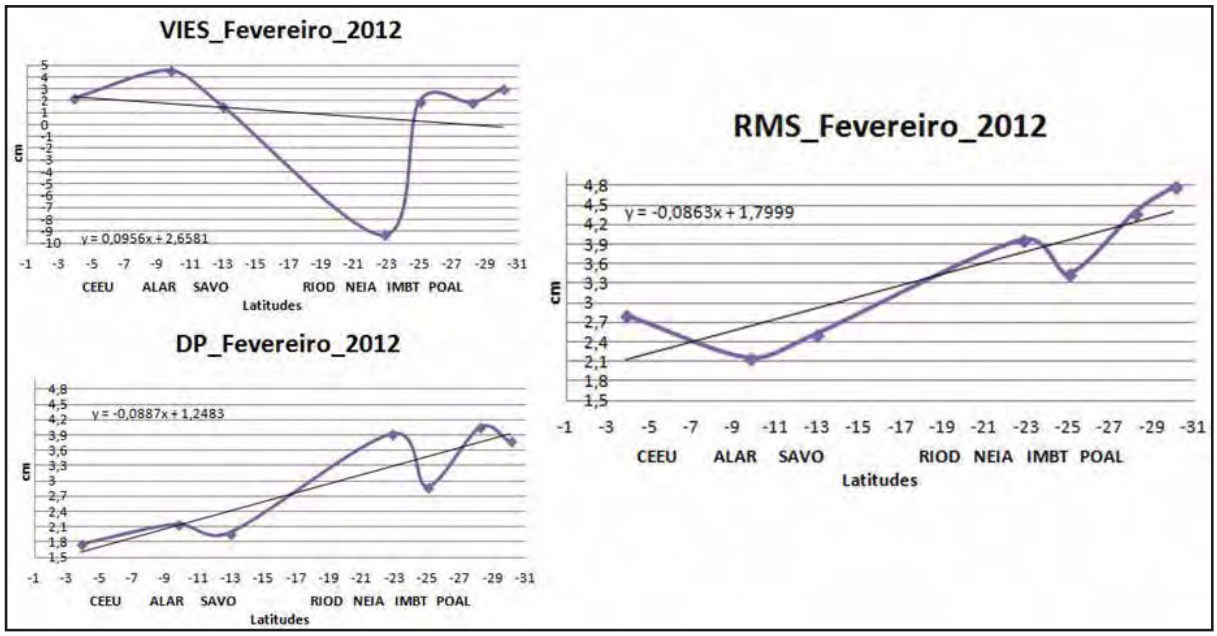


Figura 46: Análise do modelo Eta15 nas previsões do ZTD no mês de Fevereiro de 2012, estações litorâneas CEEU, ALAR, SAVO, RIOD, NEIA, IMBT e POAL.

O RMS apresentado na figura 46 revela que o erro do modelo aumenta de acordo com o aumento da latitude, o que podemos observar da estação CEEU (latitude -3,88) onde o RMS é de 2,1 cm, enquanto na estação POAL (latitude -30,07) o valor do RMS é de 4,2 cm. Esse comportamento está associado com o fato de que as variações atmosféricas são menos intensas no equador do que nas regiões de latitudes médias onde há o encontro das massas de ar frio vindas do pólo sul com o continente aquecido. O coeficiente angular da curva de tendência plotada no gráfico da figura 46 apresenta a taxa de variação em relação ao aumento do RMS, ou seja, a razão entre o aumento da latitude e valor do RMS, de 0,086 cm, aproximadamente 1 cm em RMS a cada 10º.

O coeficiente angular da curva de tendência apresenta a taxa de variação em relação ao aumento do RMS, ou seja, a razão entre a qualidade do modelo e o aumento da latitude, de 0,086 cm, aproximadamente 1 cm em RMS a cada 10º. Como verificado na análise da seção 4.3, esse comportamento é bem mais caracterizado no verão do que no inverno. Se a mesma análise fosse feita no inverno essa correlação da latitude com o aumento do RMS não deve ser significativa, como pode ser observado na figura 45.

4.6 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO ÀS DIFERENTES ALTITUDES

Considerando a variação das altitudes e mantendo os valores das latitudes em três diferentes regiões devido as diferentes características das mesmas (região da estação BRAZ lat ≅-16, região da estação PPTE lat ≅-22 e região da estação UFPR lat ≅-25) com o objetivo de tentar minimizar o impacto da variação latitudinal e avaliar apenas o impacto da variação da altitude nas diferentes regiões. Dessa forma foram selecionadas as estações CUIB, ROSA, MTBA, PPTE, PRMA, CHPI, POLI, UFPR, PRGU e BRAZ, utilizando as previsões do modelo Eta15, no mês de fevereiro de 2012.

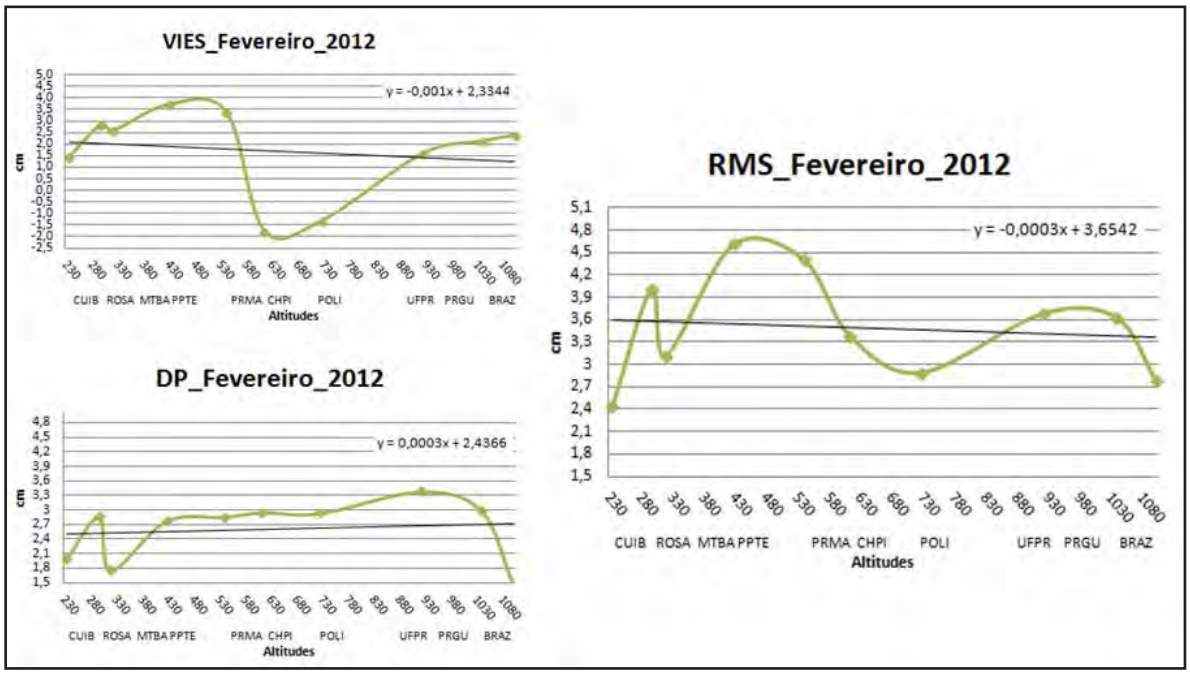


Figura 47: Análise do modelo Eta15 nas previsões do ZTD no mês de Fevereiro de 2012, estações diferentes altitudes, CUIB, ROSA, MTBA, PPTE, PRMA, CHPI, POLI, UFPR, PRGU e BRAZ.

Os resultados mostrados na figura 47 possibilita avaliar que não há uma relação direta dessas duas variáveis. Observa-se variações significativas entre estações relativamente próximas em altitudes. Por exemplo, o RMS em CUIB é de 2,4 cm e em ROSA é de 3,9 cm as quais se distanciam em altitude apenas em 50 m. No entanto, se traçar uma linha de tendência, como apresentada na Figura 47**,** é possível observar que ocorre o aumento da altitude há um suave aumento na qualidade das previsões ZTD geradas pelo modelo Eta15. A taxa de variação do RMS de linha de ajuste é de 3 mm a cada 1000 m de variação na altitude, o que expressa à razão entre a qualidade da modelagem do ZTD e a altitude.

4.7 ANÁLISE DOS DADOS COM RELAÇÃO À CONTINENTALIDADE

A avaliação em relação a continentalidade será em função da localização das estações, buscando ver se ocorre a variação na qualidade das previsões do ZTD em relação as estações que se encontram em regiões litorâneas, NAUS, RIOD e POAL, e dentro do continente, CEEU, PPTE e SMAR. Assim foram selecionadas as estações com latitudes próximas que diferencia apenas a localização em relação ao continente, tentando isolar outras variáveis que pudessem interferir nessa análise.

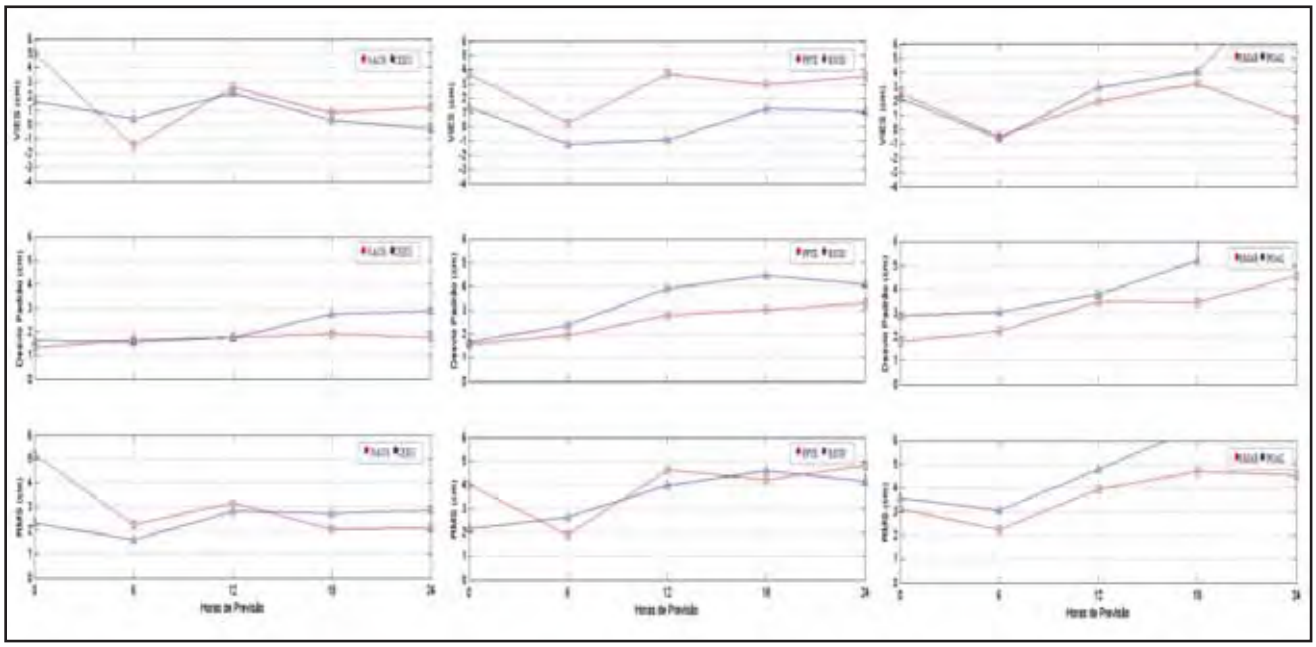


Figura 48: Avaliação em relação à continentalidade, nas estações CEEU e NAUS, RIOD e PPTE, SMAR e POAL, com o modelo Eta15, em Fevereiro de 2012.

Os resultados mostrados na Figura 48 indicam que o viés apresenta mais variável em função das horas de integração do modelo para as estações continentais do que para as estações costeiras, especial para as primeiras horas de integração nas estações mais próximas do equador. Com relação ao desvio padrão ele é maior nas estações costeira do que nas continentais em praticamente todas as horas de previsão do modelo. A combinação desses dois resultados no RMS indica um impacto mais significativo da continentalidade nas regiões mais ao sul do Brasil (SMAR e POAL) do que nas regiões de média para baixa latitude, pois enquanto nas estações NAUS/CEEU e PPTE/RIOD os resultados se confundiam durante as horas de integração do modelo, nas estações SMAR/POAL o RMS na estação mais

continental apresenta-se sistematicamente menor do que a estação litorânea. Algo que merece ser destacado é o viés acentuado na análise (condição inicial) nas estações NAUS e PPTE, os quais são maiores do que os observados nas estações litorâneas próximas. Esse viés acentuado impacta significativamente o RMS nessas circunstâncias, onde o padrão destacado acima não se caracteriza claramente.

4.8 ANÁLISE DAS COMPONENTES ZWD E ZHD

A avaliação das componentes ZWD e ZHD em relação ao valor previsto será realizado em relação as estações ILHA, PPTE e ROSA como pode ser observado nas tabelas 2 e 3, o número de dias concomitantes entre as estações é restrito como também, o número de estações, por essa razão também a avaliação se dará em relação aos modelos Eta20, RPSAS e Eta15, para que possa ser avaliados seus impactos e cada componente.

Na figura 49 é apresentado o RMS em relação ao ZHD e ZWD, considerando as estações ILHA, PPTE e ROSA, avaliando a qualidade dos modelos Eta20, RPSAS no ano de 2011. Pode se observar que os modelos Eta20 e RPSAS apresentam qualidade semelhante em relação aos dados estimados (referência). Sendo que nas previsões da componente seca os modelos apresentaram qualidade inferior aos do estimado pelo Gipsy. Já a componente úmida apresenta RMS de 8 cm a 2,5 cm na estação ILHA, na estação PPTE RMS médio de 4 cm e na estação ROSA de 6 cm a 4cm.

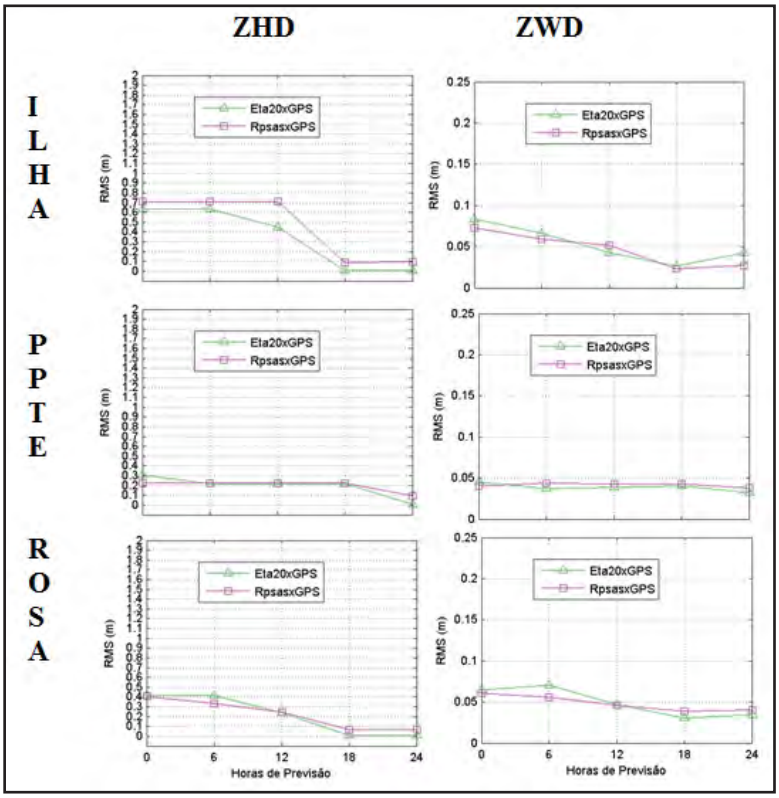


Figura 49: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20 e RPSAS, no ano de 2011, estações Ilha, PPTE e ROSA**.**

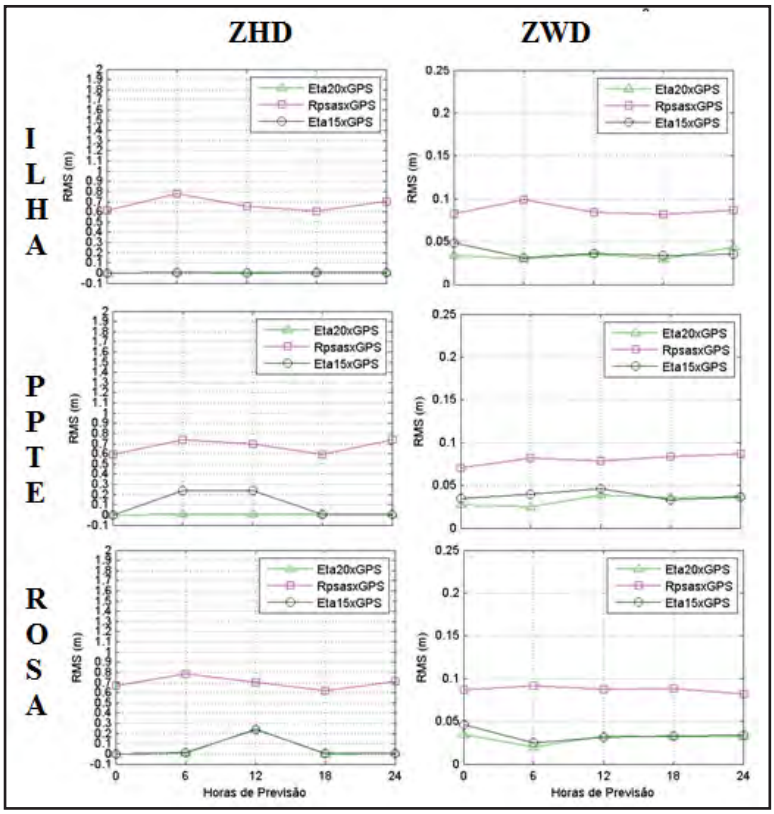


Figura 50: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20 e RPSAS, no ano de 2012, estações ILHA, PPTE e ROSA**.**

Em 2012, a figura 50**,** pode ser observada as componentes ZHD e ZWD nas estações ILHA, PPTE e ROSA. A qualidade do modelo RPSAS apresenta desempenho inferior em relação aos demais, devido às razões já esclarecidas anteriormente. Os modelos Eta20 e Eta15 apresentam qualidade semelhante, mas pode ser observado algumas variações desse padrão, quando o modelo Eta15 com qualidade superior, a menos da estação PPTE.

Buscando avaliações mais detalhadas, diante dos dados disponíveis, foi realizada uma avaliação em relação ao mês de fevereiro de 2012 nas estações PPTE e ROSA, quando se tem dados dos três modelos, mesmo não sendo o melhor período de dados do RPSAS, ele também é apresentado nessa avaliação.

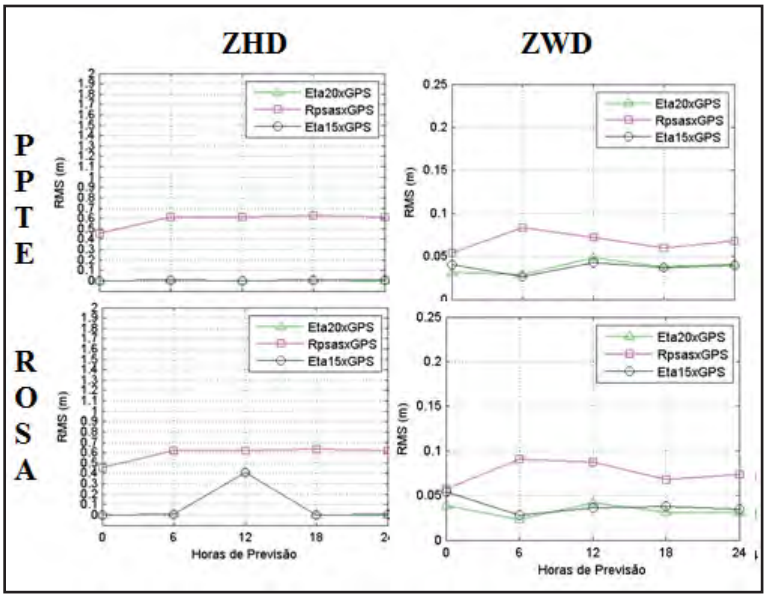


Figura 51: RMS das previsões do ZHD e ZWD com os modelos Eta20, RPSAS e Eta15, no Fevereiro de 2012, estações PPTE e ROSA**.**

Com o RMS dessas componentes, em período mais específico, pode se observar que a qualidade das previsões do ZHD não ultrapassam 2 cm, a menos da estação ROSA as 12 horas chegando a 4 cm. Em relação ao ZWD a qualidade das previsões é apresentada em 2,5 cm aproximadamente nas duas estações.

4.9 AVALIAÇÃO CONSIDERANDO A RESOLUÇÃO TEMPORAL

Nesse item será avaliada a qualidade da previsão do ZTD em relação à melhoria na resolução temporal, uma vez que com o modelo operacional Eta15 tem-se previsões de 3 e 6 horas, o que torna possível essa avaliação. Como o valor das previsões são de 3 em 3 horas ou de 6 em 6 horas, e para a aplicação no posicionamento é necessário que os valores do atraso zenital sejam disponibilizados para intervalos de tempos menores (exemplo 5 minutos), é necessária uma interpolação temporal, na qual a resolução temporal dos dados pode impactar na qualidade dos valores previstos em cada época interpolada, serão apresentadas as análises para as estações ILHA e PPTE.

Com o uso de splines é realizada uma avaliação desse impacto usando valores do ZTD a cada de 3 e 6 horas, ambos interpolados para intervalos de 5 minutos e comparados com estimativas do ZTD a partir de observações GNSS. Para ilustrar tais interpolações a figura 52 (à esquerda), apresenta um dia em que os valores previstos do ZHD apresentam-se próximos aos valores estimados, na estação ILHA. Vale ressaltar que a spline com interpolação de previsão de 3 horas é mais representativa quanto da variação temporal do ZHD, em relação à de 6 horas. Na figura 52 à direita, é apresentado o exemplo para o mesmo dia da componente ZWD, onde pode ser observado que embora ocorra um deslocamento de até 8 cm quando observados os valores estimados do ZWD em relação aos previstos, as previsões com resolução temporal de 3 horas representa de forma menos suavizada a variação da componente úmida, quando comparada com as previsões de 6 horas.

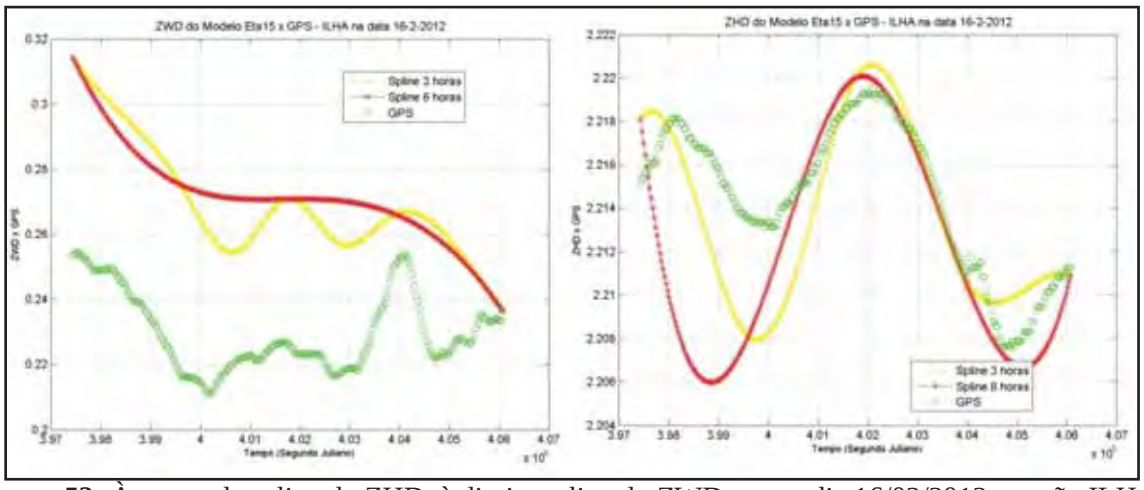


Figura 52: À esquerda spline do ZHD, à direita spline do ZWD para o dia 16/02/2012 estação ILHA, modelo Eta15.

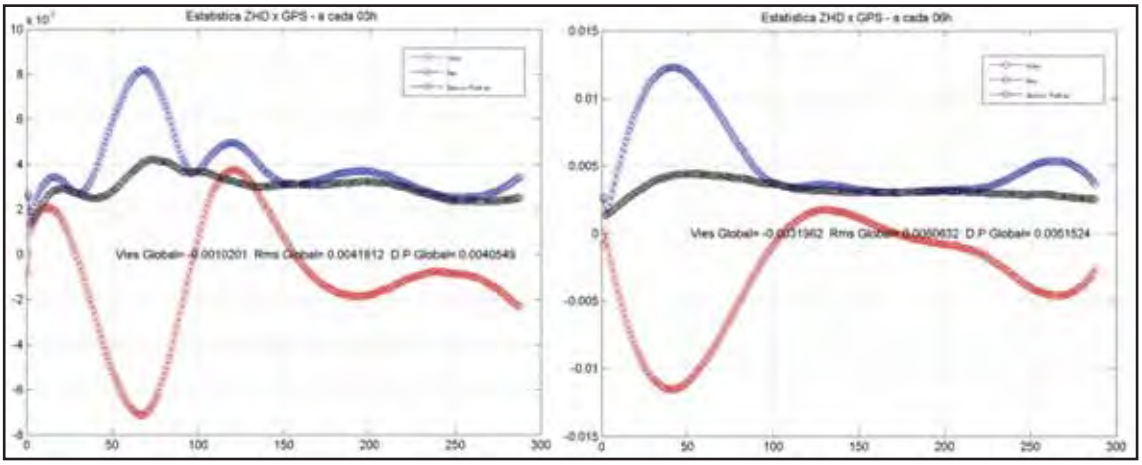


Figura 53: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação ILHA.

Na figura 53, as primeiras 5 horas do dia o RMS chega a 8 milímetros, mas a partir de 7 horas não passa de 5 mm. Em relação à de 6 horas há um pico de máximo RMS em 3,5 horas do dia, e depois da época 8,5 horas fica abaixo de 5 mm. Na tabela 4 são apresentados os valores de viés, RMS e DP da spline de 3h e de 6h. Pode-se observar que a spline de 3 horas apresenta uma melhora de 2,2 mm em relação ao viés, de 1,9 em mm para o RMS e de 1,1 mm em relação ao DP.

Tabela 4: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h.Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (m)	Desvio Padrão (m)	RMS (m)
3 horas	-0,0010201	0,0040549	0,0041812
6 horas	-0,0031962	0,0051524	0,0060632
Diferença 6h-3h	+0,0021762	+0,0010975	+0,001882

Para uma análise sobre a qualidade das splines de 3h e de 6 horas é apresentada na figura 54 o viés, DP e RMS do ZWD.

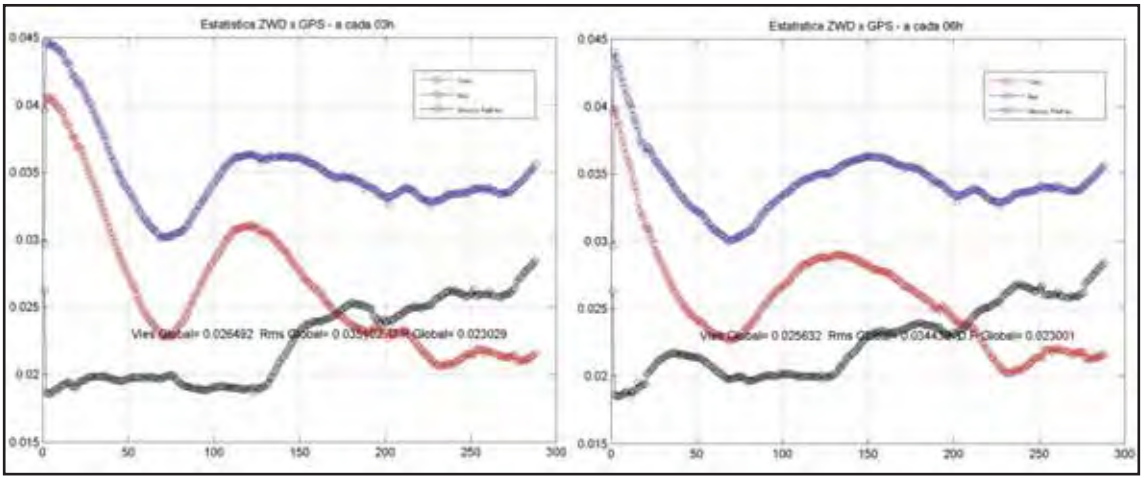


Figura 54: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação ILHA.

Na tabela 5 pode-se observar que o RMS da spline de 3 horas apresenta uma diferença menor que mm, em relação à spline de 6 horas.

Tabela 5: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (cm)	Desvio Padrão (cm)	RMS (cm)
3 horas	2,6492	2,3029	3,5102
6 horas	2,5632	2,3001	3,4439
Diferença 6h-3h	+0,086	+0,028	+0,0663

A segunda análise se dá em relação à estação PPTE, onde serão apresentadas as análises das componentes ZHD e ZWD, considerando as splines de 6h e 3h. Na figura 55 são apresentadas as análises estatísticas da componente seca, para as previsões de 3h e 6 horas.

Tabela 6: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (cm)	Desvio Padrão (cm)	RMS (cm)
3 horas	-0,11754	0,38702	0,40447
6 horas	-0,3381	0,5042	0,60706
Diferença 6h/3h	+0,22056	+0,11718	+0,20254

Em relação ao ZHD pode-se observar que a modelagem do ZHD utilizando resolução temporal de 3 horas, tem um ganho de até 0,2 cm em relação a resolução de 6 horas, como pode ser observado na tabela 7.

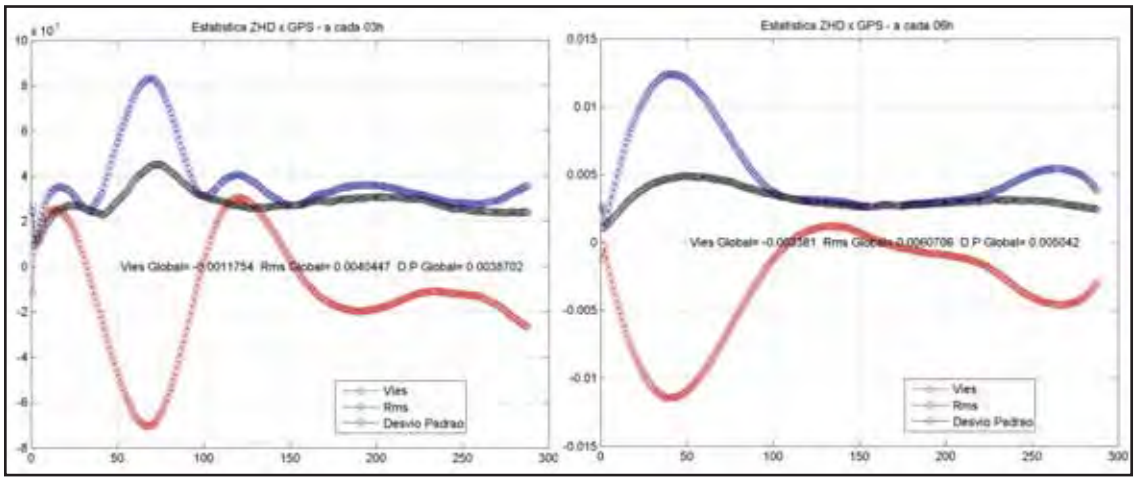


Figura 55: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação PPTE.

Para as splines da componente ZWD da estação PPTE (Figura 56) apresentam os valores de avaliação para a spline de 3 horas maiores que a de 6h (Tabela 7), como pode ser observado em relação à ILHA (tabela 5), apresentando um aumento no RMS de 0,1 cm na diferença entre as resoluções de 3h e 6h.

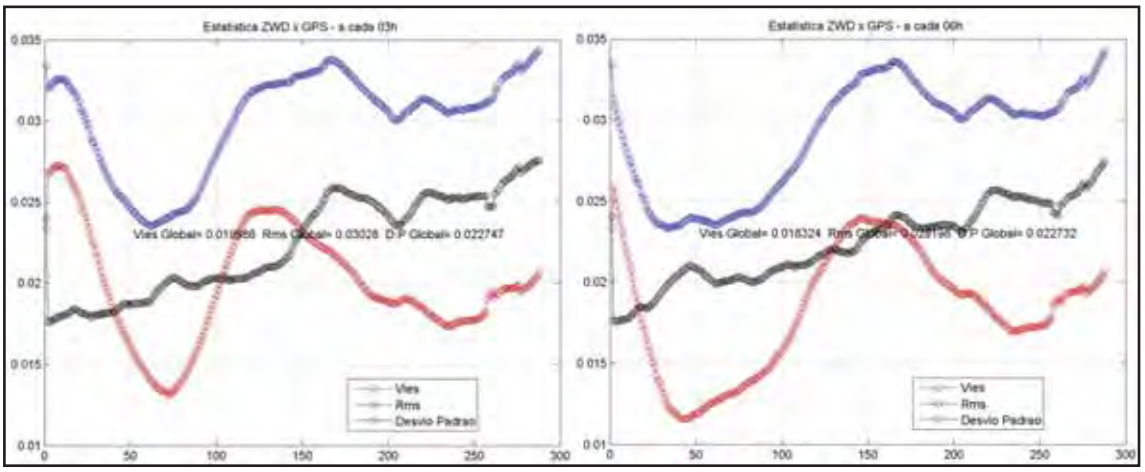


Figura 56: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos por dia para as splines obtidas com as previsões de 3h (à esquerda) e 6h (à direita), estação PPTE.

Tabela 7: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (cm)	Desvio Padrão (cm)	RMS (cm)
3 horas	1,9986	2,2747	3,028
6 horas	1,8324	2,273	2,9198
Diferença 3h/6h	0,1662	0,0017	0,1082

Como se sabe nas previsões dos dados sofre influência dos dados do dia anterior, por essa razão as splines também foram avaliadas em relação a esse fator. Essa avaliação se dá em relação a estação ILHA, analisando o desempenho das duas componentes ZHD e ZWD, podendo avaliar em qual componente pode ocorrer o maior impacto devido a melhoria da resolução temporal.

Na figura 57 são apresentado o viés, desvio padrão e RMS para a componente ZHD, considerando as resoluções temporais de 3h e 6h. Na tabela 9 pode se observar que embora o viés apresenta -0,03 cm no viés, o que apresenta maior dispersão em relação a spline de 3horas, o DP apresenta 0,015 cm, e o RMS 0,0057 cm, mostra a melhora na qualidade da resolução de 3 horas. Embora essas diferenças pareçam pequenas, as melhorias nas primeiras épocas de dados foram bem significativas e mostram a importância dessa implementação para a melhoria das versões dos produtos disponíveis e em desenvolvimento.

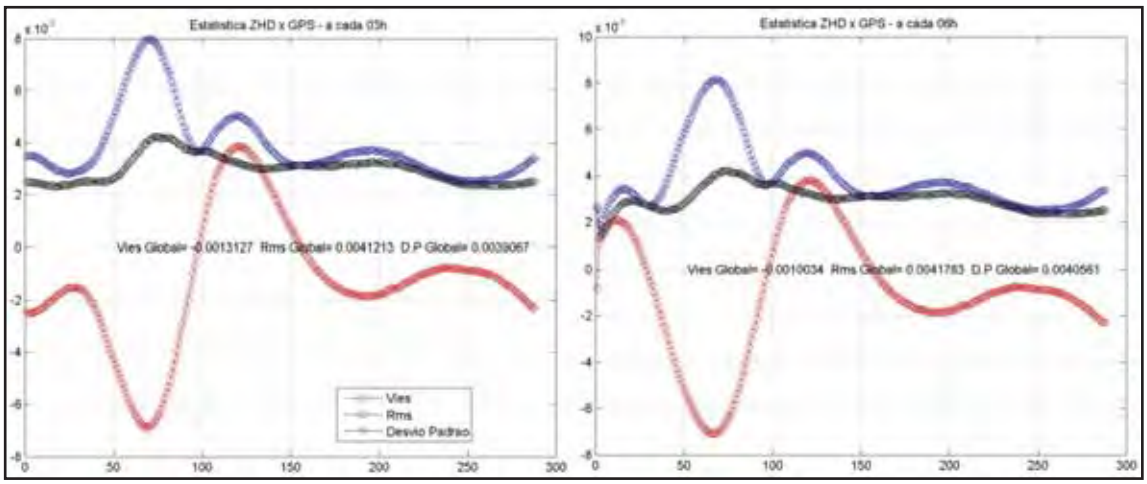


Figura 57: Medidas estatísticas da avaliação do ZHD em função das épocas de 5 minutos para as splines obtidas com as previsão de 3h (à esquerda) e 6h (à direita) usando 2 dias, estação ILHA.

Tabela 8: Avaliação do ZHD em relação à spline de 3h e de 6h, considerando 2 dias. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (cm)	Desvio Padrão (cm)	RMS (cm)
3 horas	0,13127	0,39067	0,41213
6 horas	0,10034	0,40561	0,41783
Diferença 6h/3h	-0,03093	0,01494	0,0057

Na figura 58 são apresentadas as análises estatísticas em relação a componente ZWD, quando considerados dois dias de dados, analisando as resoluções temporais de 3 e 6 horas, ambas para o modelo Eta15km.

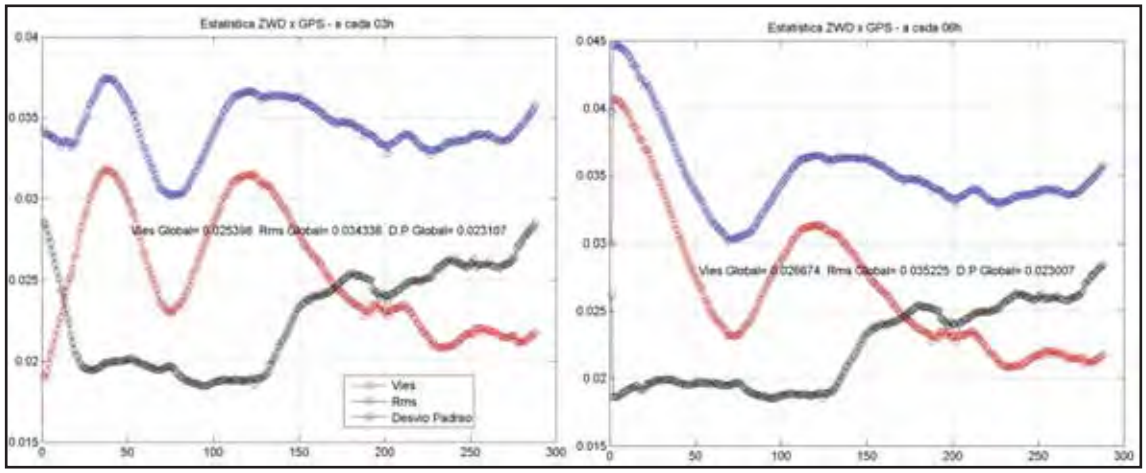


Figura 58: Medidas estatísticas da avaliação do ZWD em função das épocas de 5 minutos para as splines obtidas com as previsão de 3h (à esquerda) e 6h (à direita) usando 2 dias, estação ILHA.

Tabela 9: Avaliação do ZWD em relação à spline de 3h e de 6h, considerando 2 dias. Valores positivos nas diferenças representam melhoras com a resolução temporal maior.

	Viés (cm)	Desvio Padrão (cm)	RMS (cm)
3 horas	2,5398	2,3107	3,4336
6 horas	2,6674	2,3007	3,5225
Diferença 6h/3h	0,1276	-0,01	0,0889

A componente úmida apresenta dispersão de 0,13 cm em relação às previsões com resolução de 3 horas, e RMS de 0,089 cm o que expressa à qualidade das previsões com resoluções de 3 horas. Embora a melhoria da resolução temporal, apresente um ganho da ordem de centímetro ou milímetro na qualidade das previsões do ZTD, para aplicações de alta acurácia essa melhoria pode possibilitar maior qualidade no posicionamento. Assim como, a melhoria nas primeiras horas de previsão tem impacto positivo na qualidade das demais previsões, uma vez que a partir de uma primeira análise são geradas as demais previsões e essas sofrem correções considerando as previsões anteriores.

4.10 AVALIAÇÃO DO ZTD UTILIZANDO O MODELO G3DVAR

O sistema G3DVar encontra-se em fase de desenvolvimento e implantação no CPTEC/INPE, por isso os dados utilizados são testes realizados e o período disponível foi de Junho de 2012. Para uma avaliação criteriosa os valores obtidos para o ZTD serão comparados com os valores estimados. Foi utilizada a versão do modelo G3DVar que considera dados de radiocultação GNSS (RO-GNSS), e um teste no qual os dados advindos da radiocultação GNSS foram retirados, denominado de controle (ctl).

As séries temporais das estações da RBMC (disponíveis nesse período) apresentam as previsões do ZTD utilizando o modelo G3DVar e os valores estimados com o software GIPSY, serão apresentadas apenas as séries das estações, BRAZ e PPTE, que apresentam maiores diferenças entre si quanto aos valores do ZTD e também em relação à qualidade do modelo. Na figura 59 pode se observar que o ZTD varia em torno de 2,25 m, atraso estimado, e o modelo apresenta uma subestimação de até 25 cm. Na estação NAUS, figura 60, o ZTD estimado é de 2,6 m, apresentado similaridade com as previsões que utiliza o modelo G3DVar. Esse mesmo comportamento pode ser observado quando utilizado a modelagem do atraso com o modelo RPSAS, que também utiliza assimilação de dados regional.

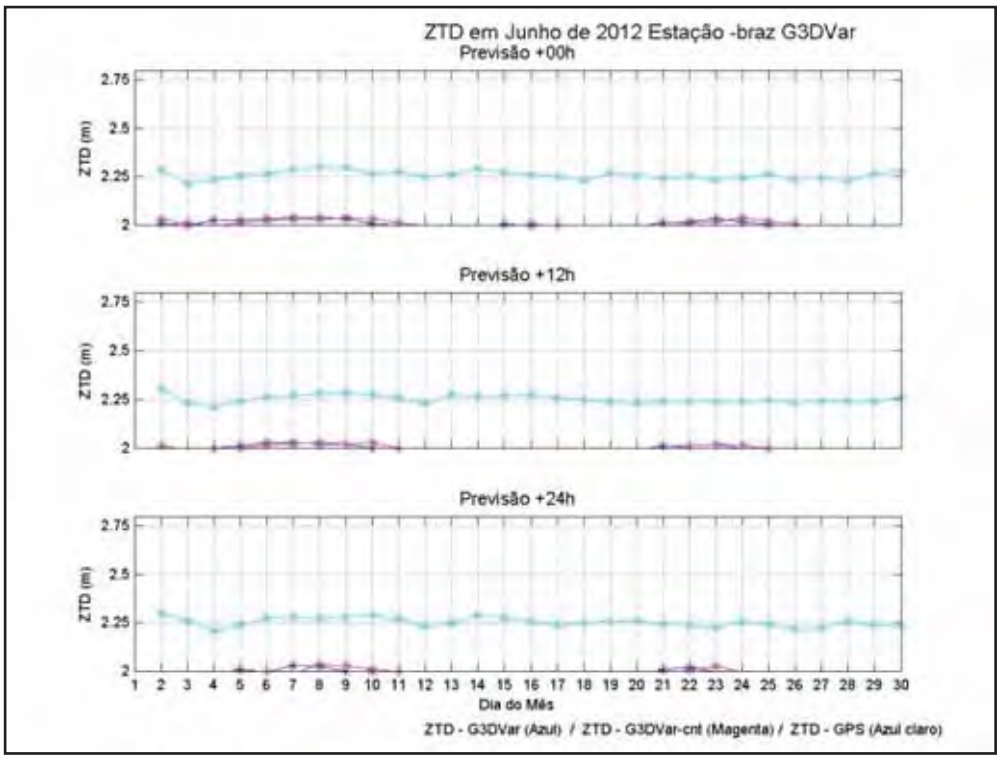


Figura 59: Série temporal do ZTD em junho de 2012, estação BRAZ, modelo G3DVar.

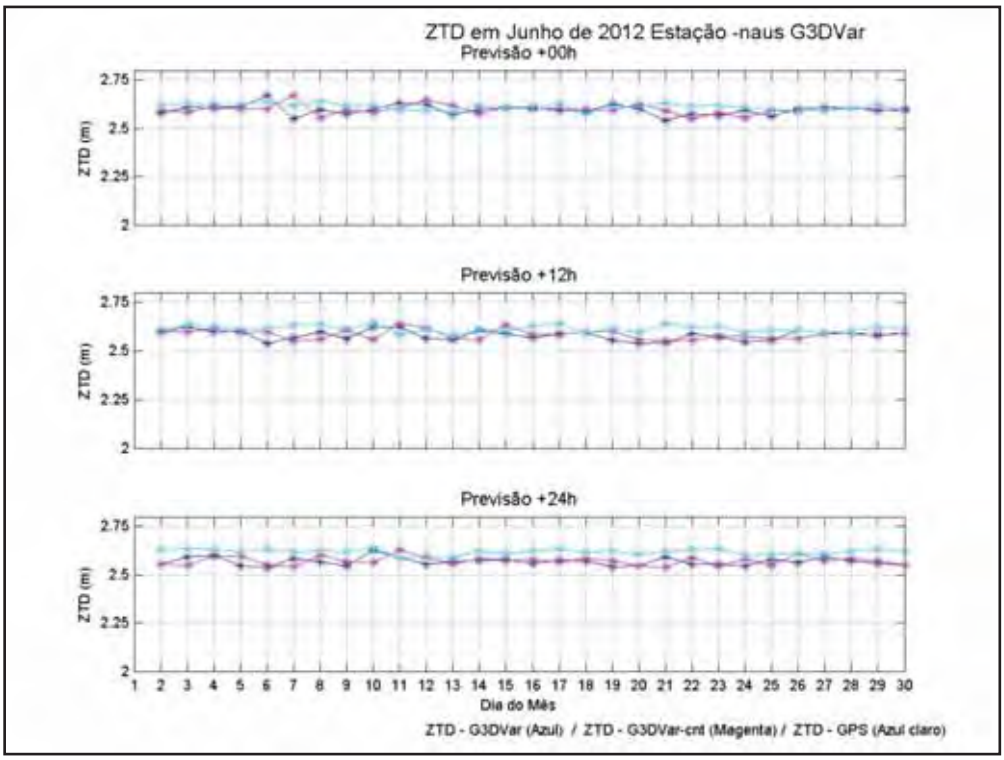


Figura 60: Série temporal do ZTD em junho de 2012, estação NAUS, modelo G3DVar.

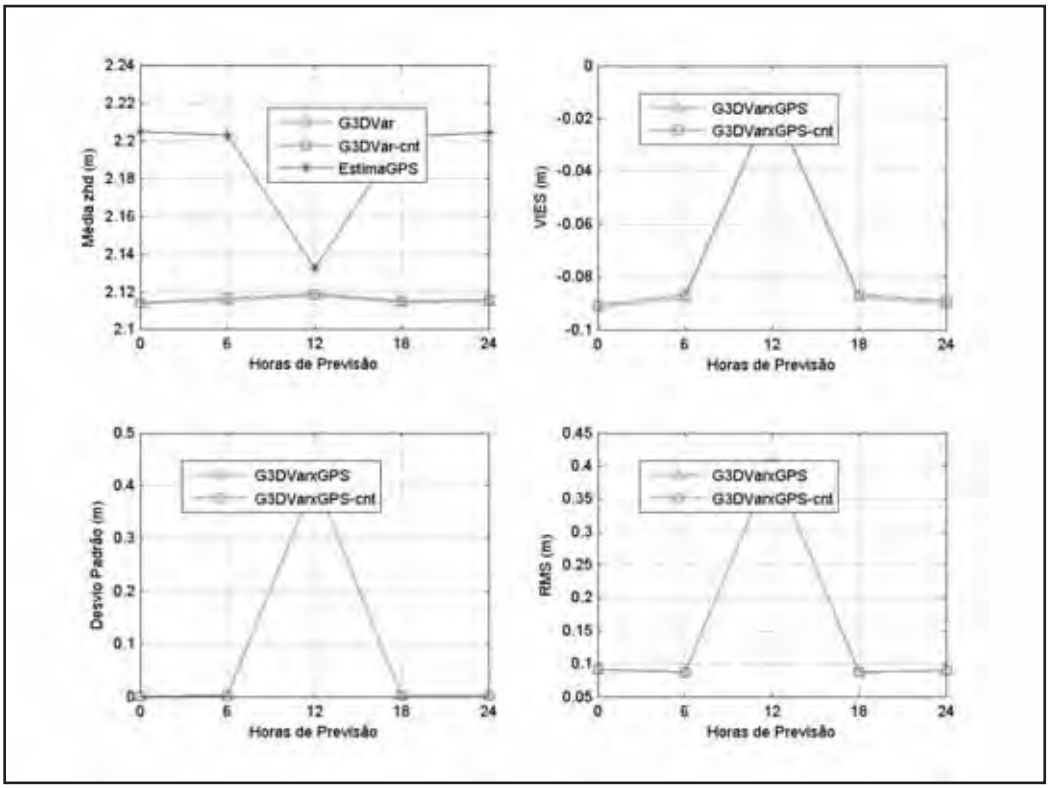


Figura 61: ZHD em junho de 2012, estação PPTE, modelo G3DVar.

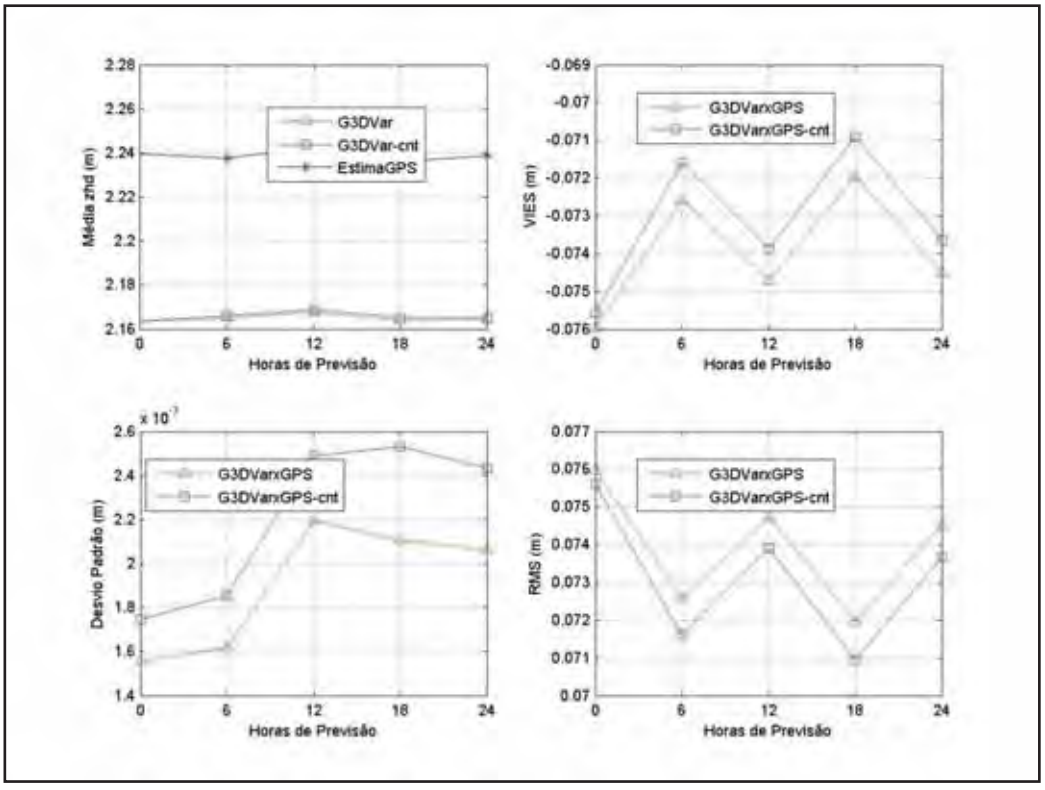


Figura 62: ZHD em junho de 2012, estação ROSA, modelo G3DVar.

Para uma avaliação mais criteriosa, foram apresentadas nas figuras 61 e 62 uma análise da qualidade do modelo G3DVar, quanto as previsões do atraso neutrosférico, em relação a componente ZHD nas estações PPTE e ROSA, e nas figuras 63 e 64 para o ZWD nas estações ILHA e PPTE.

O valor do ZHD apresentado em relação ao valor estimado da estação PPTE varia de 2,2 a 2,13 metros, enquanto os modelos mostram 2,11 metros. Já o RMS é de 10 centímetros, aproximadamente, para ambos os experimentos. Na estação ROSA o valor estimado é 2,24 metros, e o modelo mostram 2,17 metros. O RMS apresenta que o experimento que utiliza dados de radiocultação é melhor em até 0,1 cm quando comparado às previsões do modelo sem esses dados (ctl).

A componente úmida, apresentada em relação às estações ILHA e PPTE uma vez que estas estações apresentam maior variação do ZWD, para o mesmo período da análise, junho de 2012, nas figuras 63 e 64.

O ZWD estimado na estação ILHA apresenta variação de 18 a 17 cm, já o G3DVar com dados de RO-GNSS apresenta de até 1 cm, e o modelo que não considera dados de RO-GNSS apresenta até 1,3 cm. Com o RMS pode se observar que a qualidade do modelo sofre uma diminuição em relação às horas de previsão, mas nas primeiras horas tem 0,1cm, e qualidade do modelo com dados de radiocultação apresenta leve diminuição da qualidade devido ao desvio padrão. Já em relação à PPTE o ZWD estimado é de 17 cm e o modelo que considera dados de radiocultação apresenta mais próximo aos valores estimados, porém ainda com subestimação de 1 cm, e o RMS é de 2 a 2,8 cm, com maior qualidade ao ctl de até 0,4 cm. O que apresenta a qualidade do modelo G3DVar, e a contribuição da utilização de dados RO-GNSS na modelagem do ZTD.

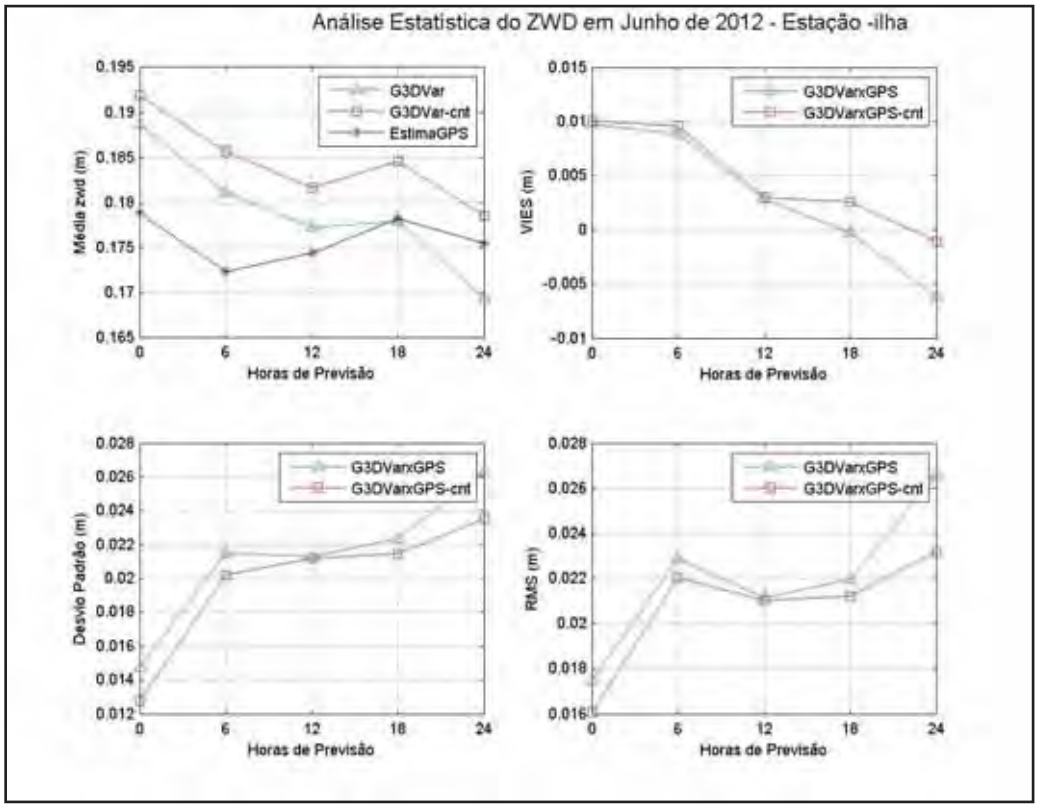


Figura 63: ZWD em junho de 2012, estação ILHA, modelo G3DVar.

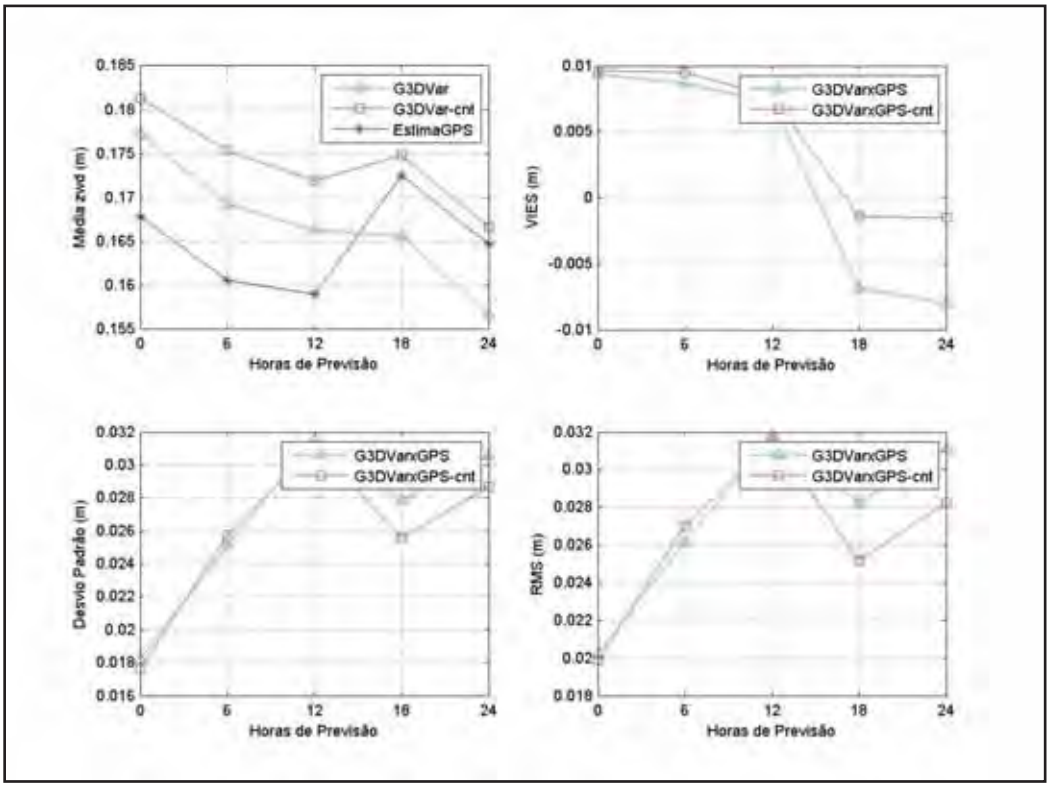


Figura 64: ZWD em junho de 2012, estação PPTE, modelo G3DVar.

5. AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO GNSS

Uma avaliação no impacto final das novas versões das previsões do ZTD no posicionamento GNSS, também foi realizada. O software utilizado para o processamento dos dados GNSS nessa avaliação foi o FCT/RT_PPP desenvolvido na FCT/UNESP (MARQUES, 2010), onde foram considerados os valores do ZTD obtidos pela PNT como correção dos erros que a neutrosfera causa no sinal dos satélites GNSS, e por consequência na posição final do usuário, quando se utiliza essa técnica de posicionamento.

O processamento foi PPP para a estação PPTE nos dias 02 e 07 de janeiro de 2012 considerando um dia de menor variação do ZTD e um dia com maior variação, (02 e 07 respectivamente) utilizando a previsão do ZTD através dos modelos Eta15, Eta20 e RPSAS, avaliando a discrepância planimétrica e a altimétrica, sendo nessa última onde ocorre o maior impacto do atraso neutrosférico na posição final, em relação ao ZTD estimado obtido pelo software Gipsy, assim como foi desenvolvida a avaliação da modelagem do atraso em relação ao ZTD estimado.

A figura 67 apresenta a variação do ZWD na estação PPTE para o dia 02/01/2012.

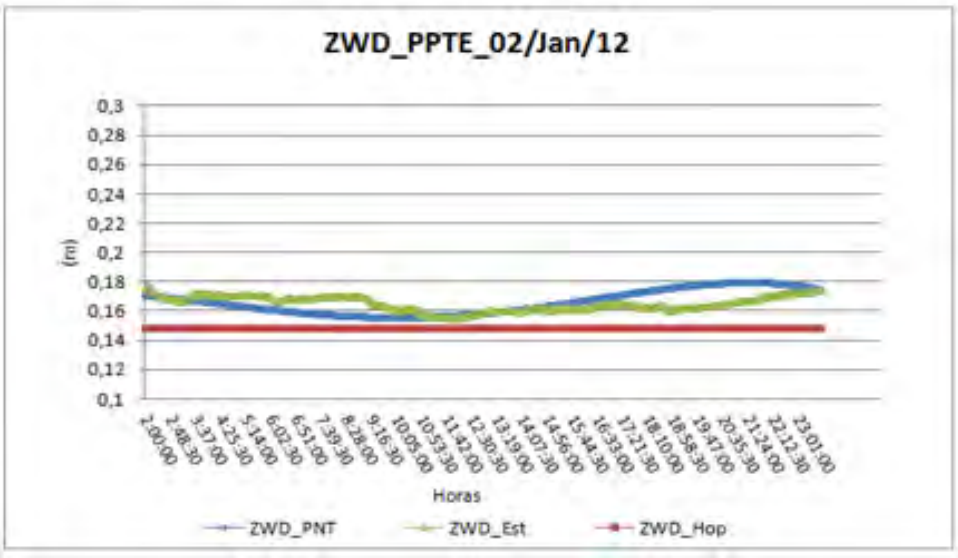


Figura 65: Variação do ZWD na estação PPTE dia 02/01/12 considerando previsão do ZWD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield.

Pode se observar a variação do ZWD de 18 cm, aproximadamente, considerando o valor estimado pelo RT_PPP, o modelo PNT apresenta variação mais suave, devido às 3 horas de previsão que são interpoladas para casa 15 segundos. Porém o modelo de Hopfield apresenta-se constante em 15 cm em todo o dia, não representando qualquer variação que chegou até 3 cm (das 2h as 12h).

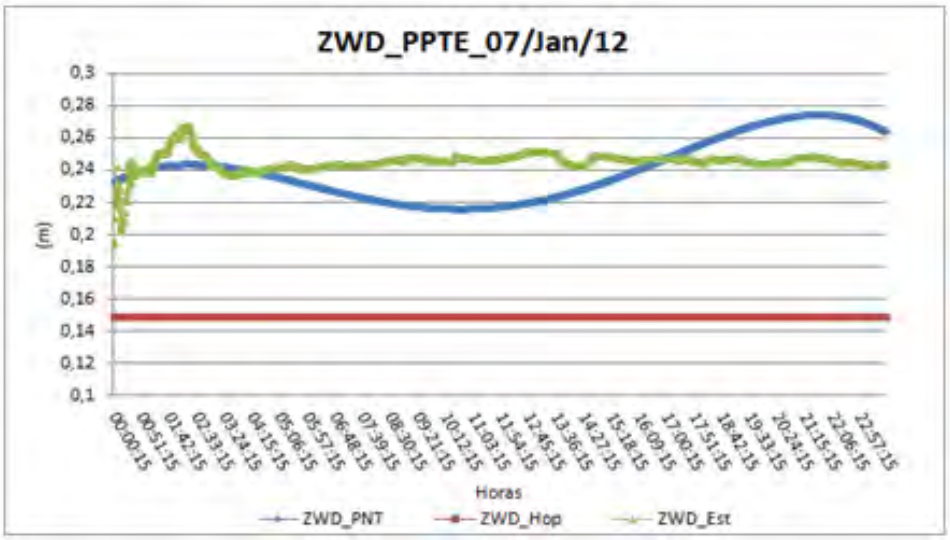


Figura 66: Variação do ZWD na estação PPTE dia 07/01/12 considerando previsão do ZWD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield.

No dia 07/01/12, na figura 68, é mais evidente o aumento do ZWD e de sua variação, considerando que esse dia foi um dia mais chuvoso. A variação do ZWD estimado foi de 24 cm, mas o ZWD previsto apresentou valores ainda menores por volta das 9h, 21 cm. O ZWD obtido pelo modelo de Hopfield apresentou valor constante em 14 cm, mesmo valor adotado no dia (02/01) considerado seco.

Em relação ao ZHD mesma análise comparando os métodos e modelos utilizados na obtenção do mesmo foi realizada.

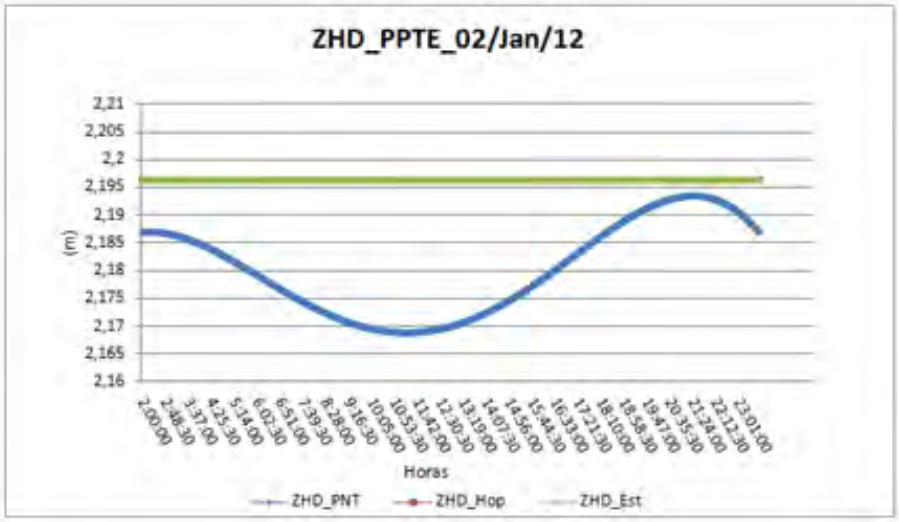


Figura 67: Variação do ZHD na estação PPTE dia 02/01/12 considerando previsão do ZHD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield.

Pode ser observado que o ZHD previsto é o único que apresenta variação, atingindo 2,185 m as 2h, 2,16m entre 9h e 12h e máximo de 2,195m as 21h. Enquanto que tanto o modelo de Hopfield quanto o estimado apresenta valor constante de 2,195 m.

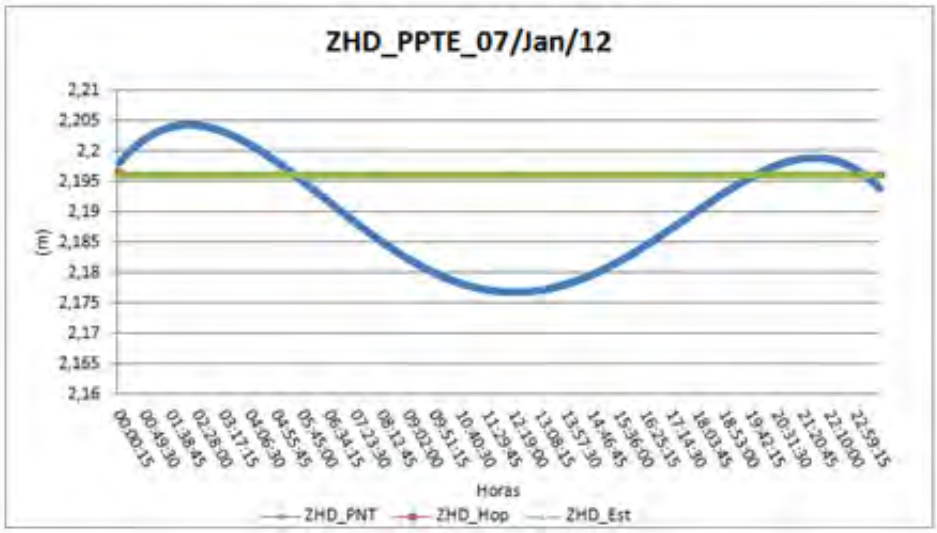


Figura 68: Variação do ZHD na estação PPTE dia 07/01/12 considerando previsão do ZHD pelo PNT, Estimação e modelo Hopfield.

Considerando que esse dia foi mais úmido em relação ao dia 02, pode-se perceber também o impacto na componente ZHD considerando o modelo de PNT que apresenta uma variação de 2,195m (máximo do dia 02/01) nas primeiras horas chegando até 2,205m. E os valores previstos e de Hopfield consideraram constantes como no dia anterior.

Na figura 71 é apresentada a discrepância planimétrica para a estação PPTE no dia 02/01/2012 onde se pode perceber de até 80 cm em relação ao modelo RPSAS, mas que após convergir passa a ser menos de 20 cm, os modelos Eta15 e Eta20 apresentam qualidade semelhante entre si. Em relação à discrepância altimétrica (figura 73) o RPSAS apresenta 10 m nas primeiras épocas chegando a 2 m, os modelos Eta apresentam máximo de 3 m à 2m.

No dia 07/01/2012 a discrepância em planimétrica (figura 72) é de 1 cm e a altimétrica de 50 cm (figura 74) aproximadamente, sendo que o modelo RPSAS apresentou maior qualidade em relação aos demais modelos, com 15 cm à 20 cm, uma diferença de até 1,1 m em relação aos demais modelos. Onde pode ser observada a qualidade da modelagem do ZTD, como também a qualidade do RPSAS, que pode ser observado com maior destaque no dia 07/01/12, quando ocorreu maior variação de chuva, sendo esse modelo capaz de representar melhor esse impacto do que os outros modelos. O que mostra a qualidade da previsão do atraso para aplicações no posicionamento GNSS, e a importância no investimento de sistemas de assimilação regional nas previsões do ZTD.

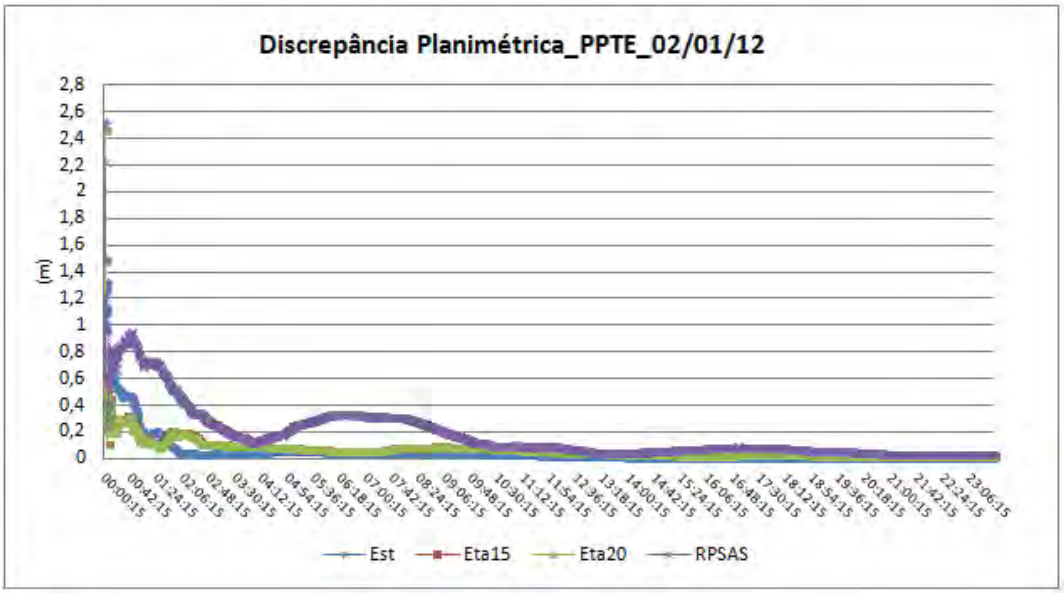


Figura 69: Discrepância planimétrica para estação PPTE no dia 02/01/2012, em relação ao ZTD Estimado, e com os modelos Eta15, Eta20 e RPSAS.

.

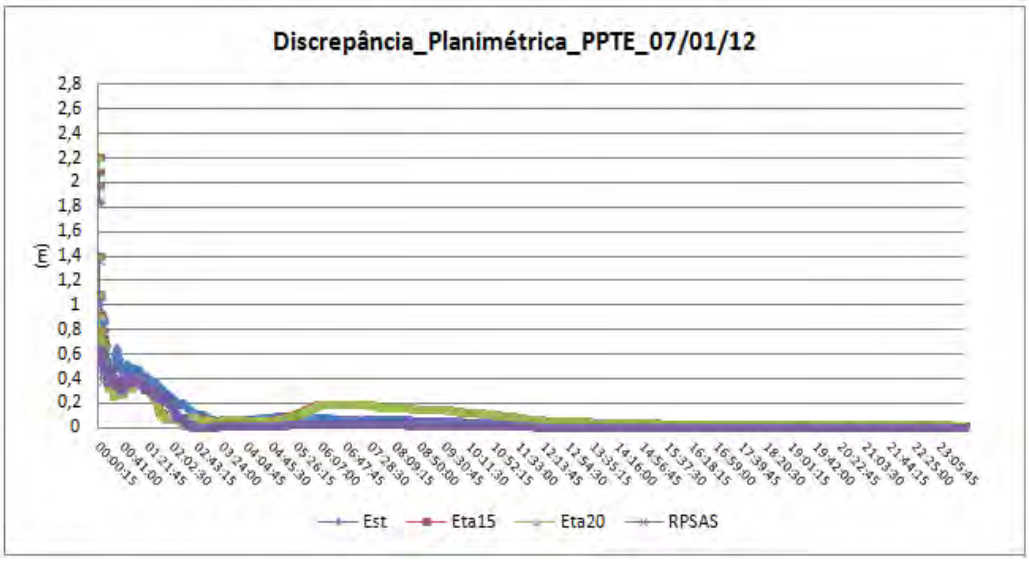


Figura 70: Discrepância planimétrica para estação PPTE no dia 07/01/2012, em relação ao ZTD Estimado, e com os modelos Eta15, Eta20 e RPSAS.

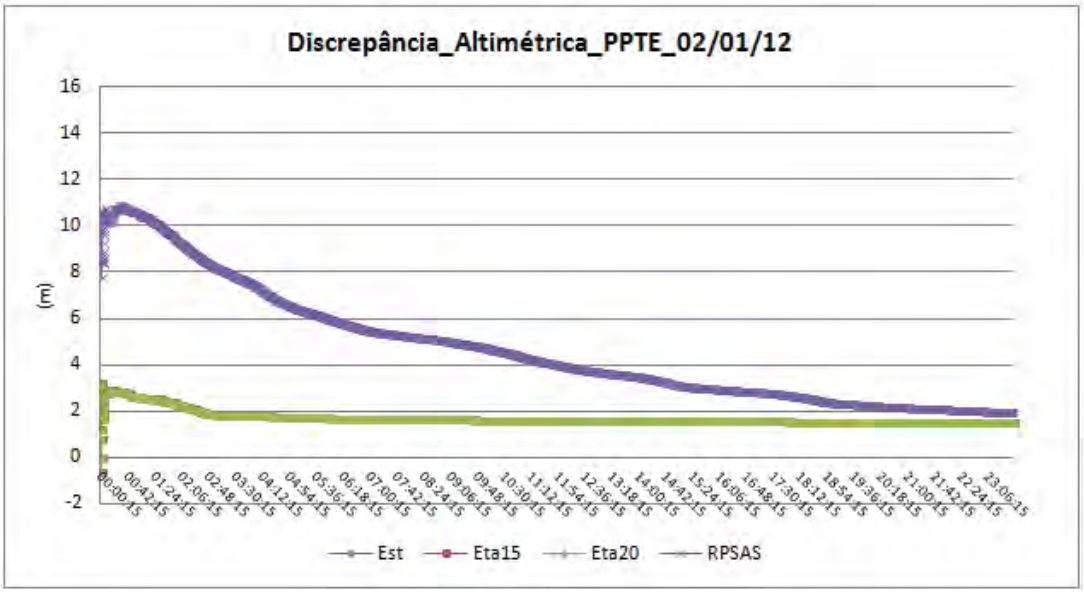


Figura 71: Discrepância altimétrica para estação PPTE no dia 02/01/2012, em relação ao ZTD Estimado, e com os modelos Eta15, Eta20 e RPSAS.

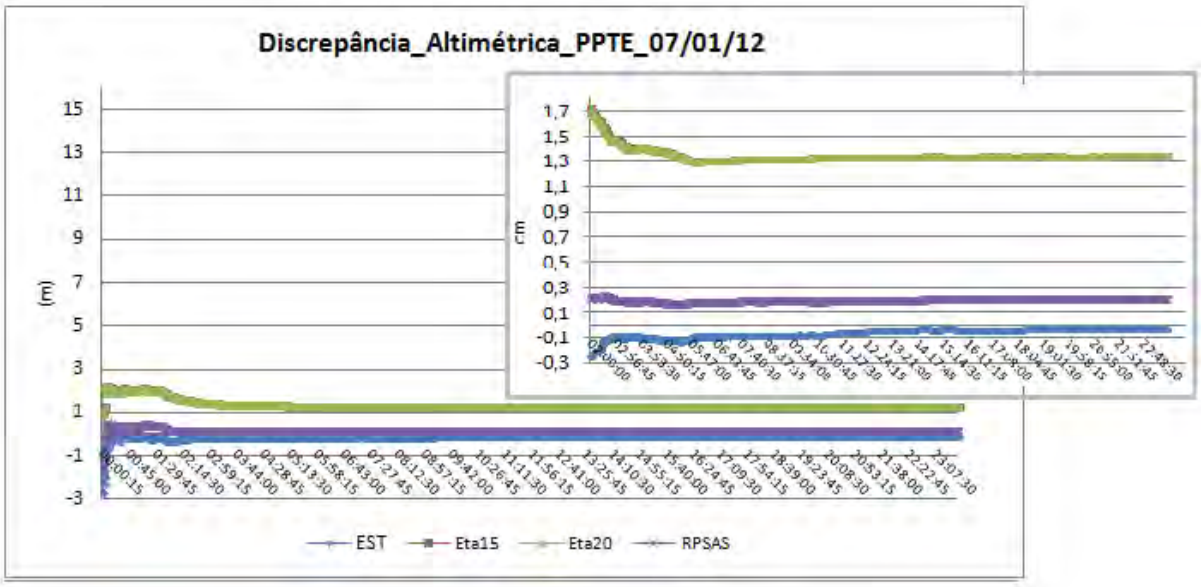


Figura 72: Discrepância altimétrica para estação PPTE no dia 07/01/2012, em destaque considerando a partir das 02h00, em relação ao ZTD Estimado, e com os modelos Eta15, Eta20 e RPSAS.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizado levantamento das novas versões da modelagem do ZTD usando modelos de previsão numérica de tempo disponíveis no CPTEC, os quais apresentam melhorias na resolução espacial, temporal e que utilizam melhor a base de dados coletados sobre a América do Sul. Uma avaliação robusta dessas versões é apresentada na qual, diversos aspectos são avaliados.

Foram desenvolvidas séries temporais anuais para as estações da RBMC disponíveis nos anos de 2010, 2011 e 2012. Para análises mais detalhadas foram realizadas séries temporais mensais, para estas estações, visando analisar o desempenho dos modelos de PNT disponíveis. Os valores usados como referência foram às estimativas obtidas com o processamento no software Gipsy.

Como avaliação geral, considerando todas as estações em cada ano, pode-se observar que o modelo Eta20 apresenta qualidade superior ao modelo RPSAS, porém o RPSAS apresenta melhor desempenho nas primeiras horas de previsão. Considerando a avaliação mensal (Fevereiro de 2012) os modelos Eta20 e Eta15 apresenta desempenho similar.

Na análise anual e mensal por estação, os principais resultados são que o RPSAS apresenta subestimação na estação BRAZ (21 cm) em Brasília, sendo que o Eta20 apresenta melhor desempenho. Na estação localizada em Santa Maria-RS, os modelos Eta20 e RPSAS tem desempenho similar em 2010, porem em 2011 o RPSAS apresenta melhores resultados. Já em 2012 RMS do modelo Eta15 é de 2 cm. Na estação em Manaus, NAUS, há um viés de 1 cm entre o RPSAS e Eta20 no ano de 2010 e em 2011 o RPSAS é melhor, já em 2012 Eta15 apresenta valores de RMS entre 2 a 3 cm.

Na avaliação do impacto da sazonalidade na qualidade das previsões do ZTD, os resultados mostram que ela é significativa nas estações abaixo de 20°S de latitude, nas quais o RMS do ZTD é maior durante o período de verão do que no inverno, cuja diferença pode chegar até 1 cm no RMS. Já as estações mais ao norte esse aspecto não impacta significativamente os resultados. Essa modificação no RMS é causada mais proeminentemente pelo aumento do desvio padrão do que o viés. Uma pequena modificação no viés é observada apenas nas estações abaixo de 25°S de latitude.

Na avaliação em relação à continentalidade, observou-se que o viés apresenta mais variação em função das horas de integração do modelo para as estações

continentais do que para as estações costeiras, com maior impacto nas primeiras horas de integração do modelo Eta15, nas estações mais próximas ao equador. O desvio padrão foi maior nas estações costeiras do que nas continentais. Com a combinação dessas duas análises, o RMS, indica que o impacto da continentalidade é mais significativo em regiões ao sul do Brasil (SMAR e POAL), do que nas estações de média para baixa latitude.

A análise das componentes ZHD e ZWD separadamente tornou possível observar onde ocorre o maior impacto das previsões do ZTD, como também qual dessas apresenta melhor qualidade na previsão. Pode se observar que o ZHD apresenta qualidade de 2 cm e o ZWD com melhor qualidade em torno de 2,5 cm, uma vez que essa variável é mais instável, e por essa razão mais difícil de prevê-la. Mas ambas as componentes apresentam alta qualidade quando comparadas com as modeladas pelos modelos teóricos, como pode ser observado na avaliação do posicionamento.

A resolução temporal embora tenha apresentado melhora em cm ou mm, na qualidade das previsões do ZTD, apresenta um ganho em aplicações de necessitem de alta acurácia, possibilitando maior qualidade no posicionamento, podendo ser observado principalmente o impacto positivo nas primeiras horas de previsão.

Os sistemas de assimilação de dados, RPSAS e G3DVar, apresentaram melhor desempenho em regiões mais úmidas (região amazônica) do que regiões mais secas (exemplo Brasília). Como esses sistemas utilizam informações atmosféricas regionais possuem maior capacidade de descrever mais adequadamente essa região.

No posicionamento GNSS, a análise das previsões do ZWD e ZHD apresentaram valores próximos aos valores estimados, em especial nos dias mais úmidos. Esse impacto pode ser observado nas duas componentes, mas o mesmo não é representado pelo modelo de Hopfield que apresenta valores constantes nos diferentes dias e períodos, errando até 10 cm (ZWD em 07/01/12) em relação ao estimado.

O maior impacto da qualidade do ZTD pode ser obsevado na discrepância altimétrica. Houve dias em que os modelos Eta20 e Eta15 apresentaram qualidade superior ao RPSAS, mas em outros mais úmidos o RPSAS apresentou qualidade superior de até 1,1 cm em relação aos outros dois modelos. Esses resultados enfatizam a importância de se utilizar os sistemas de assimilação regional nas previsões do ZTD.

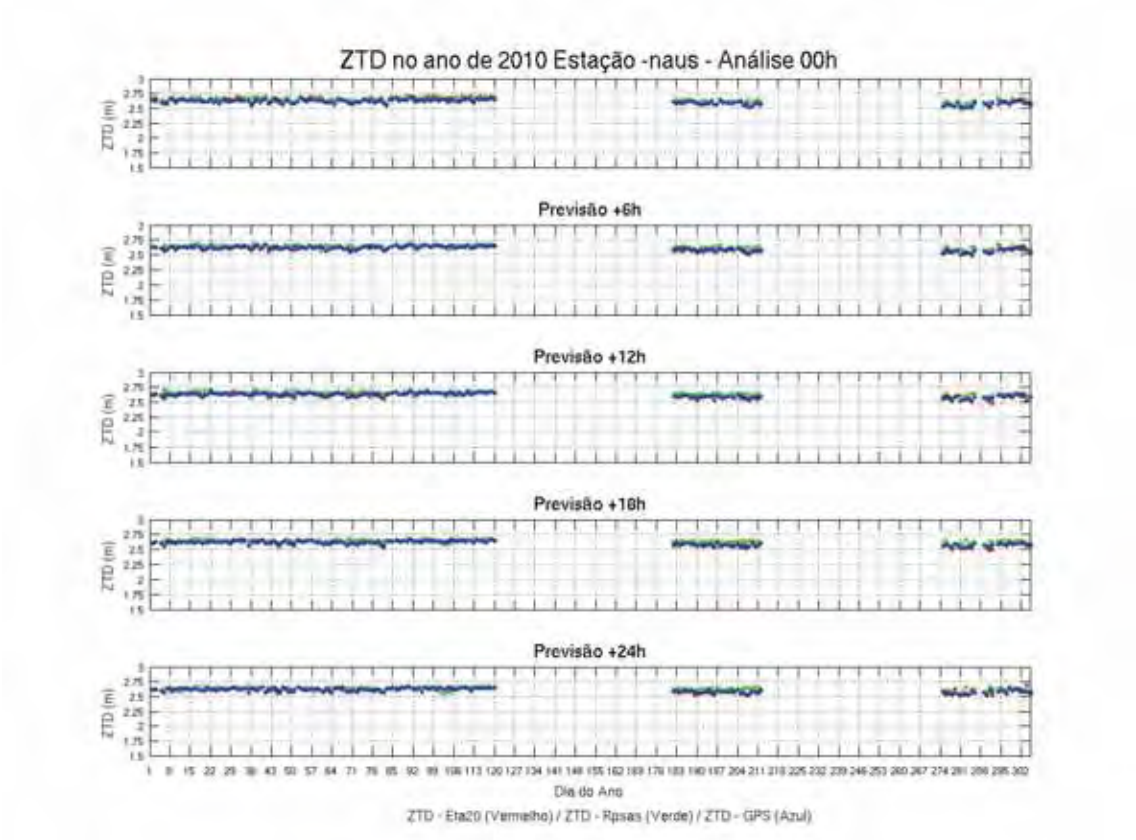
Como recomendação para trabalhos futuros destaca-se:

- Utilização de modelos de PNT com maior resolução temporal e espacial;
- Implantação de modelos de PNT com assimilação de dados regionais nas previsões do ZTD;
- Utilização de mais dados de pressão e umidade sobre a região da América do Sul, possibilitando uma avaliação mais detalhada em relação às componentes hidrostática e úmida.

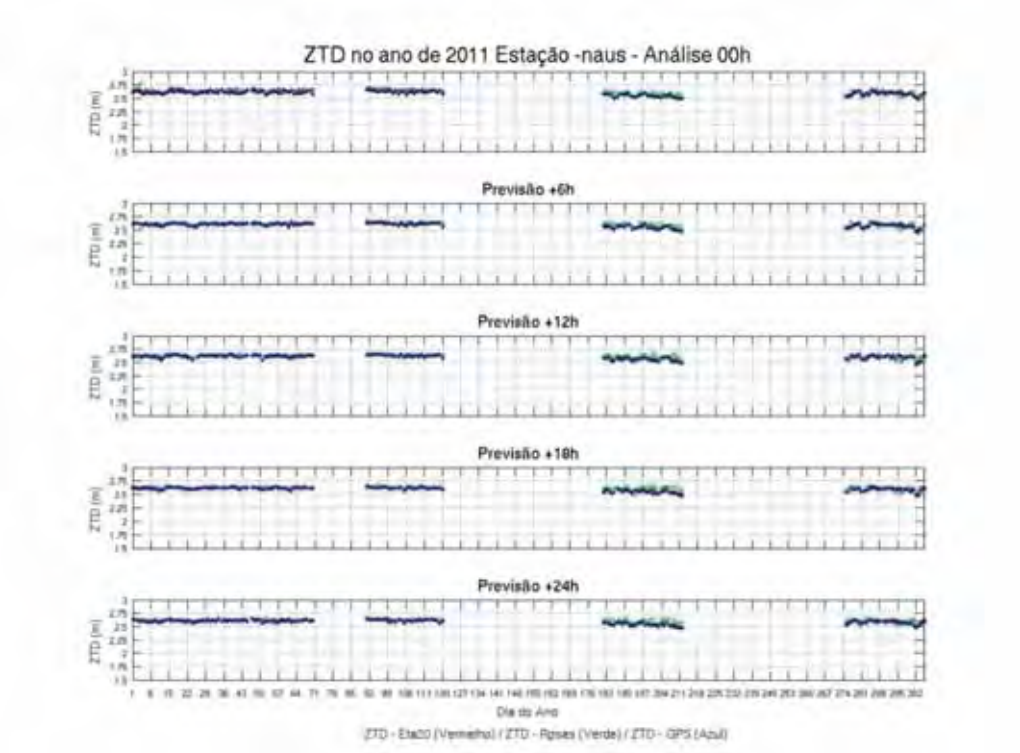
APÊNDICE – SÉRIES TEMPORAIS

As séries temporais do ZTD mostrando a variação do atraso neutrosférico ao longo de cada ano para as estações apresentadas na figura 19. A seleção das estações em que as séries são apresentadas aqui foi justificada na seção 3.3.2.

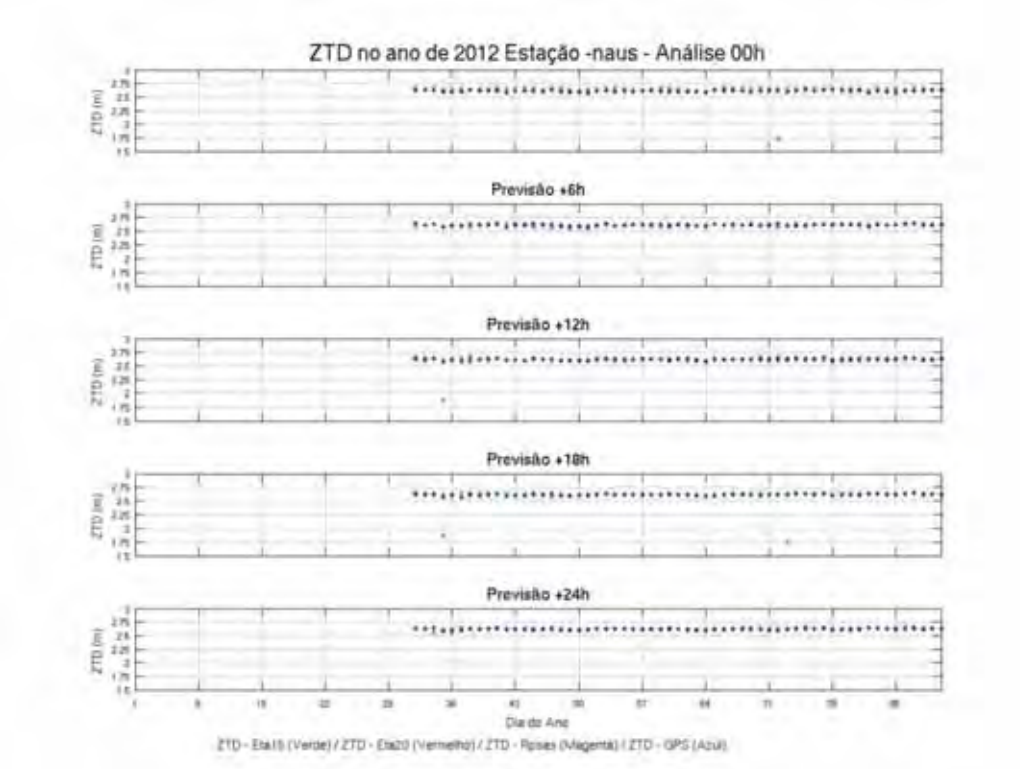
Na estação NAUS os valores do ZTD se apresentam em torno de 2,75 m, sendo que os três modelos se apresentam muito próximos em relação ao valor de referência nos três anos.



A1: Série temporal da estação NAUS em 2010.

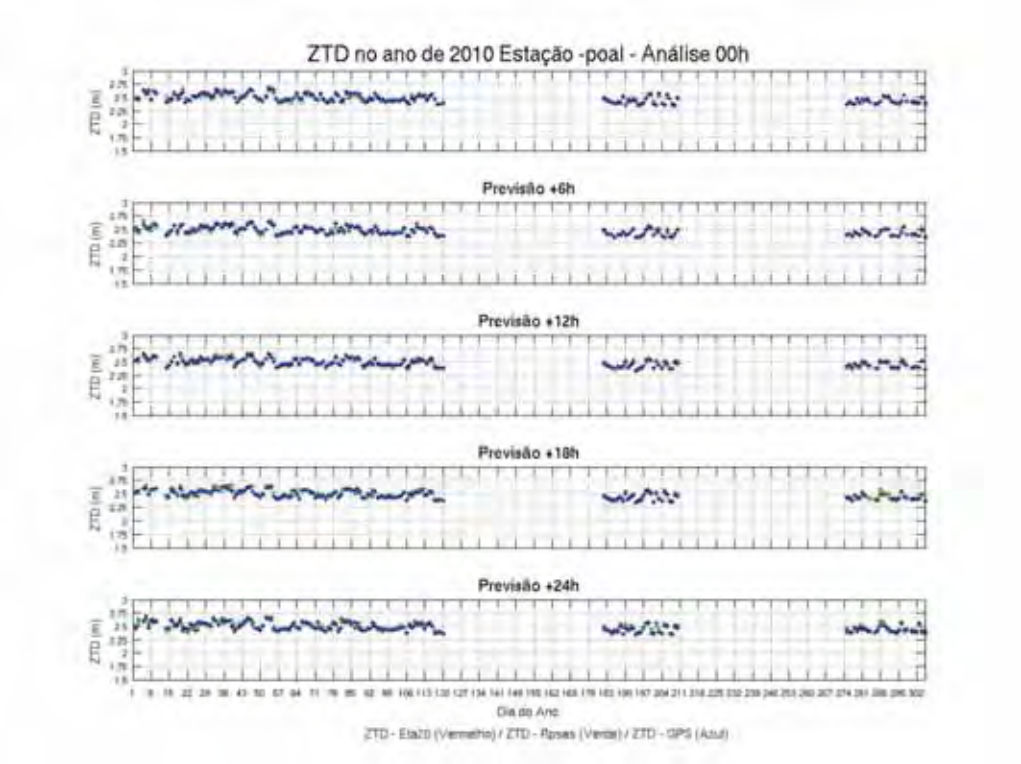


A2: Série temporal da estação NAUS em 2011.

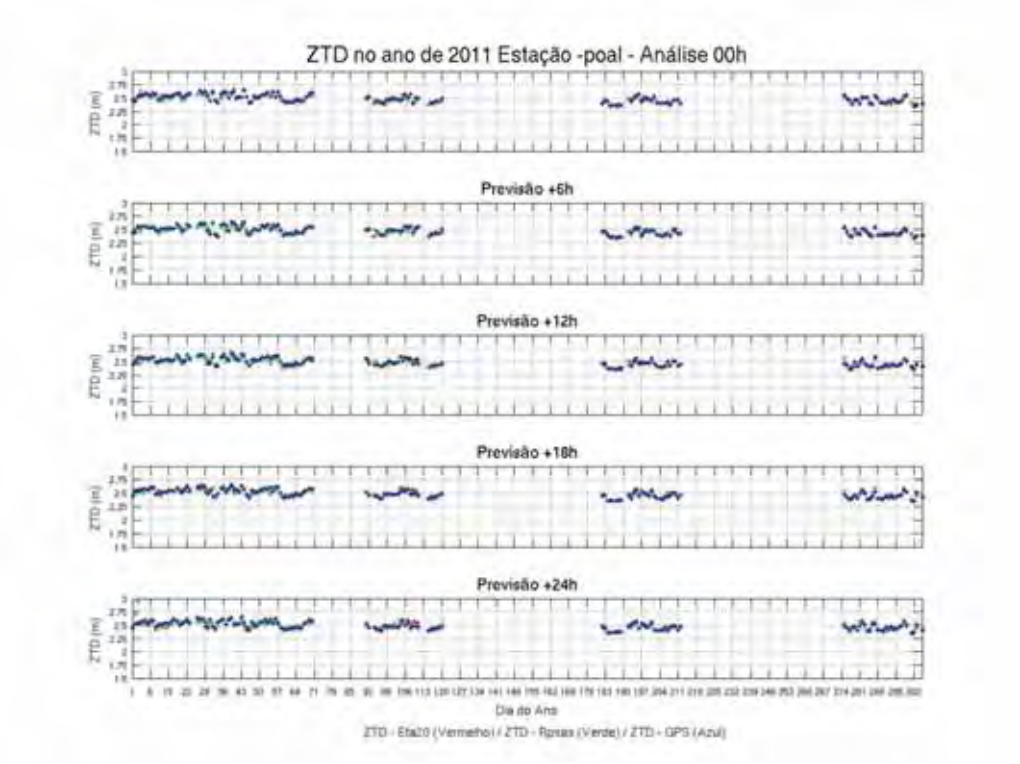


A3: Série temporal da estação NAUS em 2012.

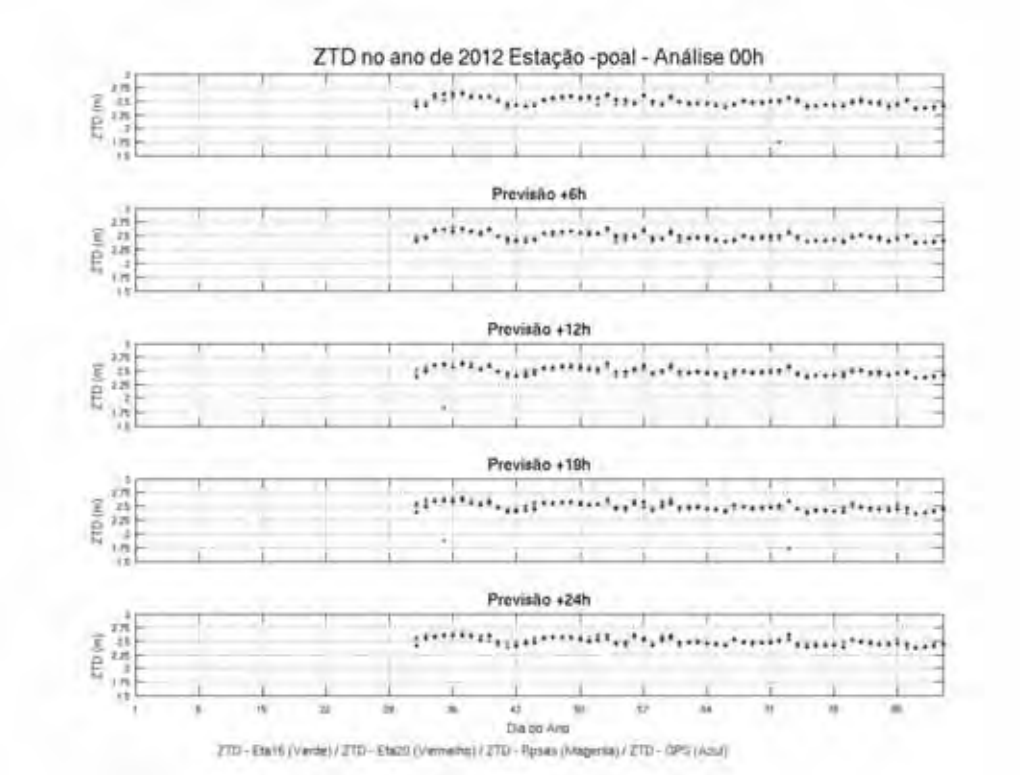
A estação apresenta valores de ZTD em uma variação de 2,5 a 2,7, ao longo do três anos com mesma variação e os modelos se comportam muito próximos aos valores de referência.



A4: Série temporal da estação POAL em 2010.

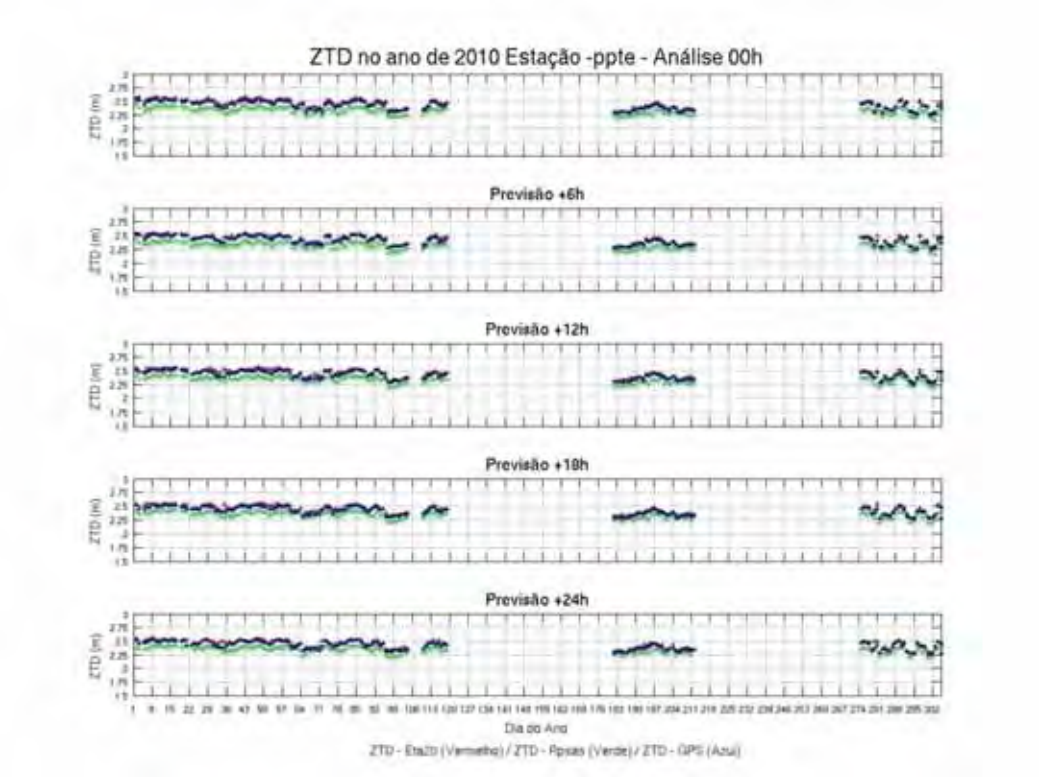


A5: Série temporal da estação POAL em 2011.



A6: Série temporal da estação POAL em 2012.

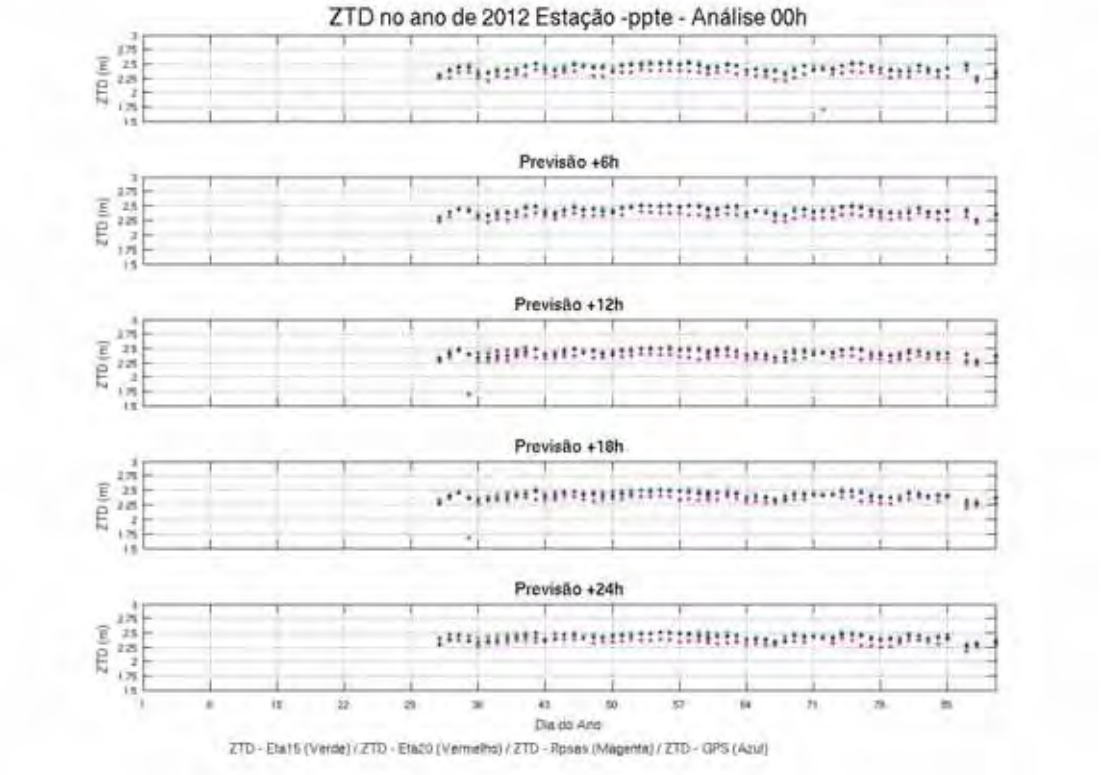
Na estação PPTE o atraso neutrosférico total varia me torno de 2,5 à 2,6 para o primeiro período da série, e nos períodos que se iniciam nos dias 183 e depois no dia 274, os valores são menos variando de 2,5 à 2,25, sendo que o modelo RPSAS apresenta os menores valores, comportamento que se mantém nos três anos.



A7: Série temporal da estação PPTE em 2010.

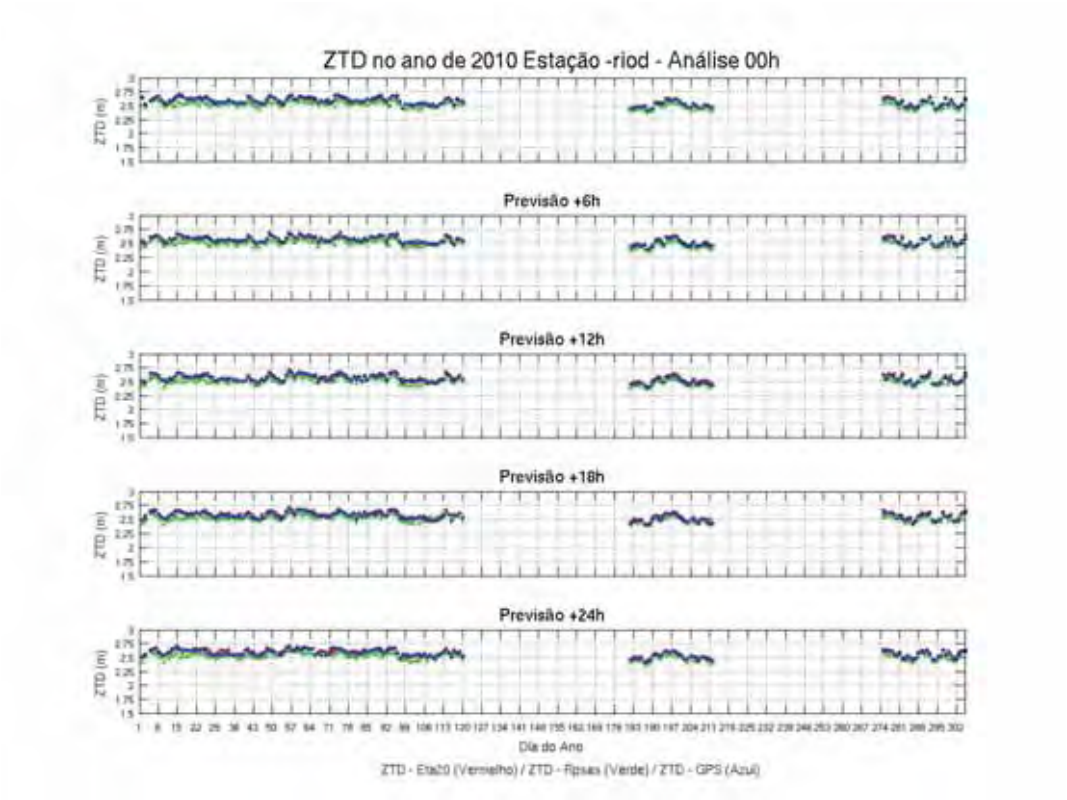


A8: Série temporal da estação PPTE em 2011.

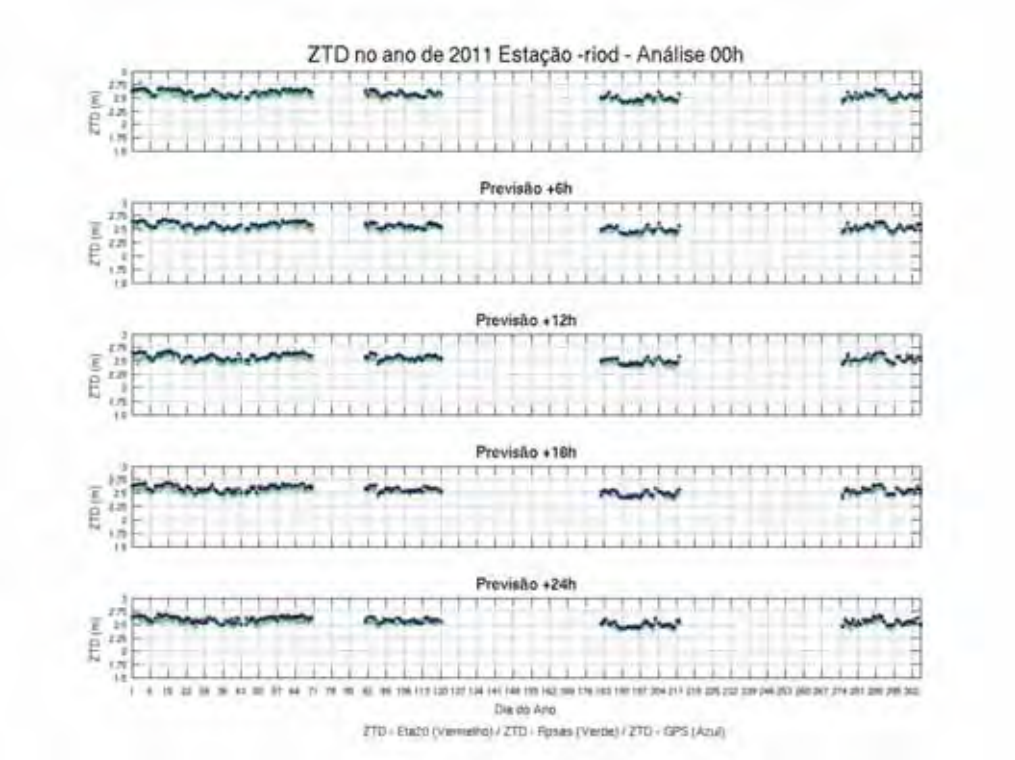


A9: Série temporal da estação PPTE em 2012.

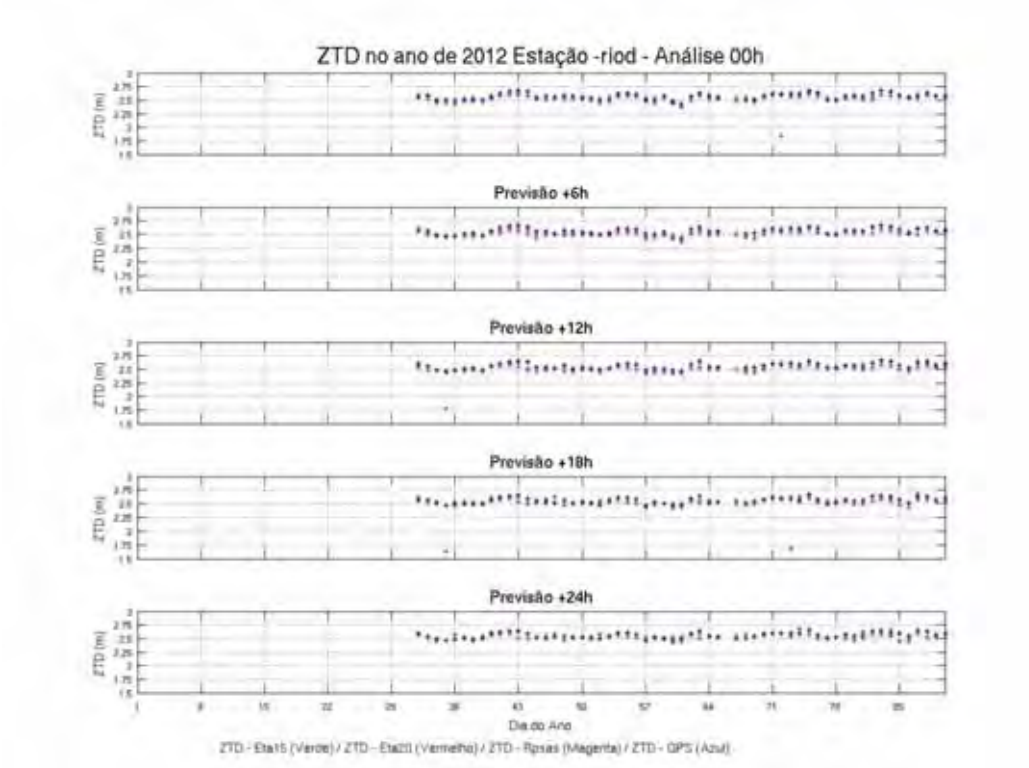
O ZTD na estação RIOD varia de 2,5 a 2,75 metros apresentando diminuição do valor em 15 centímetros para os dois últimos períodos, que se matem nos três anos. Os modelos com previsões bem próximas ao valor estimado, sendo que o RPSAS se apresenta menor no nível de centímetro.



A10: Série temporal da estação RIOD em 2010.

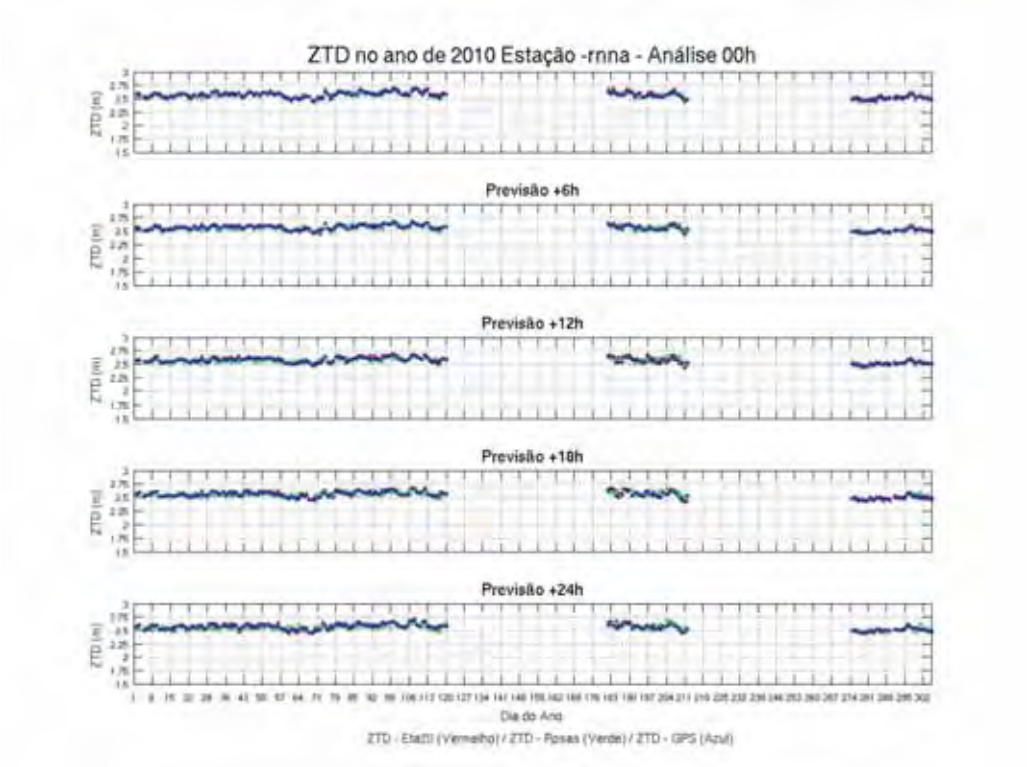


A11: Série temporal da estação RIOD em 2011.

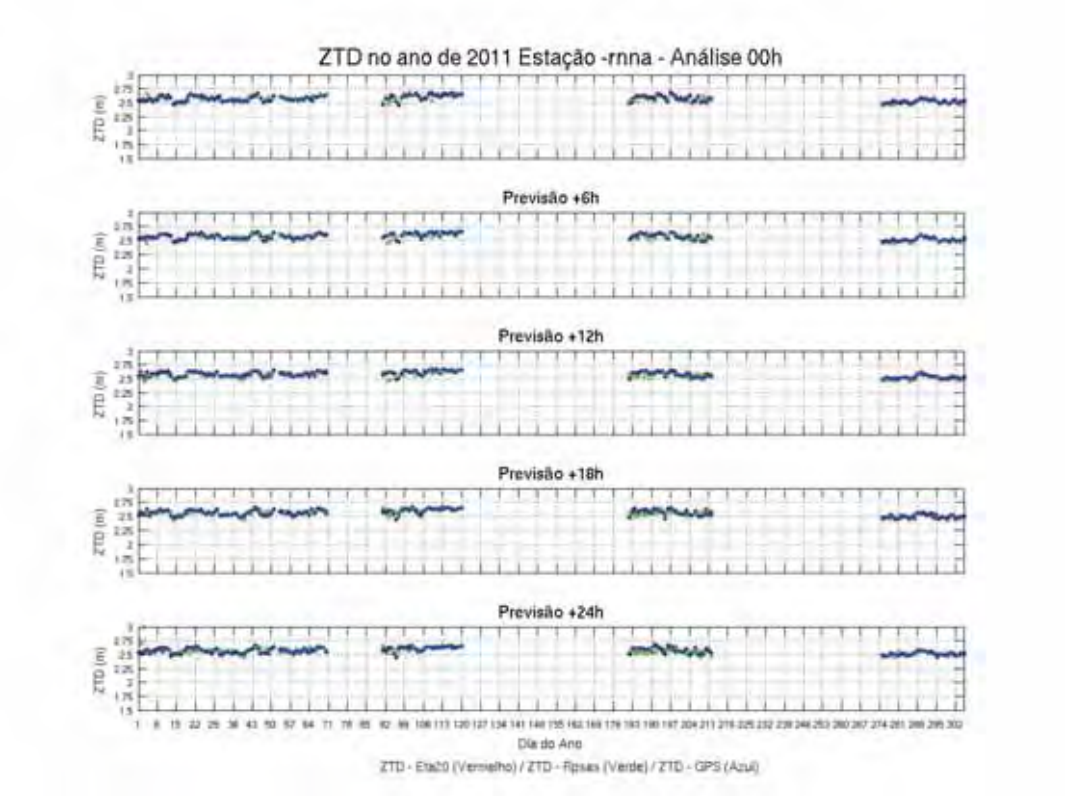


A12: Série temporal da estação RIOD em 2012.

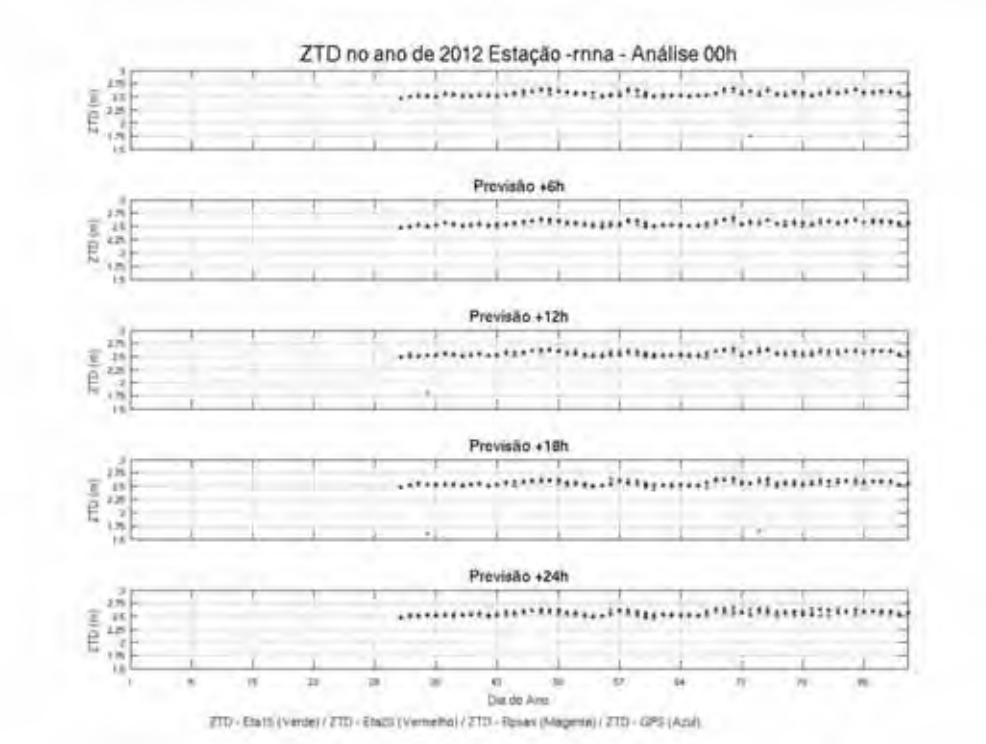
As séries da estação RNNA, com variação do ZTD da ordem 2,5 à 2,75 metros, atingindo seus valores máximos próximos aos dias 120 e 183. Os três modelos estão bem próximos ao ZTD estimado.



A13: Série temporal da estação RNNA em 2010.

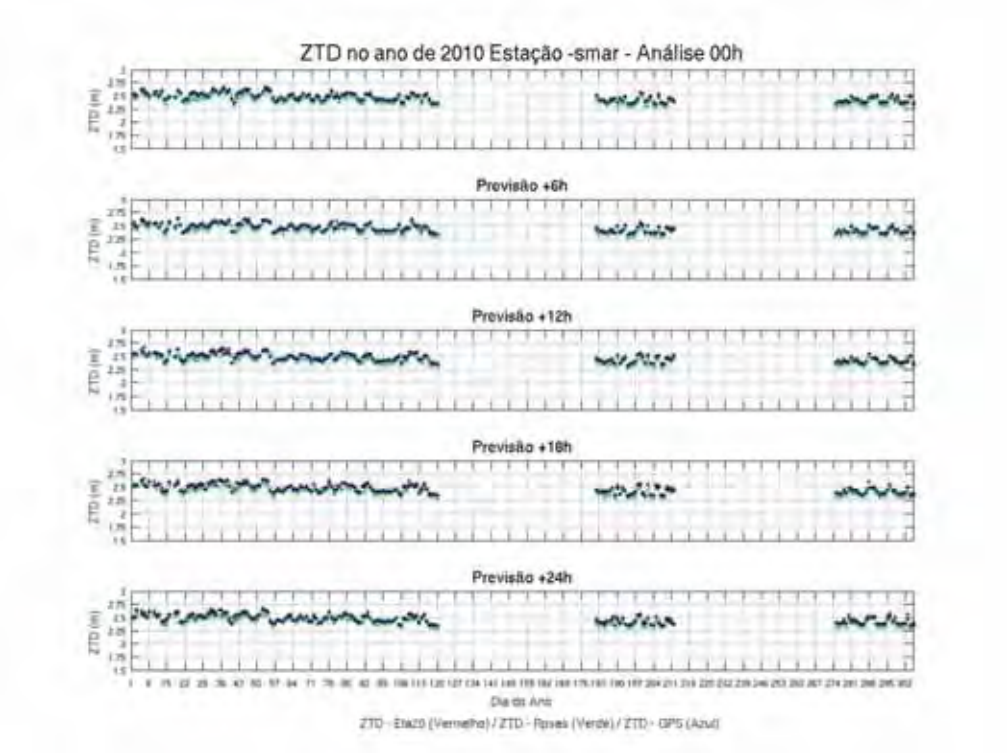


A14: Série temporal da estação RNNA em 2011.

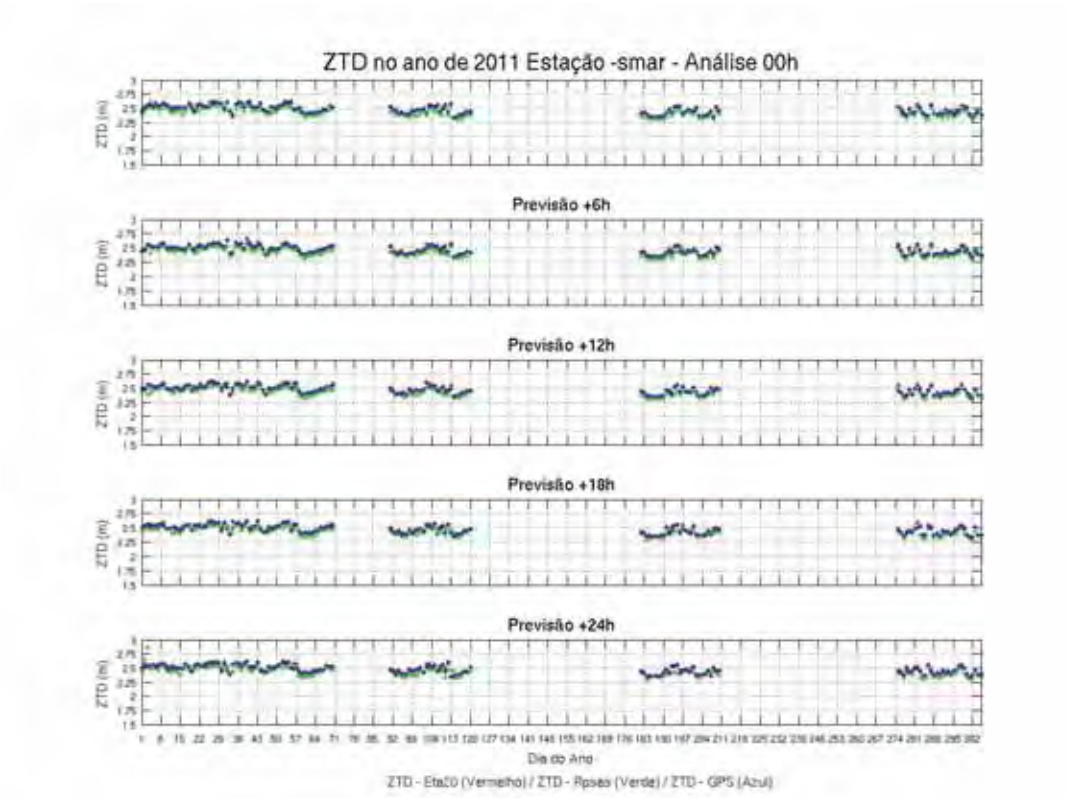


A15: Série temporal da estação RNNA em 2012.

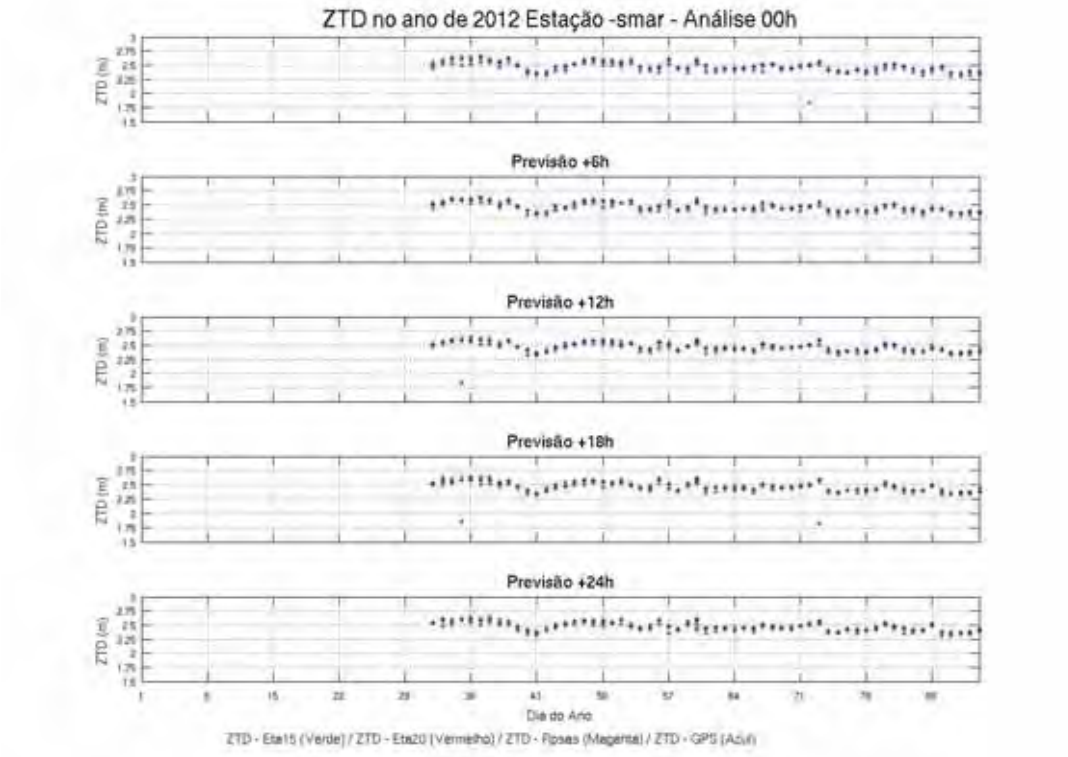
A estação SMAR tem uma variação do ZTD de 2,25 2,6, sendo os valores máximos no primeiro período das séries que se referem a Janeiro de cada ano. O modelo RPSAS apresenta pequena subestimação nos dois primeiros anos, mas em 2012 apresenta valores muito próximos ao do estimado.



A16: Série temporal da estação SMAR em 2010.



A17: Série temporal da estação SMAR em 2011.



A18: Série temporal da estação SMAR em 2012.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; SAPUCCI, L. F.; FERREIRA, S. H. S.; HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A. **Inclusão das Sondagens AIRS/AMSU no Sistema Global de Assimilação/Previsão de Tempo e do CPTEC/INPE: Estudo de Impacto.** Revista Brasileira de Meteorologia. V.23, p. 88-102, 2008.

ARAVÉQUIA, J. A.; MEDEIROS, M. D. S.; SOUZA, S. S.; HERDIES, D. L. **O uso da assimilação de dados LETKF como ferramenta de auxílio à previsão de tempo.** Anais. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia 2010. Belém.

BOEHM, J.: SCHUH.H. **Vienna mapping functions in VLBI analyses.** Geophys. Res. Lett., 31 L01603, doi:10.1029/2003GL018984. 2004.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera Para Uso em Posicionamento com Receptores de uma Freqüência. 1999. 191f. Tese** (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CPTEC – **Centro de Previsão Numérica de Tempo**. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/?i=br#>. Acessado em: 20/11/2011.

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, 1985.

ETA. Disponível em: <http://etamodel.cptec.inpe.br/>. Acessado em: 14/10/2011.

GONÇALVES. L. G. G. Uso **da técnica de relaxação de Newton para assimilação de dados de satélite em um modelo de área limitada.** 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; SAPUCCI, L. F.; MATTOS, J. G. Z. **Assimilação de dados no CPTEC/INPE.** Instituto Nacional de Pesquisa e Espaciais – INPE, v.1, 2007.

LANYI, G., **Tropospheric Delay Affecting in Radio Interferometry. Telecommunications and Data Acquisition Progress Rep. Jet Propulsion Laboratory Pasadena**. 1984. CA, April-June.

KINTER, J.L. *et al* **The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model**. Volume1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51, 1997. Calverton, USA.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. H. AQUINO, M. **Real Time Precise Point Positioning: Preliminary Results for the Brazilian Region.** In: Proceedings of EGU General Assembly, 2010. Viena, Austria.

MONICO, J. F. G.**Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.**1.ed. UNESP, 2008. São Paulo.

NIELL, A. E. **Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths.** Journal of Geophysical Research, v. 101, n.B2, 1996.

NIELL, A. E. **Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models.** Phys. Chem. Earth, v.26, 2001.

PACIONE, P.; PACE, B.; VESPE, F. **Combination Of Near Real-Time Tropospheric Parameters Observed By Gps.** Igs, 2010. Newcastle.

Previsão Numérica de Tempo. Disponível em: <http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/#>. Acessado em: 10/11/2011.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando** GPS. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. **PREDIÇÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NAAMÉRICA DO SUL PARA POSICIONAMENTO GNSS EMTEMPO REAL.** III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia.** Tese (Doutorado em Ciências

Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. **Previsões do atraso zenital troposférico para América do Sul: variabilidade sazonal e avaliação da qualidade.** II Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente, São Paulo, 2005.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA, R. A. F.. **Assimilação do IWV-GPS no Brasil: Otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 1000, 2007.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A.T. **Variabilidade Sazonal do Atraso Zenital Troposférico sobre a América do Sul.** II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, ROSA, G.P.S. **Avaliação das previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul obtidas usando modelo de Previsão Numérica de Tempo com alta resolução espacial.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 14, nº 4, 2008.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications.** 2nd completely revised and extended edition. Walter de Gruyter. Berlin, New York, 2003.