UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Campus de Presidente Prudente
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

GABRIEL OLIVEIRA JEREZ

ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS PARA POSICIONAMENTO SOB EFEITO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

PRESIDENTE PRUDENTE

2017

GABRIEL OLIVEIRA JEREZ

ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS PARA POSICIONAMENTO SOB EFEITO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

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

Orientadora: Dra. Daniele Barroca Marra Alves

PRESIDENTE PRUDENTE

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Jerez, Gabriel Oliveira.
J54a Análise da integração GPS/GLONASS para posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica / Gabriel Oliveira Jerez. - Presidente Prudente : [s.n.], 2017
155 f.

Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Posicionamento. 2. GPS/GLONASS. 3. Cintilação Ionosférica. I. Alves, Daniele Barroca Marra. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS PARA POSICIONAMENTO SOB EFEITO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

AUTOR: GABRIEL OLIVEIRA JEREZ
ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇOES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciencias e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciencias e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR
Campus Apucarana / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Presidente Prudente, 17 de março de 2017

DADOS CURRICULARES

Gabriel Oliveira Jerez

Nascimento	23/02/1990 – Presidente Prudente – SP
Filiação	Pedro Ângelo Jerez Ortiz
	Iara Maria Correia de Oliveira
2010 - 2014	Graduação
	Bacharelado em Engenharia Cartográfica
	Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2015 - 2017	Pós-Graduação
	Mestrado em Ciências Cartográficas
	Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

À minha grande irmã que durante essa minha pequena trajetória até aqui me mostrou a força que alguém pode ter diante de uma verdadeira batalha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a vida que me foi dada, as pessoas que tive e tenho o prazer de conviver e as oportunidades.

À minha família e amigos pelo apoio nas horas necessárias e compreensão nos momentos de ausência. Aos meus pais, Pedro e Iara, por todos os valores transmitidos e sacrifícios feitos para minha criação. Aos meus irmãos Mateus, Felipe e Ana, pela parceria e apoio em todos os momentos. Aos meus avós, Teresinha e Adelino, ao eterno vô Antônio (*in memoriam*), aos tios, Cema, Mauro e Bia, e padrinhos, Rodrigo e Gi.

Aos irmãos que a vida me deu, Dani e Fernando. Jéssica, irmã que tenho a sorte de ter por perto mesmo quando está longe. Carioca e Ju, amizade inexplicável, companheiras de todas as horas, nada disso teria graça ou sentido sem vocês.

À Raquel e à grande família, Érico, Simone e Cecília, que se tornaram tão importantes para mim em tão pouco tempo de convivência e que hoje vejo como parte da minha família.

Ao Gelo, ao João e ao Alemão, por me mostrarem que alguns amigos nem sempre falam a coisa certa na hora certa, e acabam demonstrando mais do que falando.

Aos grandes amigos que a UNESP me trouxe diretamente Vanessa, Guil, Sato, Bazan, Fernando, Nayanna e Rapha e, indiretamente, Pablo e Léo.

À melhor e mais mal humorada professora que tive, professora Cecília (*in memoriam*). Às companheiras do meu primeiro emprego, Aurivane, Aline Ruas, Aline Vasconcelos, à minha primeira chefe, Edith (*in memoriam*), e à grande amiga Selminha.

Ao Zé Carlos, pela conversa certa na hora certa e a sua família pela acolhida, saudades da convivência e das conversas com o seu Geraldo e a dona Claudete.

Aos meus primeiros orientadores na UNESP, Klaus e Elisa, e demais colegas de CPIDES, em especial Alisson, Janiele e Luiza.

Aos amigos Daiane, Pé, Mineiro, Lucas, Juh Farkuh, Hérida, Thatá, Carol, Camila, Nath, Débora e Xuxa, companheiros de diversas fases que passei nesse curto espaço de tempo.

Aos grandes professores Ana Maria e Mauro, pelos exemplos que são, e por me inspirarem a seguir esse caminho.

Aos companheiros de pós, em especial Samara, Rodrigo, Carol, Prol, Mayara, Stela, Tayná, Lucas, Emerson, Tobias, Cida e Zilda. À grande amiga Mari, pelo companheirismo principalmente na reta final. Aos amigos e “supervisores” Vini e Renan por

estarem sempre à disposição para ouvir, tirar dúvidas e dar sugestões. Ao Bruno e ao Ítalo pelo auxílio e solução de problemas sempre que solicitados. Ao Victor pelo auxílio nos experimentos. Aos professores Galera e Claudinei pelas valiosas contribuições. Aos membros do GEGE (Grupo de Estudos de Geodésia Espacial) pelas discussões. A todos os demais colegas de graduação e pós, professores e funcionários do Departamento de Cartografia. E, em especial, agradeço muito à minha orientadora, Daniele, pela confiança, paciência, companheirismo, generosidade e exemplo de sempre.

À UNESP, pela formação e estrutura oferecida. À CAPES pelo financiamento por meio de bolsa. Aos projetos CIGALA/CALIBRA, ao IBGE e ao IGS pela disponibilização de dados.

A todos que direta ou indiretamente participaram no desenvolvimento do meu conhecimento e deste trabalho. E, por fim, não poderia deixar de agradecer também às minhas fiéis companheiras que me ensinam sempre a ver a vida com outros olhos, Ayza, Tequila, Brahma, Maya, Lola, Nina e Juma.

“Consciousness is when we feel the suffering of every creature in our own hearts."

Bhagavad Gita

“I’d made it this far and refused to give up because all my life I had always finished the race."

Louis Zamperini

RESUMO

Com o desenvolvimento dos sistemas globais de navegação por satélite as atividades que envolvem posicionamento passaram por uma revolução. Os pioneiros, GLONASS (*GLObal NAvigation Satellite System*) e GPS (*Global Positioning System*), são atualmente os principais sistemas, e únicos com constelação completa. A utilização combinada de dados GPS e GLONASS passou por uma perda de interesse no final da década de noventa devido à rápida degradação que o GLONASS sofreu. Porém, em 2001 teve início um plano de restabelecimento do sistema que em 2011 voltou a contar com constelação completa de 24 satélites e cobertura global. O GLONASS passa ainda por um processo de modernização, com novas gerações de satélites sendo desenvolvidas, refinamentos dos sistemas de tempo e referência e novas estações de controle sendo instaladas. Além do uso de dados combinados, outros fatores que influenciam a qualidade do posicionamento são os métodos empregados e os erros aos quais os sinais transmitidos estão sujeitos. Nas metodologias de integração devem constar as diferenças de estrutura dos sistemas, sendo as principais, para este caso, os sistemas de referência, sistemas de tempo e a tecnologia relacionada às frequências. Em relação aos erros, a ionosfera é uma importante fonte, principalmente para usuários de receptores de apenas uma frequência. Ela exige atenção especial, pois além de degradar a acurácia do posicionamento há uma grande dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas, como a cintilação ionosférica. Na presente pesquisa buscou-se analisar as melhorias apresentadas no posicionamento utilizando dados combinados GPS/GLONASS sob efeito de cintilação ionosférica, avaliar a influência da cintilação nos sinais GLONASS e realizar um estudo da estrutura do sistema. Foram realizados três experimentos, relacionados à aplicação do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), do posicionamento relativo estático e do posicionamento em redes (especificamente no conceito de VRS – *Virtual Reference Station*). Para possibilitar o posicionamento em redes foi adaptada a ferramenta VRS-UNESP, para permitir a geração de bases virtuais com dados GLONASS ou GPS/GLONASS. Para as três metodologias foram selecionadas estações em três regiões do Brasil com comportamentos ionosféricos distintos visando possibilitar também a análise do efeito da cintilação. Para isso foram escolhidas regiões próximas ao equador geomagnético, próximas a área afetada pelo efeito fonte e ao sul do país, onde se tem menor influência da ionosfera. Para o PPP considerando-se todos os casos, independente da configuração, houve melhoria em 92,28% dos dias com o uso de dados GPS e GLONASS. Para o posicionamento relativo os resultados obtidos foram mais irregulares que para o PPP, sendo que a melhoria ocorreu em 69,18% dos casos. Os dados virtuais foram processados de maneira análoga ao experimento com PPP, obtendo melhoria em 100% os casos analisados ao se utilizar dados GPS e GLONASS.

Palavras-chave: Posicionamento, GPS/GLONASS, Cintilação Ionosférica.

ABSTRACT

With the development of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) the activities involving positioning passed by a great revolution. Currently, the pioneers, GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System) and GPS (Global Positioning System), are the main systems with full constellation. The interest in the combined use of GPS and GLONASS data had a great fall in the late nineties due to the fast degradation of GLONASS. However, in 2001 a restoration plan of the system began and in 2011 GLONASS recovered the full constellation of 24 satellites with global coverage. Furthermore GLONASS is going through a modernization process, with the development of new satellite generations, time and reference systems refinements and new control stations. Besides the use of combined data, other factors that influence the positioning quality are the applied methods and the errors that can affect the transmitted signals. The integration methodologies must consider the differences in the systems structures, the main differences, for this case, are reference and time systems and the technology related to the frequencies. About the errors, the ionosphere is an important source, mainly for users of single frequency receivers. It requires special attention, because besides of degrading the positioning accuracy there is a great dependency between the loss of signal and ionospheric irregularities, as ionospheric scintillation. In this research it was intended to analyze the improvement of the combined use of GPS/GLONASS data at positioning under ionospheric scintillation effect, evaluate the influence of scintillation at GLONASS signals and perform a study about the structure of the system. Three experiments were performed, the first one is related to the application of PPP (Precise Point Positioning), the second one is about static relative positioning and the third one is about network based positioning (specifically in the Virtual Reference Station concept).To enable the network based positioning the software VRS-UNESP was adapted, in order to allow the generation of virtual stations with GLONASS or GPS/GLONASS data. In the three methodologies were selected three regions of Brazil with distinct ionospheric behavior, in order to evaluate the scintillation effect in the positioning. It was selected regions near to the geomagnetic equator, regions near the fountain effect and in the south of the country, where the ionosphere effect is less intense. For the PPP, considering all the configurations adopted, there was improvement with the use of GPS and GLONASS combined data in 92,28% of the days analyzed. For the relative positioning the results obtained were more irregulars than the ones from PPP. In such case it was achieved improvement in 69,18% of the cases with the use of combined data. The virtual data were processed in a procedure similar to the one used in the PPP experiment. It was achieved improvement in 100% of the cases that were used GPS and GLONASS data.

Key-words: Positioning, GPS/GLONASS, Ionospheric Scintillation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Blocos de satélites GPS. 26
Figura 2 – Estações de controle GPS. 26
Figura 3 – Estações de controle no território da antiga União Soviética. 31
Figura 4 – Gerações dos satélites GLONASS. 34
Figura 5 – Evolução do número de satélites da constelação GLONASS. 35
Figura 6 – Representação do posicionamento por ponto. 38
Figura 7 – Representação do posicionamento relativo. 39
Figura 8 – Representação do conceito de VRS. 41
Figura 9 – Regiões ionosféricas. 44
Figura 10 – Influencia dos ventos solares no campo geomagnético. 44
Figura 11 – Ciclos solares. 45
Figura 12 – Estações da Rede CIGALA/CALIBRA. 51
Figura 13 – Índices S4 para estação FORT com 30 minutos. 52
Figura 14 – Índices S4 para estação PRU2 com 30 minutos. 52
Figura 15 – Índices S4 para estação POAL com 30 minutos. 52
Figura 16 – Índices S4 para estação FORT com 04 horas. 53
Figura 17 – Índices S4 para estação PRU2 com 04 horas. 53
Figura 18 – Índices S4 para estação POAL com 04 horas. 54
Figura 19 – Estação CEFT (A: Junho; B: Outubro). 55
Figura 20 – Estação ILHA (A: Junho; B: Outubro). 55
Figura 21 – Estação IMBT (A: Junho; B: Outubro). 55
Figura 22 – Distribuição das estações selecionadas para PPP. 57
Figura 23 – Tipo de dados dos processamentos realizados para cada estação (PPP). 58
Figura 24 – Resultados para 30 minutos estação CEFT. 60
Figura 25 – Resultados para 04 horas estação CEFT. 61
Figura 26 – Resultados para 30 minutos estação PPTE. 63
Figura 27 – Resultados para 04 horas estação PPTE. 64
Figura 28 – Resultados para 30 minutos estação POAL. 66
Figura 29 – Resultados para 04 horas estação POAL. 67
Figura 30 – Distribuição das estações de interesse selecionadas para posicionamento relativo. 73
Figura 31 – Região próxima ao equador geomagnético. 74

Figura 32 – Região afetada pelo efeito fonte. 74
Figura 33 – Região com menor atividade ionosférica. 74
Figura 34 – Processamentos realizados para cada estação (posicionamento relativo). 75
Figura 35 – Resultados para 30 minutos estação PBCG. 77
Figura 36 – Resultados para 04 horas estação PBCG. 78
Figura 37 – Resultados para 30 minutos estação SPDR. 80
Figura 38 – Resultados para 04 horas estação SPDR. 81
Figura 39 – Resultados para 30 minutos estação SCLA. 83
Figura 40 – Resultados para 04 horas estação SCLA. 84
Figura 41 – Distribuição das estações de interesse selecionadas para VRS. 92
Figura 42 – Região próxima ao equador geomagnético. 93
Figura 43 – Região afetada pelo efeito fonte. 93
Figura 44 – Região com menor atividade ionosférica. 93
Figura 45 – Processamentos realizados para cada estação (posicionamento em redes). 94
Figura 46 – Resultados para 30 minutos estação PBJP. 96
Figura 47 – Resultados para 30 minutos estação SPDR. 97
Figura 48 – Resultados para 30 minutos estação SCFL. 98
Figura 49 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação PBJP (A: Junho; B: Outubro). 99
Figura 50 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação SPDR (A: Junho; B: Outubro). 99
Figura 51 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação SCFL (A: Junho; B: Outubro). 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Status Constelação GPS em 21/02/17..... 26
Tabela 2 – Dados das ondas portadoras L1, L2 e L3. 28
Tabela 3 – Frequências dos satélites nas portadoras L1, L2 e L3. 29
Tabela 4 – Parâmetros de transformação para o PZ–90.11. 33
Tabela 5 – Status Constelação GLONASS em 21/02/17. 36
Tabela 6 – Classificação do índice S4 48
Tabela 7 – Classificação do índice σ_ϕ 48
Tabela 8 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria (PPP). 69
Tabela 9 – Porcentagens de dias com melhorias para PPP 70
Tabela 10 – Médias das componentes em sistema geodésico local (PPP). 71
Tabela 11 – Desvios padrão das médias das componentes em SGL (PPP). 72
Tabela 12 – Linhas de bases formadas. 75
Tabela 13 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria (Relativo). 86
Tabela 14 – Porcentagens de dias com melhorias para Relativo. 86
Tabela 15 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria com exclusão de dados muito discrepantes (Relativo). 88
Tabela 16 – Porcentagens de dias com melhorias para Relativo com exclusão de dados muito discrepantes. 88
Tabela 17 – Médias das componentes em sistema geodésico local (Relativo). 89
Tabela 18– Desvios padrão das médias das componentes em SGL (Relativo). 90
Tabela 19 – Distâncias entre estações base e VRS. 94
Tabela 20 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e médias de melhoria (VRS). 100
Tabela 21 – Médias das componentes em sistema geodésico local (VRS). 100
Tabela 22 – Desvios padrão das médias por componente em SGL (VRS). 101

LISTA DE SIGLAS

BIPM	*Bureau International des Poids et Mesures*
CALIBRA	*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CIGALA	*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for professional GNSS in Latin America*
DD	Dupla Diferença
DOP	*Dilution of Precision*
DORIS	*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*
EMQ	Erro Médio Quadrático
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
GBAS	*Ground-Based Augmentation System*
GLONASS	*GLObal NAtigation Satellite System*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GPS	*Global Positioning System*
IAG	*International Association of Geodesy*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	*International Earth Rotation and Reference Systems Service*
IFB	*Inter-frequency bias*
IGEX	*International GLONASS EXperiment*
IGLOS	*International GLONASS Service*
IGS	*International GNSS Service*
ION	*Institute of Navigation*
IONEX	*IONosphere map EXchange format*
ITEP	Instituto de TEcnologia de Pernambuco
ITRF	*International Terrestrial Reference Frame*
JPL	*Jet Propulsion Laboratory*
LAMBDA	*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*
NRCan	*Natural Resources Canada*
P	*Precise or Protected*
PE	*Parameters of the Earth*

PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRN	*Pseudo Random Noise*
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	*Receiver INdependet EXchange format*
ROT	*Rate Of* TEC
ROTI	*ROT Index*
RTCM	*Radio Technical Commision for Marine Services*
RTK	*Real-Time Kinematic*
PZ	*Parametry Zemli*
SA	*Selective Availability*
SBAS	*Satellite-Based Augmentation System*
SGL	Sistema Geodésico Local
SGN	*Space Geodetic Network*
SIRGAS	SIstema de Referência Geocêntrico para as AmericaS
SGS	*Sovietic Geodetic System*
TAI	Tempo Atômico Internacional
TEC	*Total Electron Content*
TECU	*TEC Unit*
TEQC	*Translation, Editing and Quality Checking*
TBC	*Trimble Business Center*
TU	Tempo Universal
USNO	*United State Naval Observatory*
UTC	*Universal Time Coordinated*
VRC	*Virtual Reference Cell*
VRS	*Virtual Reference Station*
WGS	*World Geodetic System*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVOS 20
1.2 JUSTIFICATIVA 21
1.3 CONTEUDO DA DISSERTAÇÂO 22

2 POSICIONAMENTO GNSS 24
2.1 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE 24
2.1.1 GPS 24
2.1.2 GLONASS 27
2.1.2.1 Modernização e perspectivas futuras 33
2.2 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO 37
2.2.1 Posicionamento por ponto 37
2.2.2 Posicionamento relativo 39
2.2.3 Posicionamento em redes no conceito de VRS 40

3 EFEITO IONOSFÉRICO 43
3.1 IONOSFERA 43
3.2 CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA 46
3.3 ÍNDICESDE IRREGULARIDADE E DE CINTILAÇÃO 47

4 CARACTERIZAÇÃO DOS DIAS ANALISADOS 50
4.1 IONOSFERA 50
4.2 MULTICAMINHO 54

5 EXPERIMENTOS 57
5.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO 57
5.1.1 Metodologia 57
5.1.2 Resultados e análises 59
5.2 POSICIONAMENTO RELATIVO 73
5.2.1 Metodologia 73
5.2.2 Resultados e análises 76
5.3 POSICIONAMENTO EM REDES NO CONCEITO DE VRS 91
5.3.1 Metodologia 92
5.3.2 Resultados e análises 95
5.4 CONSIDERAÇÕES 102

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 107

BIBLIOGRAFIA 112

APÊNDICE A – ÍNDICES PHI60 113
APÊNDICE B – ÍNDICES ROTI 116
APÊNDICE C – ÍNDICES MP1 E MP2 127
APÊNDICE D – RESULTADOS DO PPP EM SGL 138
APÊNDICE E – PROBLEMAS PROCESSAMENTO RELATIVO 144
APÊNDICE F – RESULTADOS RELATIVO EM SGL 145
APÊNDICE G – ADAPTAÇÃO DO SISTEMA VRS-UNESP 151
APÊNDICE H – RESULTADOS PPP COM VRS E RBMC EM SGL 153

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos Sistemas de Navegação Global por Satélite, ou GNSS (*Global Navigation Satellite System)*, as atividades que envolvem posicionamento passaram por uma verdadeira revolução. Desenvolvidos de forma simultânea e independente, a partir da década de setenta, o russo GLONASS (*GLObal NAvigation Satellite System*) (https://glonass-iac.ru/en/) e o americano GPS (*Global Positioning System*) (http://gps.gov/) são, atualmente, os principais sistemas de navegação por satélite e os únicos a dispor de constelações completas, permitindo cobertura global. Além desses, encontram-se em desenvolvimento ainda o europeu Galileo (http://galileoic.org/) e o chinês BeiDou (http://beidou.gov.cn/).

A partir da obtenção de constelação completa pelos dois principais sistemas em 1995, a utilização de dados combinados gerou grande interesse devido ao número de satélites disponíveis que os dois sistemas podiam oferecer (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; LEICK, 2004). O maior número de satélites visíveis tem importância devido à quantidade de observações disponíveis, principalmente quando são levados em conta intervalos de coleta curtos. Porém, o GLONASS passou por um longo período de degradação devido à falta de investimentos e curta vida útil dos primeiros satélites. Com isso, o sistema chegou a contar com constelação de seis a oito satélites disponíveis em alguns períodos de 2001 (FEAIRHELLER e CLARK, 2006). Já o GPS, além de se manter em funcionamento ao longo desse período, no ano 2000 deixou de utilizara a técnica SA (*Selective Availability*), que degradava o posicionamento intencionalmente. Com a extinção da mesma a precisão no posicionamento melhorou em torno de dez vezes (MONICO, 2008).

Com este cenário, grande parte das pesquisas desenvolvidas se concentrou na aplicação dos dados do sistema GPS, uma vez que com a constelação incompleta do GLONASS, a utilização de seus dados oferecia resultados variáveis e, muitas vezes insatisfatórios, principalmente devido à instabilidade do número de satélites visíveis durante o período de coleta, como apresentado em alguns resultados de Polezel (2010) e Bruyninx (2007). Porém, após esse período de degradação do GLONASS teve início, a partir de 2001, um plano de restabelecimento e modernização do sistema, garantindo primeiramente a cobertura completa do território russo e, posteriormente, cobertura global (FEAIRHELLER e CLARK, 2006). No processo de modernização novas gerações de satélites começaram a ser desenvolvidas e novas estações de monitoramento passaram a ser instaladas em todo o globo, a partir de parcerias do governo russo com diversos países. Em 2011 o GLONASS restabeleceu sua constelação, completando 24 satélites operacionais, e alcançando novamente

cobertura global. Desde então, exceto em dias com manutenção de satélites, o sistema se mantém com a constelação completa e operacional.

Independente do tipo de posicionamento realizado, a partir da disponibilidade de dois sistemas, a análise das metodologias envolvidas na integração dos mesmos se torna importante para possibilitar a investigação da melhoria que se pode obter. Isso porque com dois sistemas o número de satélites visíveis é maior, permitindo melhoria na geometria dos mesmos, aumentando o número de observações, além de possibilitar, por exemplo, a verificação da qualidade das informações fornecidas.

Visando a análise da qualidade do posicionamento, também é de fundamental importância realizar investigações relativas às fontes de erros aos quais os sinais GNSS estão sujeitos. Do satélite ao receptor GNSS, o sinal transmitido pode sofrer diversas formas de influência e degradação. Existem erros relacionados ao satélite, à propagação do sinal, ao receptor e à própria estação. A atmosfera, em particular, tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, sendo a ionosfera uma das principais fontes de degradações e erros principalmente para usuários de receptores de uma frequência (CAMARGO, 1999).

Por não ser um meio regular, a ionosfera é responsável por diversas anomalias que podem causar diversos tipos de influência e degradação do sinal GNSS, entre estas a cintilação. A cintilação ionosférica corresponde a flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio em decorrência de sua propagação em uma região com irregularidades na densidade de elétrons. Ela pode causar o enfraquecimento do sinal recebido pelos receptores levando, em muitos casos, à perda do sinal (MENDONÇA, 2013; CONKER et al., 2003).

A cintilação tem relação com a atividade magnética, estação do ano, ciclos solares e localização geográfica, sendo mais intensa nas regiões equatoriais (onde se situa grande parte do território brasileiro), menos intensa nas latitudes médias e seguindo comportamento menos previsível nas altas latitudes. Nas regiões equatoriais os efeitos da ionosfera são relacionados à anomalia equatorial com intensidade maior no pico local da anomalia (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Isso faz com que o Brasil se encontre em uma região privilegiada para estudos sobre esse tema, uma vez que grande parte de seu território encontra-se na região equatorial, fortemente afetada por esses efeitos.

Por ter se estabelecido e disseminado primeiro, diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de analisar os dados provenientes do GPS, seja no emprego de métodos de posicionamento, como em Ge et al. (2008), Marques (2008), Alves e Monico (2011) e Kermarrec e Schon (2016), ou em relação aos efeitos da ionosfera sobre o mesmo, como em Skone (2001), Matsuoka (2007), Hernández-Pajares et al. (2011) e Caldeira (2016).

Com o GLONASS existem ainda muitas investigações a serem realizadas, o que tem ocorrido em alguns trabalhos desenvolvidos recentemente. Pinto (2012) investigou o impacto do uso de dados GPS e GLONASS no georreferenciamento de imóveis rurais, encontrando melhoria na utilização dos dados do GLONASS com GPS. Pan et al. (2014) investigou a utilização de dados combinados para o posicionamento por ponto preciso (PPP) com solução fixa das ambiguidades GPS, também encontrando melhoria com a utilização de dados GLONASS, se comparado ao desempenho do GPS sozinho. Mais recentemente Ventorim e Dal Poz (2016) fizeram estudos aplicando o PPP para algumas estações da rede IGS (*International GNSS Service*), alcançando resultados mais acurados com o uso de dados GPS e GLONASS integrados. A partir da nova realidade do GLONASS trabalhos como esses se fazem necessários para verificar a relevância da utilização dos dados do sistema após seu processo de modernização e restabelecimento de sua constelação.

Neste sentido, a presente pesquisa teve como intuito investigar a viabilidade da integração de dados GPS e GLONASS para o posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica. Para isso foram aplicados três métodos de posicionamento, dois a partir de ferramentas já disponíveis (uma de forma *online* e outra comercial) e o terceiro em um sistema científico, no qual implementações foram realizadas para preparar o mesmo para a utilização de dados GLONASS.

Foi analisada ainda a influência da ionosfera no posicionamento, sendo que para isso foram utilizados dados de estações de regiões brasileiras que apresentam diferentes comportamentos ionosféricos, e considerando períodos do ano com menor e maior atividade ionosférica. Além disso, investigou-se a influência da cintilação ionosférica nos sinais GPS e GLONASS, a partir da análise de índices de irregularidade e cintilação ionosférica, obtidos a partir de dados das próprias estações utilizadas e a partir de consultas ao banco de dados da Rede CIGALA/CALIBRA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for professional GNSS in Latin America* / *Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionopheric disturbances in BRAzil*), que possui estações de monitoramento da ionosfera.

1.1 OBJETIVOS

A presente dissertação teve como objetivo realizar estudos sobre a viabilidade da utilização de dados combinados GPS/GLONASS para posicionamento, além

de analisar a influência da cintilação ionosférica sobre o mesmo. A partir desses objetivos têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a estrutura e o estado da arte do GLONASS;

- Analisar a viabilidade do uso de dados combinados GPS/GLONASS no posicionamento por ponto preciso e no posicionamento relativo;

- Analisar a viabilidade do uso de dados combinados GPS/GLONASS no posicionamento em redes, especificamente no conceito de estação virtual de referência;

- Implementar uma versão do sistema VRS-UNESP que possibilite a utilização de dados GLONASS e GPS/GLONASS;

- Analisar a qualidade dos resultados advindos de dados combinados GPS/GLONASS no posicionamento em períodos de ocorrência de fraca e forte cintilação ionosférica;

- Avaliar a influência da cintilação ionosférica nos sinais GLONASS por meio do índice S4.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde 2011 o GLONASS passou a contar com constelação completa, voltando a oferecer cobertura global. Com o projeto de modernização do sistema novos satélites foram lançados, novas gerações foram desenvolvidas, outras estão em desenvolvimento, foram realizados refinamentos nos sistemas de referência e tempo, e por meio de parcerias com outros países estão sendo implantadas novas estações terrestres de monitoramento do sistema. Um dos países em parceria com a Rússia é o Brasil, que recebeu a primeira estação terrestre fora da região da antiga União Soviética. Com essa nova realidade do sistema, se faz necessária a validação da utilização desses dados disponíveis, bem como o aprofundamento de estudos como os já realizados anteriormente para os dados provenientes do sistema GPS.

Outra justificativa deste projeto é dar continuidade a projetos já iniciados no Brasil, como os relacionados ao RTK (*Real-Time Kinematic*) em rede. Desde 2004 a orientadora da presente dissertação investiga, desenvolve e avalia o posicionamento baseado em redes, inicialmente com a pesquisa de doutorado (Processo FAPESP: 2003/12771-0) e posteriormente pós-doutorado (Processo FAPESP: 2008/06499-9), que finalizou em 12/2011. Na realização desses projetos foi desenvolvida uma ferramenta que realiza o RTK em rede denominada sistema VRS-UNESP. Porém, nesse sistema utilizavam-se apenas dados do GPS,

no decorrer dessa pesquisa foi implementada uma versão da ferramenta que possibilita a aplicação do posicionamento em redes para dados GLONASS e dados GPS e GLONASS.

Além disso, um dos temas da dissertação, cintilação ionosférica, está associado a outros projetos em desenvolvimento com apoio financeiro de agências brasileiras de fomento à pesquisa. Podendo-se citar, por exemplo, o projeto Regular FAPESP intitulado "Avaliação robusta do impacto da modelagem atmosférica no Posicionamento Baseado em Redes" processo 2012/19906-7, o projeto Universal CNPq intitulado "Análise da Cintilação e Demais Efeitos Ionosféricos no Posicionamento GNSS" processo 470112/2012-3, ambos coordenados pela orientadora desse projeto. Além desses tem-se ainda o projeto internacional CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*) do qual a orientadora foi integrante. Por meio desse projeto é fornecido um banco de dados que permite avaliar a cintilação ionosférica no Brasil através de índices de irregularidades obtidos por receptores da rede CALIBRA em território nacional (http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/cigala/). Com esse banco de dados, diversas análises já foram realizadas para o GPS, mas no que se refere ao GLONASS muitas investigações são ainda possíveis.

Finalizando, diversas aplicações GNSS dependem do método empregado e do tempo de determinação da posição, portanto, melhorias na qualidade do posicionamento são de grande importância para a comunidade geodésica e para os demais usuários de tecnologias GNSS. Além de validar a utilização de dados combinados GPS/GLONASS, este estudo buscou um melhor entendimento do sistema russo bem como do comportamento de seus sinais sob a influência da cintilação ionosférica.

1.3 CONTEUDO DA DISSERTAÇÂO

A presente dissertação é composta de seis capítulos estruturados conforme descrição a seguir.

No capítulo 2 são apresentadas as características dos dois principais sistemas que compõe o GNSS, o GPS e o GLONASS, abordando seus principais segmentos. Além disso, é dado enfoque à modernização do GLONASS e apresentadas algumas perspectivas futuras. Ainda no mesmo capítulo são apresentados os métodos de posicionamento por ponto, relativo e baseado em redes, que foram aplicados nos experimentos do presente trabalho.

No capítulo 3 são abordados alguns conceitos fundamentais da ionosfera e da cintilação ionosférica, apresentando alguns fatores de influência e os índices ROTI, σ_ϕ e S4, um dos mais utilizados para indicação de ocorrência de cintilação.

O capítulo 4 apresenta a caracterização dos dias analisados em relação ao efeito ionosférico e aos índices de multicaminho das estações utilizadas. Já no capítulo 5 são apresentadas as metodologias, os resultados e análises dos três experimentos realizados na pesquisa, sendo o primeiro relacionado ao PPP, o segundo ao posicionamento relativo estático e o terceiro ao posicionamento em redes, utilizando o conceito de estação virtual.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas algumas considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2 POSICIONAMENTO GNSS

No presente capítulo são apresentadas as principais características dos sistemas GPS e GLONASS, com ênfase à evolução e modernização do GLONASS. Além disso, são abordados os principais conceitos relacionados aos métodos de posicionamento empregados nos experimentos desenvolvidos nessa dissertação.

2.1 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

Os sistemas de navegação global por satélite começaram a ser desenvolvidos na década de setenta, com a finalidade de determinação de posição em qualquer localidade do planeta independente de condições meteorológicas (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Desenvolvidos de maneira concomitante e independente, o GPS e o GLONASS foram os sistemas pioneiros e são os únicos a dispor de constelação completa atualmente.

O GNSS compreende, além dos já citados GPS e GLONASS, mais dois sistemas em desenvolvimento, o Galileo e o BeiDou, de responsabilidade da União Européia e da China respectivamente. E, ainda, os sistemas de aumento baseados em satélites (SBAS - *Satellite-Based Augmentation System*) e em estações terrestres (GBAS - *Ground-Based Augmentation System*). Atualmente (fevereiro de 2017) o Galileo encontra-se com 18 satélites em órbita, dos quais 11 encontram-se operacionais, um está indisponível, dois em fase de testes e quatro encontram-se em fase de comissionamento, que devem entrar em funcionamento em breve (GALILEO, 2017). O BeiDou em 01 de fevereiro de 2016 lançou seu quinto satélite de média órbita, além dos demais satélites (geoestacionários e geossíncronos) pertencentes ao segmento de cobertura regional do sistema. Até 2018 a China planeja lançar mais 18 satélites em órbita, em um total de 40 até 2020 (GPS WORLD, 2016e; INSIDE GNSS, 2016). A seguir são apresentados mais detalhes dos sistemas GPS e GLONASS, que foram utilizados no presente estudo.

2.1.1 GPS

O GPS é o sistema de navegação por satélite desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos com o principal objetivo de servir as forças armadas americanas. É mais conhecido que o concorrente russo, entre outros motivos, por não ter sofrido períodos de degradação e ter tido seu uso mais difundido, tendo conseguido se

estabilizar desde que se tornou operacional.

O GPS em sua concepção original consiste em uma constelação de no mínimo 24 satélites, distribuídos em seis planos orbitais inclinados 55º em relação ao equador. A altitude média é de 20.200 km e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Começou a ser desenvolvido em 1973, sendo declarado operacional em 1995, quando contava com 24 satélites operacionais (SEEBER, 2003).

Em relação às frequências, é utilizada a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem na mesma frequência (L1= 1.575,42 MHz, L2= 1.227,60 MHz e L5 = 1.176,45 MHz) e a identificação é dada por um código atribuído a cada satélite, o PRN (*Pseudo Random Noise*). As informações de posição dos satélites são disponíveis a partir das efemérides. As efemérides transmitidas GPS trazem as coordenadas dos satélites transformadas em elementos keplerianos, que demandam menor espaço de memória (MONICO, 2008). As efemérides precisas (ultra-rápidas, rápidas e finais) são de responsabilidade do IGS, que reúne os dados de diversos centros de análise para produzir os arquivos.

Ao longo dos anos o GPS passou por projetos de modernização, tanto dos centros de controle quanto dos blocos de satélites. Entre as mudanças ocorridas, uma das principais foi a extinção, a partir do dia 02 de maio de 2000, do uso da SA, que degradava os sinais transmitidos para uso civil como forma de segurança (MONICO, 2008). Além desta mudança houve também a adição de mais sinais para uso civil. Inicialmente o sistema possuía apenas as portadoras L1 e L2, sendo que a L2 transmitia apenas o código P (*Precise or Protected* - Preciso ou Protegido), reservado para uso dos militares norte-americanos e usuários autorizados (SEEBER, 2003). Como resultado dos projetos de modernização, a partir do Bloco IIR-M a portadora L2 passou a transmitir o sinal civil L2C. Além disso, uma nova portadora (L5) foi desenvolvida na geração do Bloco IIF, com o sinal civil L5C, nesta geração a vida útil dos satélites foi estendida de sete anos e meio para doze anos. Hoje (fevereiro/2017) existem 19 satélites transmitindo L2C e 12 com portadora L5 (GPS, 2017). A Figura 1 apresenta os blocos de satélites desenvolvidos até o momento e a mais recente geração, GPS III, em desenvolvimento.

Figura 1 – Blocos de satélites GPS.

Fonte: <http://www.gps.gov/systems/gps/space>.

Vale lembrar que os códigos civis obtidos ao longo das modernizações foram mantidos, além dos implementados a cada novo bloco lançado. Atualmente (fevereiro de 2017) o GPS conta com uma constelação de 32 satélites, dos quais 31 estão em operação, conforme Tabela 1.

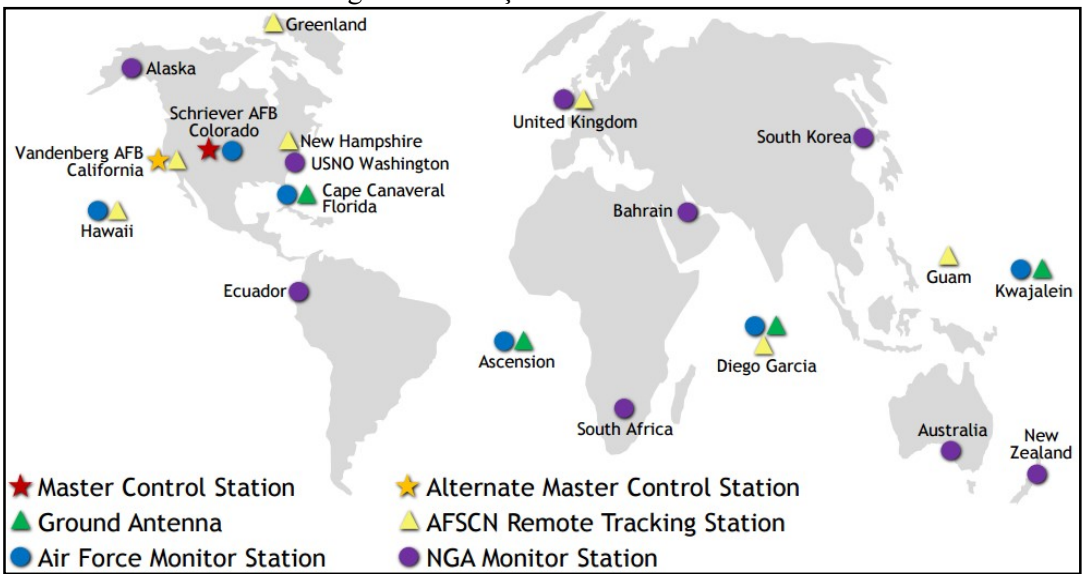
Tabela 1 – Status Constelação GPS em 21/02/17.

Total de satélites na Constelação	**32**
Operacional	31
Em fase de comissionamento	-
Em manutenção	01
Em fase de descomissionamento	-

Fonte: Adaptado de <https://glonass-iac.ru/en/GPS/>.

Na Figura 2 é apresenta a distribuição das estações de controle do GPS por tipo de estação, sendo a estação de controle central localizada em Colorado. Além desta existe ainda uma estação alternativa de controle máximo, onze antenas de controle e comando e quinze estações de monitoramento (GPS, 2017).

Figura 2 – Estações de controle GPS.



Fonte: < http://www.gps.gov/multimedia/images/GPS-control-segment-map.pdf>.

As estações monitoras coletam os sinais dos satélites e, a partir desses dados, determinam as pseudodistâncias para todos os satélites visíveis, transmitindo então essas informações para a estação de controle central junto com informações meteorológicas locais. A partir desses dados a estação central calcula as posições dos satélites e o comportamento dos relógios dos mesmos, gerando os arquivos com as informações de navegação que serão enviados aos satélites por meio das antenas terrestres para então serem transmitidos aos usuários (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; SEEBER, 2003).

O sistema de referência utilizado é o WGS (*World Geodetic System*), desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos a partir da década de sessenta com o objetivo de estabelecer um sistema de referência geodésico terrestre. O sistema de tempo GPS é baseado em relógios atômicos das estações de controle, tendo como origem o dia 06 de janeiro de 1980, 00h UTC (*Universal Time Coordinated*). O tempo GPS não é incrementado pelos saltos de segundos e a diferença com o TAI (Tempo Atômico Internacional) é de 19 segundos. A diferença entre o UTC e o tempo GPS é disponibilizada pelo USNO (*United State Naval Observatory*) e pelo BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*), podendo ser obtida também nas efemérides transmitidas (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

2.1.2 GLONASS

O GLONASS (cuja nomenclatura original é *GLObal'naya NAvigationnaya Sputnikowaya Sistema*) é o sistema que foi desenvolvido pela antiga União Soviética em contrapartida ao GPS americano. Inicialmente desenvolvido pelo *Sovietic Union's Scientific Publication Association of Applied Mechanics*, atualmente é mantido pelo governo russo, sendo controlado e desenvolvido pela *Russian Federation Space Forces*. Similar ao sistema americano, o GLONASS foi desenvolvido visando a obtenção de coordenadas tridimensionais, medidas de velocidade e de tempo, independente das condições climáticas em qualquer lugar do planeta ou próximo a ele. Inicialmente com finalidade militar, também teve sua utilização expandida para uso civil, conforme diversas declarações posteriores do governo russo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

O sistema é constituído de 24 satélites operacionais e 03 de reserva, distribuídos em três planos orbitais aproximadamente circulares, separados em 120º, inclinados aproximadamente 64,8º em relação ao equador. A altitude média é de 19.100 km e o período orbital é de 11h15min44seg (Tempo Sideral). Assim como o GPS, em 1995 o

GLONASS obteve constelação completa, com 24 satélites (SEEBER, 2003). Devido ao ângulo de inclinação maior que o do GPS (55º), a constelação GLONASS apresenta cobertura um pouco diferente, podendo fornecer melhor cobertura para altas latitudes. Com o sistema completo, entre seis e onze satélites são visíveis em qualquer ponto da Terra (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Em relação às frequências, na concepção original, a tecnologia utilizada é a FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite transmite em uma frequência, sendo o satélite identificado de acordo com a mesma (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). A obtenção das frequências é apresentada por Seeber (2003):

$$f_L = f_0 + k\Delta_{f_L}, \tag{1}$$

onde f_0 é a frequência fundamental, k o canal atribuído ao satélite e Δ_{f_L} a taxa de variação da frequência. As relações entre as frequências das portadoras, f_{L1},f_{L2} e f_{L3}, apresentadas por Hofmann-Wellenhof et al. (2008), são dadas por:

$$f_{L1}/f_{L2} = 9/7 \text{ e} \tag{2}$$

$$f_{L1}/f_{L3} = 94/125. \tag{3}$$

Sendo assim, a partir dos dados da Tabela 2, que contém f_0 e Δ_f das portadoras L1, L2 e L3[1], é possível gerar a Tabela 3 com as frequências de cada satélite da constelação GLONASS atual. Onde *NS* é o número do satélite, *c* é o canal de frequência e f_{L1}, f_{L2} e f_{L3} são as frequências das portadoras L1, L2 e L3. Na coluna das frequências em L3 da Tabela 3 são apresentados os valores apenas dos dois satélites operacionais que atualmente transmitem dados da portadora.

Tabela 2 – Dados das ondas portadoras L1, L2 e L3.

	L1 (MHz)	**L2 (MHz)**	**L3 (MHz)**
f_0	1602,0000	1246,0000	1204,7040
Δ_f	0,5625	0,4375	0,4230

Fonte: Hofmann-Wellenhof et al., 2008.

[1]Em algumas referências são utilizadas as nomenclaturas G1, G2 e G3 para relacionar as portadoras do GLONASS, no presente texto optou-se pela utilização das nomenclaturas mais utilizadas, L1, L2 e L3, também utilizadas no documento oficial do sistema, *Interface Control Document* 5.1 (GLONASS, 2008).

Tabela 3 – Frequências dos satélites nas portadoras L1, L2 e L3.

NS	**C**	f_{L1}	f_{L2}	f_{L3}
1	1	1602,5625	1246,4375	-
2	-4	1599,7500	1244,2500	-
3	5	1604,8125	1248,1875	-
4	6	1605,3750	1248,6250	-
5	1	1602,5625	1246,4375	-
6	-4	1599,7500	1244,2500	-
7	5	1604,8125	1248,1875	-
8	6	1605,3750	1248,6250	-
9	-6	1598,6250	1243,3750	1202,1660
10	-7	1598,0625	1242,9375	-
11	0	1602,0000	1246,0000	-
12	-1	1601,4375	1245,5625	-
13	-2	1600,8750	1245,1250	-
14	-7	1598,0625	1242,9375	-
15	0	1602,0000	1246,0000	-
16	-1	1601,4375	1245,5625	-
17	4	1604,2500	1247,7500	-
18	-3	1600,3125	1244,6875	-
19	3	1603,6875	1247,3125	-
20	2	1603,1250	1246,8750	-
21	4	1604,2500	1247,7500	1206,3960
22	-3	1600,3125	1244,6875	-
23	3	1603,6875	1247,3125	-
24	2	1603,1250	1246,8750	-

Inicialmente os valores *k* variavam de 0 a 24, sendo o valor 0 utilizado para testes. Devido a interferências nas observações de radioastronomia e satélites de comunicação as frequências foram realocadas para valores menores (MONICO, 2008). Segundo o *Interface Control Document* 5.1 (GLONASS, 2008) os satélites lançados a partir de 2005 usariam canais de -7 a +6. Segundo Hofmann-Wellenhof et al. (2008) os canais +5 e +6 seriam apenas para fins técnicos, porém, atualmente (fevereiro de 2017) o canal +5 é utilizado para os satélites 03 e 07, e o canal +6 para os satélites 04 e 08. O canal -5 atualmente não pertence a nenhum satélite em órbita (GLONASS, 2017).

Com o uso da tecnologia FDMA, como cada satélite transmite em uma frequência deve ser feita a diferenciação não apenas entre a frequência de cada portadora, mas também em relação a cada satélite. Com isso, diversos problemas surgem, por exemplo, com a utilização das Duplas Diferenças (DDs) em métodos de posicionamento e mesmo na solução das ambiguidades. Utilizando-se dados CDMA, com as DDs os erros dos relógios dos receptores são anulados, porém, o mesmo não acontece quando se tem o caso da FDMA.

Takac (2009) faz uma abordagem da influência do uso da tecnologia FDMA na solução das ambiguidades em um paralelo entre o caso do GPS e do GLONASS. O uso dessa tecnologia não só dificulta a solução das ambiguidades por métodos já utilizados como o LAMBDA (*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*), como faz com que não seja eliminado nas DDs um erro sistemático dependente da frequência inserido nas observáveis (IFB - *Inter-frequency biases*). Neste trabalho ele propõe uma metodologia capaz de realizar a calibração dos receptores para permitir a solução das ambiguidades, porém, a mesma depende da utilização do mesmo tipo de receptor nas aplicações posteriores.

Já Sleewaegen et al. (2012) levantam a questão de o IFB ser formado por duas componentes, uma digital e uma analógica. Sendo que a componente digital é estável, e pode ter correções derivadas do *firmware* e da arquitetura digital do receptor. Neste caso, somente a componente analógica permanece na observável, porém, esta possui ordem milimétrica, não influenciando diretamente na solução das ambiguidades.

Diversos outros trabalhos buscam propor metodologias para lidar com as dificuldades causadas pela tecnologia FDMA, como Al-Shaery et al. (2013), Liu et al. (2016) e Cai e Gao (2013). Estes estudos são relevantes, pois mesmo com a disponibilização de sinal com tecnologia CDMA os satélites GLONASS continuarão transmitindo sinal com FDMA e, além disso, a implantação de constelação completa com CDMA não é esperada para um futuro muito próximo.

Em relação aos receptores utilizados, uma vez que as frequências dos sistemas GPS e do GLONASS são semelhantes, é possível ser utilizada uma antena combinada e um amplificador comum em um mesmo equipamento. Isso facilita o desenvolvimento de equipamentos que rastreiam satélites de ambos os sistemas simultaneamente. Em relação ao processamento dos sinais, porém, ocorrem diferenças que devem ser levadas em consideração nas metodologias adotadas (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Quanto às informações das órbitas dos satélites, de maneira análoga ao GPS, têm-se as efemérides transmitidas e precisas. As efemérides precisas GLONASS são produzidas e disponibilizadas desde 1998 seguindo o mesmo formato de arquivo das efemérides precisas GPS. Atualmente as efemérides precisas GLONASS podem ser obtidas por meio da página do IGS (ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/glonass/products/).

Já as efemérides transmitidas, ao invés dos elementos keplerianos usados nas efemérides GPS, além de informações de correções e saúde dos satélites, são fornecidas as posições, velocidades e acelerações dos satélites, causadas pelas perturbações

gravitacionais do sol e da lua. Os valores são fornecidos em intervalos de trinta minutos, sendo que para o cálculo das coordenadas é necessária a aplicação de interpolação. Um método de integração numérica utilizado é o Runge-Kutta de quarta ordem (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; STATELLA et al., 2013).

O segmento de controle é composto pelo sistema de controle central, pela central responsável pela sincronização do tempo GLONASS e pelas estações de rastreio. O controle central do GLONASS está localizado na cidade de Moscou e as estações de monitoramento, inicialmente distribuídas no território da antiga União Soviética, estão sendo expandidas por diversos países desde 2013. Essas estações começaram a ser implantadas em outras regiões como parte do projeto de modernização do sistema. A primeira estação fora dessa região e primeira no Hemisfério Sul foi a implantada no Brasil, em Brasília, em fevereiro de 2013, na Universidade de Brasília. Mais duas estações em território nacional farão parte da rede de estações do GLONASS, uma na sede do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) em Recife, inaugurada em fevereiro de 2016, e outra na Universidade de Santa Maria que deve ser finalizada em breve. Além disso, projetos de instalação de outras estações em todo o mundo estão em andamento, incluindo países como China, Cuba e Nicarágua (SPUTINK NEWS, 2015). A Figura 3 apresenta as estações inicialmente implantadas, assim como os locais de lançamentos e de desenvolvimento e pesquisa.

Figura 3 – Estações de controle no território da antiga União Soviética.

Fonte: <http://www.russianspaceweb.com/centers.html>.

Inicialmente o sistema de referência adotado pelo GLONASS foi o SGS-85 (*Sovietic Geodetic System* 1985), refinado para o SGS-90, com mesma definição. Posteriormente o sistema de referência utilizado foi alterado para o PE-90 (*Parameters of the*

Earth 1990) ou PZ-90 (*Parametry Zemli* 1990). De outubro de 1998 a abril de 1999 foi realizado o IGEX-98 (*International GLONASS EXperiment*), realizado em parceria pelo IAG (*International Association of Geodesy*), IGS, ION (*US Institute of Navigation*) e IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), com contribuição de aproximadamente 75 organizações. Nele foram utilizados dados de mais de 60 estações em mais de 25 países, com dados de simples e dupla frequências de satélites GPS e GLONASS. Além disso, foram ainda coletados dados laser de 30 satélites em estações em todo o planeta (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Os diversos resultados obtidos foram reunidos em oito sessões de trabalhos disponíveis em formato digital (https://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs/igex98.html). Entre as maiores contribuições obtidas com o experimento, além dos parâmetros de transformação do PZ-90 para o ITRF97 (*International Terrestrial Reference Frame* 1997) e para o WGS-84, houve ainda melhoria na determinação das órbitas precisas do GLONASS, cujas precisões passaram de dezenas de metros para até alguns decímetros (WEBER e FRAGNER, 1999). O projeto que deu continuidade ao rastreio e análise de dados GLONASS de algumas estações foi chamado de IGLOS (*International GLONASS Service*) sob responsabilidade da IAG (MONICO, 2008). O mesmo teve início em 2000 se encerrou em 2005 após os dados e produtos GLONASS terem alcançado os padrões operacionais do IGS. Mais informações sobre o projeto estão disponíveis *on-line* na página do IGS (https://igscb.jpl.nasa.gov/projects/iglos/).

A primeira modernização do PZ-90 (PZ-90.02) foi finalizada em 2002, sendo utilizados dados, coletados desde 1990, de estações da rede SGN (*Space Geodetic Network*) com receptores GPS/GLONASS. A última realização do sistema foi a PZ-90.11, que utilizou dados de estações da rede SGN e de algumas da rede IGS. Outra melhoria na nova realização foi a utilização de dados DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) (2002, 2008 e 2010), obtidos de estações combinadas da rede IGS (RUSSIAN FEDERATION, 2014). Desde 31 de dezembro de 2013 adota-se a realização PZ-90.11 como sistema de referência nacional russo para apoio a missões orbitais e de navegação (GLONASS, 2016a).

Com a orientação dos eixos, escala e origem do PZ-90, é assegurado alinhamento aos parâmetros do ITRF com similaridade a nível centimétrico. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de transformação para o PZ–90.11 do PZ-90, PZ-90.02, WGS-84 (G1150) e ITRF 2008 fornecidos pelo documento de referência do PZ-90.11 (RUSSIAN FEDERATION, 2014).

Tabela 4 – Parâmetros de transformação para o PZ–90.11.

Parâmetros → Transformações	Δ_X **(m)**	Δ_Y **(m)**	Δ_Z **(m)**	ω_X **(10^{-03} arcsec)**	ω_Y **(10^{-03} arcsec)**	ω_Z **(10^{-03} arcsec)**	**m (10^{-06})**
PZ-90	−1,443	0,156	0,222	−2,300	3,540	−134,210	−0,228
PZ-90.02	−0,373	0,186	0,202	−2,300	3,540	−4,210	−0,008
WGS-84 (G1150)	−0,013	0,106	0,022	−2,300	3,540	−4,210	−0,008
ITRF 2008	0,003	0,001	0,000	–0,019	0,042	–0,002	0,000

Fonte: Adaptado de Russian Federation (2014).

O sistema de tempo do GLONASS é relacionado ao UTC, mas com um *offset* constante de três horas, devido à diferença de fusos entre Moscou e *Greenwich*. A relação já inclui os saltos de segundos, mas existe ainda um termo a ser inserido na relação, devido ao uso de relógios diferentes para o monitoramento das escalas de tempo. Essa diferença, τ_C, é esperada ser em torno de 1 milisegundo e seu valor é fornecido nos arquivos de navegação GLONASS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

A central de sincronização é localizada em Schelkovo, próxima a Moscou. Para o controle do sistema de tempo do GLONASS dois tipos de medidas são realizadas, a distância dos satélites por técnicas de radar e o sinal de navegação transmitido pelos satélites, que são comparados a um tempo e a uma fase de referência. A partir dessas medidas os *offsets* do relógio e da fase são determinados e preditos. Esses valores são então transmitidos aos satélites ao menos uma vez ao dia (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

2.1.2.1 Modernização e perspectivas futuras

No início da década de setenta teve início o projeto do que viria a se tornar o sistema GLONASS. Em 1995 o GLONASS alcançou constelação completa, porém, com a falta de lançamentos e a curta vida útil dos satélites, o sistema passou por um longo período de degradação, com o número de satélites operacionais decrescendo rapidamente. A partir de 2001, teve início um plano de metas que visava, entre outros objetivos, o restabelecimento da cobertura global e modernização do sistema GLONASS. Com isso novas gerações de satélites foram desenvolvidas, sendo a primeira delas a dos satélites GLONASS-M, posteriormente foram desenvolvidos os GLONASS-K1 e, atualmente, está em desenvolvimento a geração dos satélites GLONASS-K2. A Figura 4 apresenta, da esquerda para a direita, os primeiros satélites GLONASS, em seguida a geração GLONASS-M, a geração GLONASS-K1 e a geração em fase de produção, GLONASS-K2.

Figura 4 – Gerações dos satélites GLONASS.

Fonte: Adaptado de < http://www.russianspaceweb.com/uragan.html>.

Os primeiros satélites GLONASS tinham massa de aproximadamente 1450 kg, três osciladores de Césio e vida útil estimada em três anos (na prática o tempo médio foi de quatro anos e meio). Os satélites eram equipados ainda com propulsores (possibilitando manutenção das órbitas e realocações), controle de atitude, refletores laser e painéis solares (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Como nos primeiros satélites GPS, a portadora L1 possuía sinal civil e para usuários autorizados, enquanto a segunda portadora apresentava apenas sinal para usuários autorizados (MONICO, 2008).

A geração GLONASS-M contou com melhorias na acurácia do posicionamento e vida útil, estendida para sete anos (URLICHICH et al., 2011b). Os satélites tiveram, entre as melhorias, a diminuição do peso, que passou para 1230 kg, aumento na estabilidade dos relógios, comunicação entre satélites, operação autônoma do veículo, melhor sistema de controle de atitude, melhores baterias e parte eletrônica modernizada (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Além disso, as mensagens de navegação foram melhoradas devido a informações adicionais, como divergências na escala de tempo do GPS e do GLONASS e informações de correção do tempo. E, ainda, a inclusão de um novo sinal civil na portadora L2, permitindo, entre outras coisas, combinações lineares para atenuação de efeitos ionosféricos (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

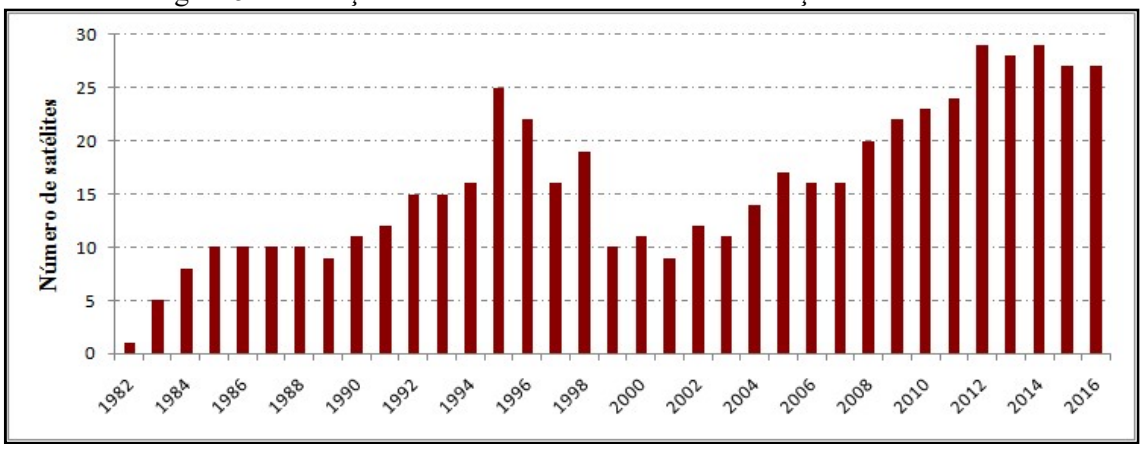
Os satélites GLONASS-K1 passaram a transmitir, além dos sinais FDMA, uma nova portadora, L3, CDMA, com sinal civil. É importante ressaltar que apesar da nova portadora com CDMA, será mantida a transmissão dos sinais com tecnologia FDMA enquanto houver receptores com a configuração original (URLICHICH et al., 2011a). Entre as melhorias desta geração tem-se ainda, aumento da vida útil, que passou para dez anos, diminuição do peso dos satélites, que passou para 850 kg, e aumento na estabilidade dos relógios atômicos, dois de Césio e dois de Rubídio. Uma questão importante na diminuição significativa do peso dos satélites é a possibilidade de aumento do número de unidades lançadas simultaneamente. Com a nova geração, dependendo do veículo utilizado, podem ser lançados satélites aos pares ou até seis ao mesmo tempo (FEAIRHELLER e CLARK, 2006;

GLONASS/GNSS FORUM, 2016; GPS WORLD, 2015b).

A geração GLONASS-K2 apresenta como principal modificação a inclusão de sinal com tecnologia CDMA nas três portadoras, enquanto a vida útil prevista se manteve em dez anos. Essa geração na verdade constitui a sequência no projeto das gerações. A versão GLONASS-K1, no projeto inicial, era uma versão de testes, que atualmente já se encerrou com os dois satélites lançados (GPS WORLD, 2016d). O primeiro satélite GLONASS-K foi lançado em 2011 e permanece com o *status* "em fase de testes". Foi planejado o lançamento de um segundo satélite GLONASS-K entre o final de 2011 e início de 2012, o lançamento foi adiado diversas vezes até ocorrer no dia 01 de dezembro de 2014 (VOZ DA RUSSIA, 2014).

Além dos satélites GLONASS-K em órbita, que já transmitem sinal CDMA, no dia 14 de junho de 2014 foi lançado um novo satélite GLONASS-M com uma portadora L3 experimental que também transmite sinal com tecnologia CDMA. Desde o dia 03 de agosto de 2014 ele se encontra operacional e testes de validação da acurácia da nova portadora estão em andamento (GPS WORLD, 2016b). Como citado anteriormente, além da transmissão de sinal CDMA nessa portadora, a nova geração, GLONASS-K2, contará com essa tecnologia também nas portadoras L1 e L2 (URLICHICH, 2011a). A transmissão de sinais CDMA pelo GLONASS é de grande importância devido à facilidade permitida para integração e interoperabilidade entre os sistemas GNSS. A Figura 5 apresenta a evolução do número de satélites da constelação GLONASS desde o seu primeiro lançamento. Desde 2011 o número de satélites operacionais se estabilizou e, com exceção de dias em que ocorreram manutenções, o GLONASS se manteve com 24 satélites operacionais.

Figura 5 – Evolução do número de satélites da constelação GLONASS.



Fonte: Adaptado e atualizado de URLICHICH et al. (2011b).

Atualmente (fevereiro/2017) o sistema conta com 27 satélites em órbita, conforme Tabela 5, onde se pode notar que 24 satélites se encontram operacionais, um em verificação, além de um de reserva e um em fase de testes.

Tabela 5 – Status Constelação GLONASS em 21/02/17.

Total de satélites na Constelação	**27**
Operacional	24
Em fase de comissionamento	-
Em manutenção	-
Sob verificação pelo *Satellite Prime Contractor*	01
Reservas	01
Em fase de vôo de testes	01

Fonte: Adaptado de <https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.

Conforme pode ser visto na Tabela 5, apenas um dos satélites GLONASS-K encontra-se em órbita em fase de testes. O que foi lançado em 2014 se tornou operacional no dia 15/02/16. Ainda em fevereiro de 2016, no dia 07 houve outro lançamento de um GLONASS-M, que se tornou operacional no dia 28 do mesmo mês (GPS WORLD, 2016b). Em 29 de maio de 2016 um novo satélite GLONASS-M foi lançado e entrou em operação em 27 de junho. Em 2017 podem ser lançados até quatro satélites GLONASS-M para substituir veículos com defeitos ou mau funcionamento (GPS WORLD, 2017).

No dia 20 de julho de 2015 o último satélite GLONASS-M foi produzido, se juntando aos oito já prontos para lançamento naquele momento. A ideia inicial dos desenvolvedores era após a produção e lançamento dos dois GLONASS-K1, já em órbita, dar início à produção da série GLONASS-K2. Porém, devido a problemas na importação de elementos dos satélites, foi decidido produzir mais nove satélites GLONASS-K1 e dois GLONASS-K2, para testes. A previsão inicial é que os nove satélites GLONASS-K1 sejam lançados até 2020. Já para os GLONASS-K2 não são esperados lançamentos antes de 2018. E, entre 2019 e 2020, após os testes previstos para os dois primeiros protótipos, é esperado o início da produção de mais satélites dessa geração (GPS WORLD, 2015a; 2016d).

Além dos projetos de modernização dos satélites, com o intuito de melhorar a qualidade do posicionamento foram realizados refinamentos do monitoramento do sistema de tempo do sinal e do sistema de referência e, como citado anteriormente, novas estações terrestres de controle estão sendo implantadas em diversos países.

2.2 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

Posicionamento se refere à determinação da posição de um objeto em relação a um referencial. Dependendo do método empregado pode-se classificar o posicionamento de diversas formas. Se as coordenadas são determinadas em relação ao geocentro tem-se o posicionamento absoluto, ou por ponto. Quando as coordenadas são obtidas em relação a um referencial materializado tem-se o posicionamento relativo, neste caso o objetivo é determinar o vetor entre o ponto de interesse e o ponto de coordenadas conhecidas, também chamado de linha de base. As classificações podem ser ainda em relação ao estado do objeto a ter coordenadas definidas, podendo ser estático ou cinemático, quando o objeto está em repouso ou em movimento, respectivamente. E, ainda, em relação ao processamento podendo ser pós-processado ou em tempo real, quando os resultados são disponibilizados de forma instantânea (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

Mais recentemente, com o objetivo de suprir as limitações do posicionamento relativo cinemático em tempo real, teve início o conceito de posicionamento baseado em redes. Dentre as metodologias desenvolvidas o conceito de estação virtual de referência se mostrou promissor e vem sendo objeto de estudos como o realizado por Alves (2008). Na presente seção são apresentados os conceitos dos métodos de posicionamento por ponto, relativo e baseado em redes, mais especificamente com o conceito de VRS (*Virtual Reference Station*).

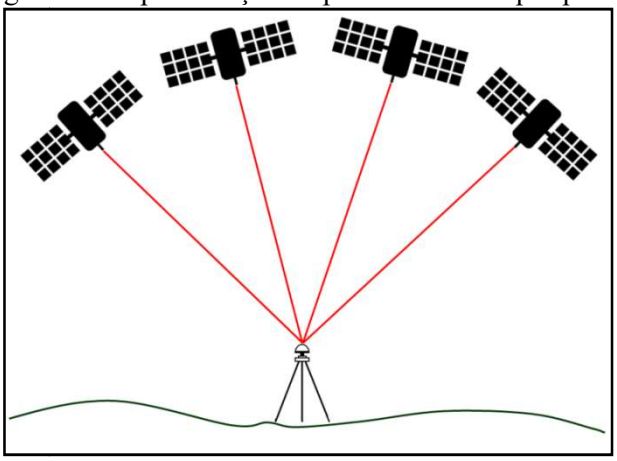
2.2.1 Posicionamento por ponto

O posicionamento por ponto necessita de apenas um receptor para ser realizado. Como dito anteriormente, neste método as coordenadas são obtidas diretamente em relação ao geocentro. De acordo com a metodologia empregada, este tipo de posicionamento pode ser dividido basicamente em duas categorias, simples e preciso.

O posicionamento por ponto simples é mais utilizado com finalidades de navegação de baixa precisão. A observável utilizada é a pseudodistância, mas a fase também pode ser utilizada (MONICO, 2008). Para este tipo de posicionamento são utilizadas as informações de navegação das efemérides transmitidas e a maior parte dos erros envolvidos, em geral, é negligenciada.

A Figura 6 apresenta uma ilustração do posicionamento por ponto, em que apenas um receptor coleta informação de pelo menos quatro satélites para a determinação da posição.

Figura 6 – Representação do posicionamento por ponto.



Outra possibilidade é a utilização da observável fase da onda portadora, ou da pseudodistância ou mesmo de ambas. Além disso, podem ser utilizadas as efemérides precisas do IGS e realizar a modelagem da maior parte dos erros envolvidos, caso em que se tem o posicionamento por ponto preciso. Para atenuação do efeito ionosférico, quando se tem disponíveis dados de dupla frequência, existe a possibilidade da utilização da combinação linear *Ion-Free*. Além desse, podem ser utilizados modelos regionais como o Mod_Ion (CAMARGO, 1999), ou modelos globais como o do IGS disponível desde 1998 em formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*) (MONICO, 2008).

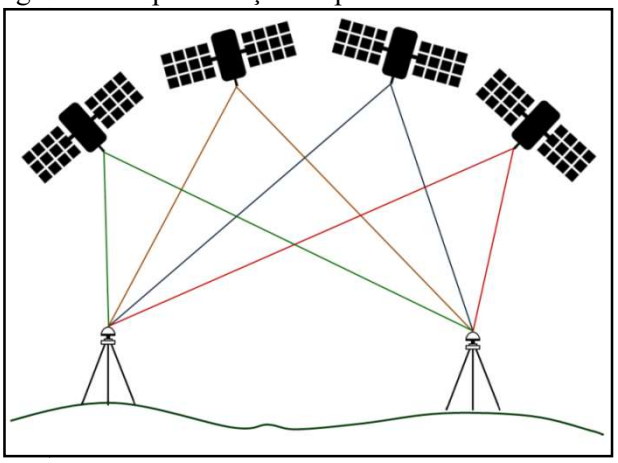
Inicialmente esse método não era utilizado para aplicações em tempo real, isso passou a se tornar realidade a partir da disponibilização pelo IGS das efemérides precisas ultra-rápidas, com predição das órbitas e erros do relógio do satélite. A obtenção desses dados com melhor precisão foi possível após a desativação da SA (LEICK, 2004).

Diversas ferramentas foram desenvolvidas utilizando-se da aplicação do PPP, seja no modo pós-processado ou em tempo real. Atualmente é possível ter acesso a alguns desses programas inclusive no modo *on-line*, como é o caso do IBGE-PPP (http://www.ppp.ibge.gov.br/) disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), do RT_PPP (http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/) desenvolvido na FCT-UNESP, do APPS (http://apps.gdgps.net/apps_file_upload.php) desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e do CSRS-PPP (https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php) da NRCan (*Natural Resources Canada)*, sendo este o *software* utilizado no experimento sobre PPP do presente estudo (seção 6.1).

2.2.2 Posicionamento relativo

No posicionamento relativo determina-se a posição de um ponto em relação a um referencial materializado. Sendo assim são necessários ao menos dois receptores coletando dados simultaneamente, um no ponto de interesse e outro em um ponto com coordenadas conhecidas. No caso do posicionamento relativo o que se determina é o vetor entre os dois pontos, e a partir desse vetor e das coordenadas do ponto usado como base podem ser obtidas as coordenadas do ponto de interesse (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008). A Figura 7 ilustra o conceito de posicionamento relativo.

Figura 7 – Representação do posicionamento relativo.



Para os métodos de posicionamento relativo a pseudodistância, a fase ou ambas podem ser adotadas como observáveis originais. A partir dessas, em geral se utilizam as duplas diferenças como observáveis fundamentais, mas também podem ser utilizadas as simples ou triplas diferenças (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Algumas classificações podem ser adotadas dentro do posicionamento relativo, de acordo com o tempo de coleta e estado do objeto a ter coordenadas definidas. No posicionamento relativo estático em geral se utilizam as DDs da fase, podendo também ser utilizadas as da pseudodistância, ou de ambas. Os melhores resultados são obtidos com o uso das duas observáveis. Para ser caracterizado como estático neste método os dois receptores coletam dados, simultaneamente, por pelo menos vinte minutos (MONICO, 2008).

No posicionamento relativo estático rápido, basicamente a mesma metodologia empregada no caso anterior é aplicada. A diferença deste caso é em relação ao tempo de coleta que, neste método, fica entre cinco e vinte minutos, podendo ser utilizados dados de uma ou duas frequências. Este método é utilizado em aplicações que necessitam de agilidade na coleta e que utilizem linhas de base mais curtas (MONICO, 2008).

O posicionamento relativo semicinemático se baseia no fato que a solução das ambiguidades está relacionada à alteração da geometria dos satélites utilizados. Para este método a estação base coleta dados continuamente, enquanto o outro receptor coleta dados nos pontos de interesse. Uma possível metodologia é o receptor que está sendo deslocado realizar pelo menos duas coletas em um mesmo ponto, com intervalo entre as mesmas, para garantir a mudança na geometria dos satélites e permitir a solução das ambiguidades (MONICO, 2008).

No posicionamento relativo cinemático a observável fundamental é a fase, tendo a pseudodistância papel fundamental na solução das ambiguidades. Uma diferença fundamental deste método para o anterior, é que neste o interesse é em toda a trajetória do receptor, portanto, a coleta deve ser contínua. Neste método, em alguns casos a realização do processamento é posterior ao levantamento, mas em muitos casos há a necessidade de ser realizado em tempo real. Nesta configuração tem-se também o chamado RTK, que necessita de um *software* capaz de realizar o processamento e validação dos dados utilizados e de um sistema de comunicação entre a estação de referência e a estação móvel. Para atender esta última necessidade foi criado o formato RTCM (*Radio Technical Commision for Maritime Services*), que permite o envio de medidas de fase e pseudodistância coletadas pela estação de referência e respectivas correções, além de outras informações (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

2.2.3 Posicionamento em redes no conceito de VRS

No que concerne ao posicionamento relativo cinemático, em tempo real também denominado RTK, diversas pesquisas recentes vem sendo realizadas visando melhorias na sua aplicação, como Khodabandeh e Teunissen (2016), Tatarnikov et al. (2016) e Brack (2016). Apesar de seus benefícios, a utilização do RTK fica limitada em relação à linha de base que, em geral, não deve passar de 20 km, devido à decorrelação espacial dos erros relacionados aos efeitos atmosféricos, órbitas e outros. Para superar esses problemas surgiu o conceito de posicionamento baseado em rede de estações de referência (WU et al., 2003).

As metodologias envolvendo redes foram desenvolvidas com a finalidade de melhorar a disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento (ALVES, 2008). Sua utilização pode ser direcionada para diversas aplicações como topografia, geodésia e navegação. A partir da realidade de redes de estações de referência disponíveis, trabalhos

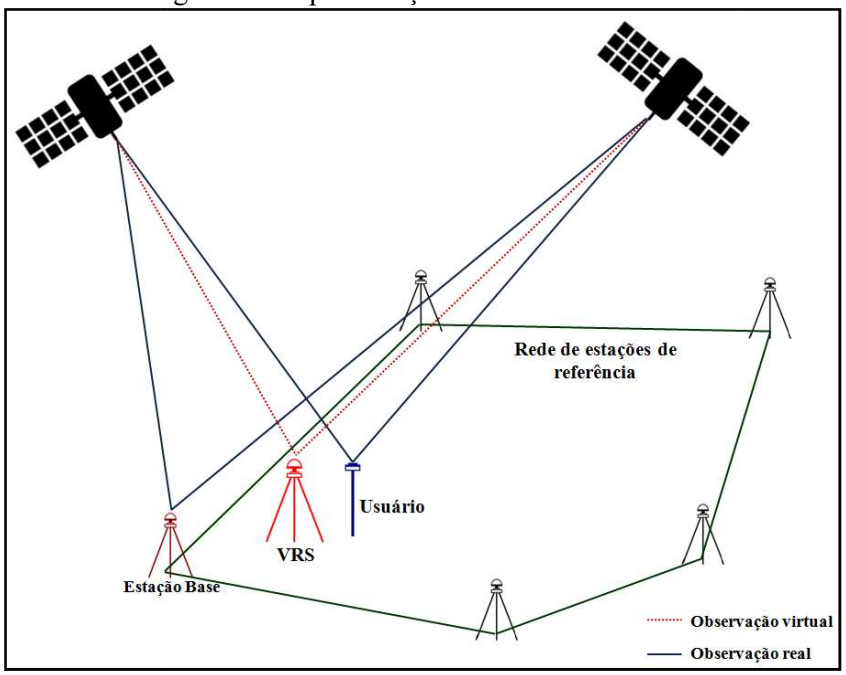
surgiram com metodologias para aplicação de, entre outros, derivadas parciais, ajustamento condicional, interpolação e estação virtual de referência (ALVES, 2008; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

A utilização do conceito de VRS permite o aumento da distância entre o receptor móvel e as estações de referência, se comparado ao RTK. Neste método os dados coletados pelos receptores em cada estação de referência são controlados por uma central que realiza os processamentos necessários para retornar ao usuário as informações de interesse da estação virtual que será utilizada (ALVES, 2008, 2011).

O conceito de VRS consiste na geração de dados de observação de uma estação próxima ao usuário que não existe fisicamente. Para esse método é necessária uma rede de estações, uma central e um *link* bidirecional com o usuário. O usuário envia sua posição aproximada para a central que identifica a estação pertencente à rede que seja mais próxima para servir de base (ALVES, 2008; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

Vale lembrar que no conceito de VRS a estação base não deve se confundir com a base do posicionamento relativo. Nesse método a estação considerada base é a estação mais próxima do usuário e que terá os dados de observação transformados em dados da estação virtual. A Figura 8 ilustra o conceito da utilização de uma VRS.

Figura 8 – Representação do conceito de VRS.



Como pode ser observado na ilustração, a partir da posição aproximada enviada pelo usuário para a central, a mesma identifica a estação da rede mais próxima do

mesmo. A partir dos dados reais dessa estação são calculados os dados virtuais da estação virtual, próxima ao usuário. Com isso o mesmo pode realizar a coleta normalmente e utilizar a estação virtual para o posicionamento relativo, por exemplo.

Uma solução para evitar a necessidade do *link* bidirecional seria a geração de uma grade de estações virtuais, com isso o usuário poderia utilizar a estação mais próxima ao seu ponto de interesse para a aplicação desejada, nesse caso tem-se o conceito de VRC (*Virtual Reference Cell*) (ALVES, 2008).

A transformação de dados reais em virtuais se dá, basicamente, pela aplicação de três correções aos dados originais. A correção do deslocamento geométrico, da troposfera e da ionosfera. No sistema desenvolvido por Alves (2008), diversas opções de modelos foram implementados e muitas outras variáveis foram consideradas.

Uma questão importante é que para a determinação da fase a ambiguidade deve ser devidamente solucionada. Como as coordenadas da estação base podem ser definidas anteriormente e injuncionadas, isso pode facilitar a obtenção da solução das ambiguidades. Porém, isso não consiste em um procedimento simples, principalmente para linhas de base maiores, devido aos erros envolvidos, em especial os relacionados à troposfera e à ionosfera (MONICO, 2008). Ressalta-se que diversos outros erros podem influenciar na determinação dos dados virtuais, como o erro de órbita e o efeito do multicaminho ocorrido na estação base. Existe a possibilidade de modelá-los ou negligenciá-los, de acordo com o nível de precisão que se espera obter (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

3 EFEITO IONOSFÉRICO

Os sinais GNSS estão sujeitos a diversos erros, podendo estes ser relacionados ao satélite (órbita, relógio, relatividade, atraso de *hardware*, centro de fase da antena, fase *wind-up*), à propagação do sinal (troposfera, ionosfera, perda de ciclos, multicaminho, rotação da Terra), ao receptor (relógio, canais, centro de fase da antena, atraso de *hardware*, fase *wind-up*) ou a própria estação (coordenadas, multicaminho, marés terrestres, movimento do pólo, carga oceânica, pressão atmosférica) (MONICO, 2008).

Do satélite ao receptor os sinais transmitidos se propagam por diferentes regiões atmosféricas de diferentes naturezas e estados variáveis. Com isso perturbações podem ocorrer levando a variações na direção de propagação, velocidade, polarização e potência do sinal. A atmosfera tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, sendo a ionosfera uma das principais fontes de degradações e erros, principalmente para usuários de simples frequência (SEEBER, 2003; CAMARGO, 1999).

3.1 IONOSFERA

Diversas classificações das camadas atmosféricas foram criadas de acordo com a área de estudo, podendo esta ser relacionada à temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas. Para o caso da propagação de ondas eletromagnéticas a divisão se dá em duas camadas, troposfera e ionosfera. A troposfera corresponde à camada mais próxima da superfície, até aproximadamente 50 km, e a ionosfera a camada seguinte, indo até em torno de 1000 km (SEEBER, 2003)

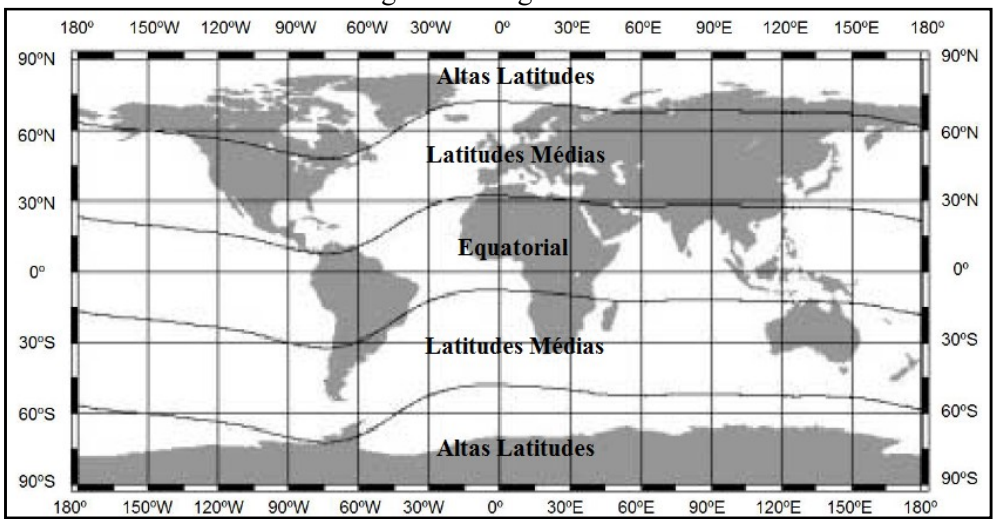
Os efeitos da ionosfera são proporcionais ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, ao número de elétrons presentes na atmosfera. O TEC corresponde à quantidade de elétrons contida em uma coluna que vai do satélite ao receptor, com base de um metro quadrado. O TEC é dado em elétrons/m^2, porém, é adotada a unidade TECU (TEC *Unit*), devido à ordem de grandeza dos valores. Uma unidade de TECU corresponde a $1x10^{16}$ elétrons/m^2. Esses valores variam no tempo e no espaço tendo relação com o fluxo de ionização solar, atividade magnética, estação do ano, localização no globo e ciclos de manchas solares (CAMARGO, 1999).

Em relação à localização geográfica, os níveis de densidade de elétrons são mais intensos nas regiões equatoriais (onde se situa grande parte do território brasileiro), menos intensos nas latitudes médias e seguem comportamento menos previsível nas altas

latitudes. Nas regiões equatoriais os efeitos da ionosfera são relacionados, entre outros, à anomalia equatorial com intensidade maior no pico local da anomalia (latitudes geomagnéticas aproximadas de $\pm$15º) (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Esses fatores fazem com que o Brasil se encontre em uma região privilegiada para estudos sobre esse tema, já que grande parte de seu território encontra-se na região equatorial, fortemente afetada por esses efeitos. A Figura 9 apresenta as regiões ionosféricas.

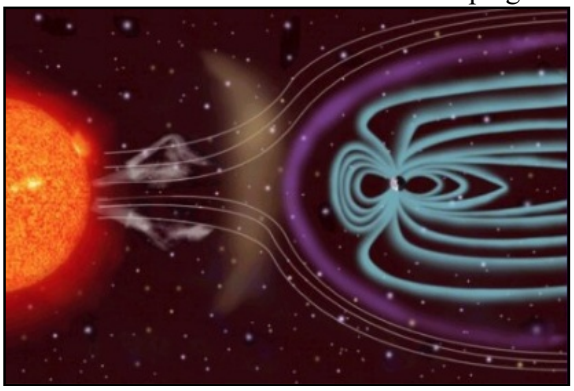
Figura 9 – Regiões ionosféricas.



Fonte: Adaptado de FONSECA JUNIOR (2002).

O campo geomagnético pode sofrer influência das atividades solares, como explosões e manchas solares. Esses eventos podem causar os chamados ventos solares que podem afetar as linhas de força do campo, fazendo com que as mesmas sejam comprimidas. Em decorrência disso podem ocorrer tempestades geomagnéticas que originam tempestades ionosféricas (CAMARGO, 1999). Na Figura 10 é ilustrada a influência dos ventos solares no campo geomagnético.

Figura 10 – Influencia dos ventos solares no campo geomagnético.

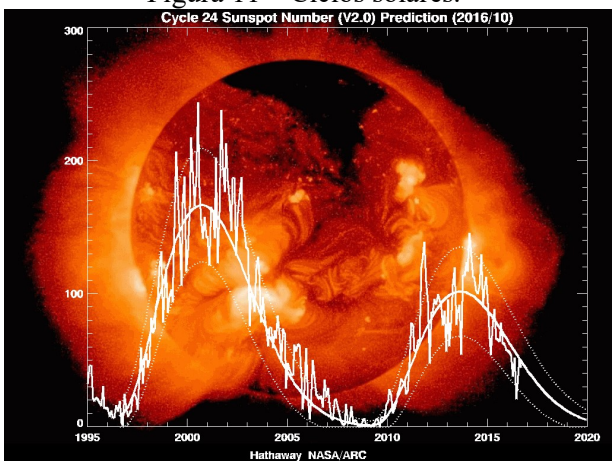


Fonte: <http://sci.esa.int/cluster/36645-solar-wind/>.

As variações temporais podem ser diurnas, sazonais e em ciclos de longo período. As diurnas ocorrem devido a mudanças em regiões da ionosfera, que ocorrem devido a recombinações de elétrons e íons distribuídos em suas camadas. As mudanças sazonais se relacionam às variações na densidade de elétrons causadas pela mudança do ângulo zenital do Sol e pelo fluxo de ionização, que mudam devido às estações do ano. Sendo a radiação incidente na Terra mais direta no verão, causando assim aumento da ionização. Já os ciclos de longo período correspondem aos ciclos solares, que ocorrem em intervalos de aproximadamente 11 anos, sendo associados às manchas solares (CAMARGO, 1999). As manchas correspondem a regiões mais frias e escuras na superfície do Sol. Em volta dessas regiões existe elevado nível de emissão de radiação ultravioleta. Com isso o aumento de manchas leva a aumento da radiação solar e, consequentemente, mudança na densidade de elétrons da ionosfera (McNAMARA, 1991).

O pico do último ciclo solar ocorreu no final de 2013 e início de 2014, tornando este um período propício para estudos sobre cintilação. A Figura 11 apresenta os dois últimos ciclos solares de 11 anos, ciclos 23 e 24.

Figura 11 – Ciclos solares.



Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>.

Os efeitos da ionosfera nas observáveis GNSS ocorrem de maneira distinta, causando atraso da pseudodistância e avanço da fase, sendo ambos proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da distância (LEICK, 2004). Conforme apresentado por Camargo (1999), o erro devido à refração ionosférica na pseudodistância e na fase podem ser representados, respectivamente, por:

$$I_{p_r}^{s} = +\frac{40{,}3}{f^2}\,\mathrm{TEC}\ \text{e} \tag{04}$$

$$I_{f_r}^{s} = -\frac{40{,}3}{f^2}\,\mathrm{TEC}. \tag{05}$$

A partir dessas equações é possível obter os valores do erro causado pela refração ionosférica, em função do TEC, para os sinais do GNSS. Para o GPS os valores correspondem a $1{,}6237.10^{-5}$TEC, $2{,}6742.10^{-5}$TEC e $2{,}9118.10^{-5}$TEC, para L1, L2 e L5, respectivamente. Já para o GLONASS, como os satélites possuem frequências diferentes, os valores ficam entre $1{,}5780.10^{-5}$TEC e $1{,}5637.10^{-5}$TEC para L1, entre $2{,}6086.10^{-5}$TEC e $2{,}5849.10^{-5}$TEC para L2 e entre $2{,}7651.10^{-5}$TEC e $2{,}7905.10^{-5}$TEC para L3, considerando os canais dos satélites operacionais atualmente. Esses valores levam a esperar comportamento semelhante da ionosfera para ambos os sistemas.

A determinação do valor do TEC pode ser realizada por meio de combinações lineares das medidas de fase ou pseudodistância. Para o caso da pseudodistância as determinações podem ser em torno de dez vezes mais ruidosas devido à ordem de grandeza da precisão da observável (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Para amenizar os efeitos da ionosfera alguns modelos podem ser utilizados como o de Klobuchar (1986), que elimina aproximadamente 50% do efeito, modelos regionais, como o Mod_Ion desenvolvido por Camargo (1999) e modelos globais, como o disponibilizado pelo IGS. Além disso, se disponíveis dados de duas frequências, pode ser realizada a combinação linear *Ion-Free*, na qual os efeitos de primeira ordem da ionosfera são eliminados, entre outras possibilidades (MONICO, 2008).

3.2 CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

A ionosfera possui irregularidades que podem afetar o sinal GNSS, como as bolhas ionosféricas. Essas irregularidades na densidade de elétrons podem causar mudanças na fase e amplitude do sinal de rádio recebido, ocasionando muitas vezes a degradação ou até mesmo perda do sinal. A esse efeito é dado o nome de cintilação ionosférica (CONKER et al., 2003; MATSUOKA, 2007).

A cintilação tem comportamento específico e relacionado à região, tendo relação com as variações na densidade de elétrons. Como acontece com o TEC, seus efeitos tem relação com a atividade geomagnética, estação do ano, localização no globo e ciclos solares. As regiões com maior ocorrência de cintilação são as do pico da anomalia equatorial, conforme citado anteriormente, próximo às latitudes geomagnéticas de 15º. As cintilações em altas latitudes são mais fracas que as observadas em regiões da anomalia equatorial, nessas regiões a ocorrência de cintilação está relacionada às irregularidades do plasma ionosférico. Já

nas regiões de altas latitudes a ocorrência se relaciona às tempestades geomagnéticas (SKONE, 1998).

As cintilações de fase acontecem devido às rápidas variações na fase do sinal ao atravessar regiões de irregularidade na ionosfera. Com isso podem acontecer perdas de ciclo e de sintonia do receptor com o satélite. Já as cintilações de amplitude ocorrem quando o índice de refração da ionosfera varia constantemente, o que faz com que o sinal seja disperso em direções diferentes a de propagação. Isso pode gerar mudanças na distância de propagação do sinal que continua sua propagação principal, podendo gerar interferência no sinal e consequente atenuação ou amplificação do sinal medido pelo receptor (CONKER et al., 2003).

Para avaliar a influência da ionosfera podem ser levados em conta diversos índices, entre estes os de irregularidade e os de cintilação ionosférica. Enquanto os primeiros se referem à classificação do comportamento da ionosfera, os de cintilação visam quantificar a intensidade da mesma. Na próxima seção são citados os principais índices e apresentados os utilizados na presente pesquisa.

3.3 ÍNDICESDE IRREGULARIDADE E DE CINTILAÇÃO

Entre os índices de irregularidades pode-se citar o f_p, o F_p, o I_{ROT} e o ROTI, todos baseados na taxa variação do valor do TEC (*Rate Of* TEC – ROT), ou seja, variação do TEC em duas épocas pelo intervalo de tempo entre as determinações.

Pi et al. (1997) definem o índice ROTI (ROT *Index*), determinado a partir do desvio padrão da taxa de variação do TEC (ROT) em um intervalo de cinco minutos, que, segundo os autores, permite uma resolução temporal relativamente alta. A classificação a partir deste índice pode ser dada por: baixos níveis de irregularidade ($ROTI \leq 0,05$), irregularidades moderadas ($0,05 < ROTI \leq 0,2$) e fortes níveis de irregularidade ($ROTI \geq 0,2$) (PEREIRA e CAMARGO, 2014).

Entre os índices de cintilação pode-se citar o S4, o σ_ϕ, o S_ϕ e o σ_{CHAIN}, sendo que os mais utilizados são o S4, para cintilação de amplitude e o σ_ϕ, para cintilação de fase.

De maneira geral o índice S4 é o desvio-padrão normalizado das observações da intensidade do sinal livre de tendências, amostradas em altas taxas em um intervalo de 60 segundos. Consistindo em um indicador da magnitude das cintilações da amplitude (CONKER et al., 2003). Em relação à classificação da potência da cintilação

existem diversos tipos encontrados na literatura como o de Conker et al. (2003), que dividem a classificação entre ausência de cintilação (S4≈0,0) e cintilação forte (S4≈1,0), e Tiwari et al. (2011), que classificam a cintilação em fraca, moderada e forte. A Tabela 6 apresenta a classificação do índice S4 proposta por Tiwari et al. (2011).

Tabela 6 – Classificação do índice S4

S4	**CLASSES**
$S4 \geq 1$	FORTE
$0,5 < S4 < 1$	MODERADA
$S4 \leq 0,5$	FRACA

Fonte: Tiwari, et. al. 2011.

Os sinais afetados pelo multicaminho podem acarretar aumento do índice S4, levando a uma falsa ocorrência de cintilação. Por isso é importante que estações que realizam a coleta desses dados tenham os índices de multicaminho monitorados (VAN DIERENDONK et al., 1993). Levando isso em conta, para todas as estações utilizadas nos experimentos que serão apresentados no capítulo 5, foram gerados os índices mp1 e mp2, indicadores de multicaminho nas portadoras L1 e L2, respectivamente. As informações obtidas são apresentadas na seção 4.2 e no Apêndice C.

Outro indicador de cintilação é o índice σ_ϕ, que é o desvio padrão das observações de fase do sinal livre de tendências. As mesmas são coletadas a altas frequências para um intervalo de 60 segundos, por isso o índice também é conhecido por σ_{60} (ou phi60). O índice pode ainda ser calculado para intervalos de 1, 3, 10 e 30 segundos, casos em que deve ser feita uma normalização (VAN DIERENDONK et al., 1993).

Diferente do S4 que é um índice adimensional, o σ_ϕ é dado em radianos. A classificação do σ_ϕ apresentada por Skone et al. (2005) divide as cintilações de fase para a portadora L1 em fraca ($\sigma_\phi \approx 0,05$ rad) e forte ($\sigma_\phi \approx 1,0$ rad). Tiwari et al. (2011) também classificam a cintilação de fase em fraca, moderada e forte, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação do índice σ_ϕ

σ_ϕ (rad)	**CLASSES**
$\sigma_\phi \geq 0,8$	FORTE
$0,4 < \sigma_\phi < 0,8$	MODERADA
$\sigma_\phi \leq 0,4$	FRACA

Fonte: Tiwari, et. al. 2011.

A partir das classificações e com os índices obtidos a partir de dados coletados por estações de monitoramento de cintilação ionosférica, ou mesmo de estações

GNSS, tem-se uma forma de avaliação dos períodos de maior influência da ionosfera, possibilitando diversos estudos e análises.

Yang e Liu (2016) apresentam um estudo buscando encontrar relação entre o índice de irregularidade ROTI e os de cintilação ionosférica, S4 e σ_ϕ. Nas análises realizadas, para regiões de baixas latitudes geomagnéticas, eles encontraram correlação entre os índices, com exceção de observações provenientes de satélites com ângulo de elevação muito baixo. Os resultados foram promissores uma vez que mostram que estações GNSS podem ser utilizadas para monitoramento de ocorrência de cintilação. Além do cálculo do índice ROTI, o aplicativo desenvolvido por Pereira (2015) utiliza dados GNSS para cálculo de outros índices, tanto de irregularidade quanto de cintilação. Esta ferramenta foi aplicada nas análises desta pesquisa, conforme é apresentado na seção 4.1.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS DIAS ANALISADOS

Os experimentos realizados na presente pesquisa, além de analisar a influência do uso de dados combinados GPS/GLONASS no posicionamento, tiveram objetivo de verificar o impacto de períodos de fraca e alta atividade ionosférica para o mesmo. Os dados utilizados são do ano 2014, por ser próximo ao pico do último ciclo solar, ocorrido entre os anos 2013 e 2014. Os meses de junho e outubro foram selecionados por pertencerem a períodos de menor e maior atividade ionosférica, respectivamente. Considerando os três experimentos foram utilizados dados de 17 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sendo estas ALAR, CEFT, ILHA, IMBT, OURI, PBCG, PBJP, POAL, PPTE, RECF, RNMO, SCCH, SCFL, SCLA, SJRP, SPDR e SPTU.

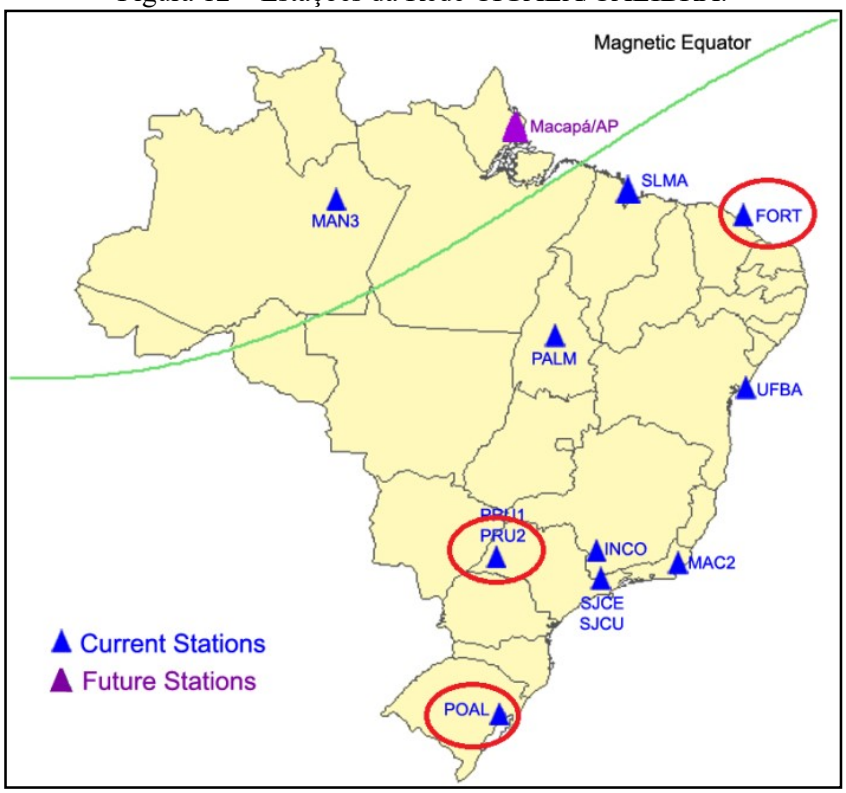
As estações dos três experimentos foram selecionadas buscando respeitar a proximidade com três estações da Rede CIGALA/CALIBRA com comportamento distinto da ionosfera, além de considerar a disponibilidade das estações da RBMC. Para a caracterização dos dias analisados foram utilizados índices de cintilação ionosférica, S4 e phi60, das três estações da Rede CIGALA/CALIBRA, também disponíveis na página (http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/). Para os índices de irregularidade, ROTI, foi utilizada a ferramenta Ion_Index, desenvolvida por Pereira (2015), sendo gerados índices para as 17 estações. Os índices Dst foram consultados para verificação de ocorrência de tempestade geomagnética nos períodos considerados. Os valores obtidos na página do *Kyoto Observatory* (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html) indicaram ocorrência de tempestade fraca, menor classificação de intensidade para o índice, conforme apresentado por Fedrizzi (1999). Também foi analisado o multicaminho de cada uma das estações envolvidas, para tanto foram calculados os índices mp1 e mp2 utilizando o *software* TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*) da UNAVCO, também para todas as estações envolvidas. Os principais dados considerados são apresentados a seguir.

4.1 IONOSFERA

Os experimentos desenvolvidos na presente pesquisa foram realizados com base em três regiões com diferentes comportamentos da ionosfera. Para caracterizar a ionosfera das regiões abordadas foram consultados os índices S4e phi60 de três estações da Rede CIGALA/CALIBRA, sendo estas FORT, em Fortaleza, PRU2, em Presidente Prudente,

e POAL, em Porto Alegre. A Figura 12 apresenta a localização das estações da rede, sendo destacadas as estações utilizadas.

Figura 12 – Estações da Rede CIGALA/CALIBRA.



Fonte: <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/stations/fixed.php>.

As consultas foram realizadas separadamente para satélites GPS e GLONASS e para os períodos de 30 minutos e 04 horas, correspondentes aos intervalos de dados utilizados nos experimentos, a máscara de elevação utilizada foi de 10º. Os dados foram reunidos por estação, sendo possível a identificação dos menores e maiores valores alcançados, além dos valores médios dos índices registrados nos intervalos de busca. Os dados apresentados correspondem aos meses de junho e outubro de 2014 e o *software* utilizado para a realização das consultas ao banco de dados foi o pgAdmin[2].

Da Figura 13 a Figura 15 são apresentados os valores de índice S4 obtidos para os primeiros 30 minutos dos dias considerados. Os valores correspondentes ao índice phi60 apresentaram comportamento semelhante ao S4 em relação aos períodos do ano, os mesmos podem ser observados no Apêndice A.

[2]PgAdmin é uma plataforma livre utilizada para manipulação e consulta em bancos de dados (https://www.pgadmin.org/index.php).

Figura 13 – Índices S4 para estação FORT com 30 minutos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

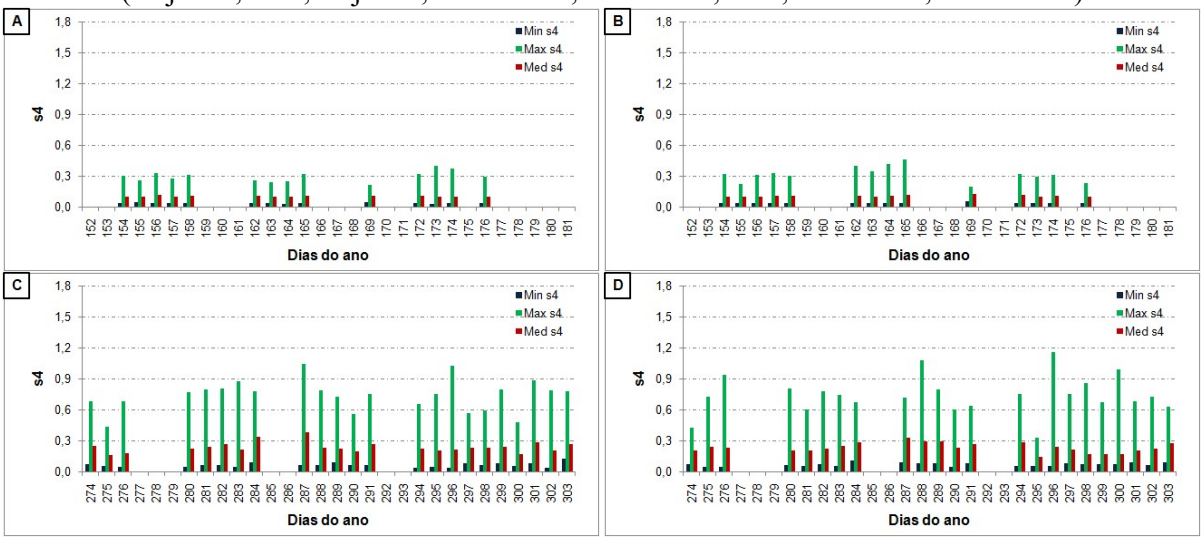


Figura 14 – Índices S4 para estação PRU2 com 30 minutos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

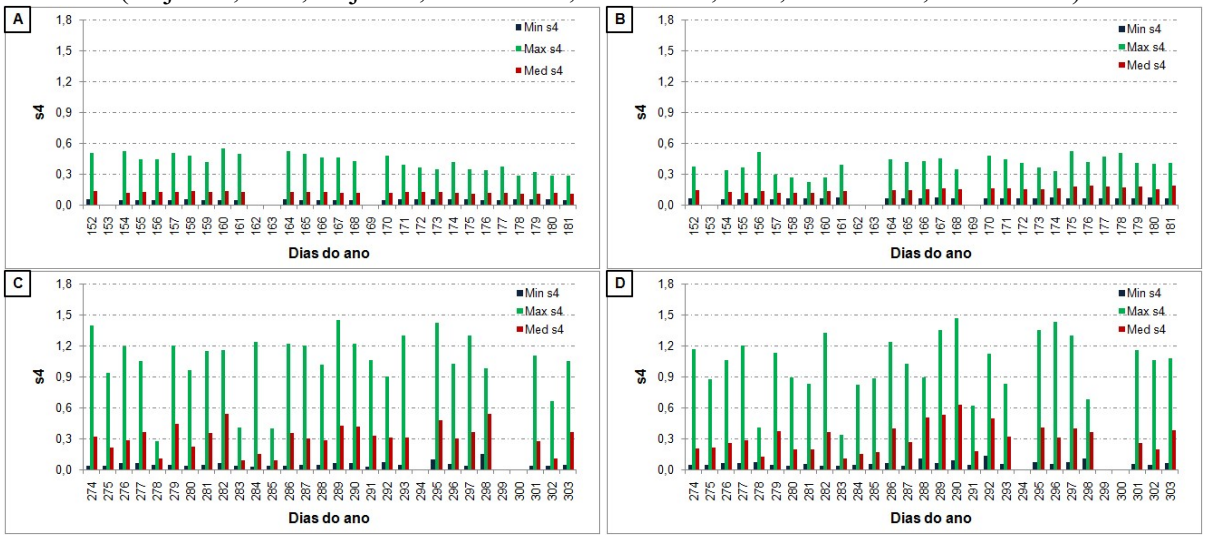
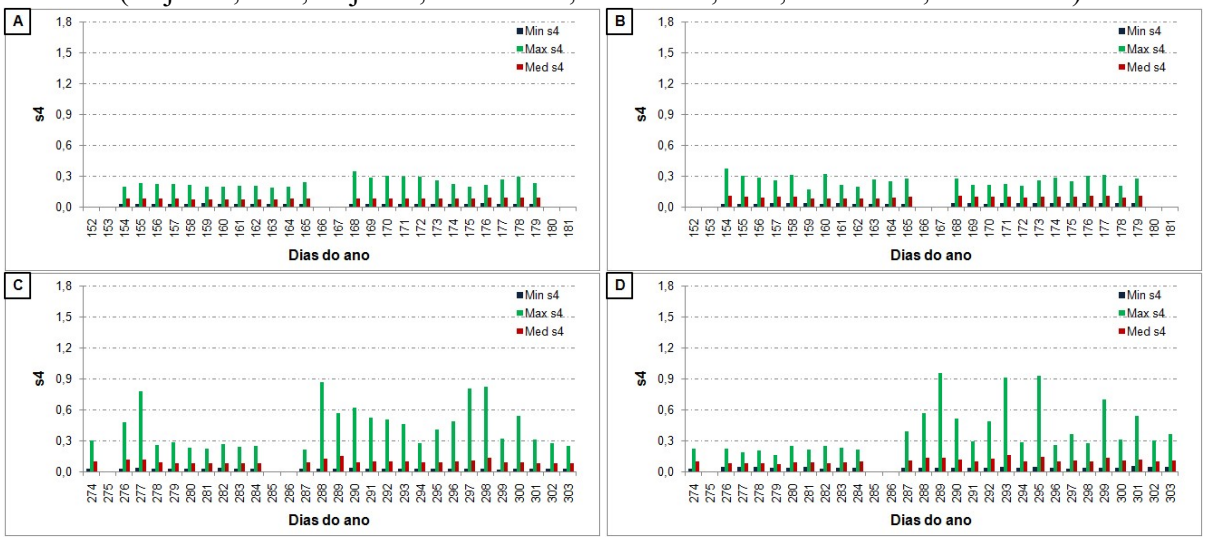


Figura 15 – Índices S4 para estação POAL com 30 minutos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)



De maneira análoga, da Figura 16 a Figura 18, são apresentados os valores obtidos para as primeiras 04 horas dos dias considerados. É possível notar que o comportamento do S4 para os satélites GPS e GLONASS é semelhante em grande parte dos casos analisados. Além disso, a partir dos índices fica clara a influência da época do ano na variação dos mesmos, sendo que o período do mês de junho apresenta comportamento mais regular e menos intenso. Outro fator de influência que pode ser observado nos dados é a relação com a localização geográfica da estação de coleta. No presente caso, a estação com maior intensidade ionosférica foi a PRU2, correspondente à região afetada pelo efeito fonte, enquanto a menos afetada foi a da estação POAL, localizada em região com comportamento ionosférico mais regular e menos intenso.

Figura 16 – Índices S4 para estação FORT com 04 horas.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

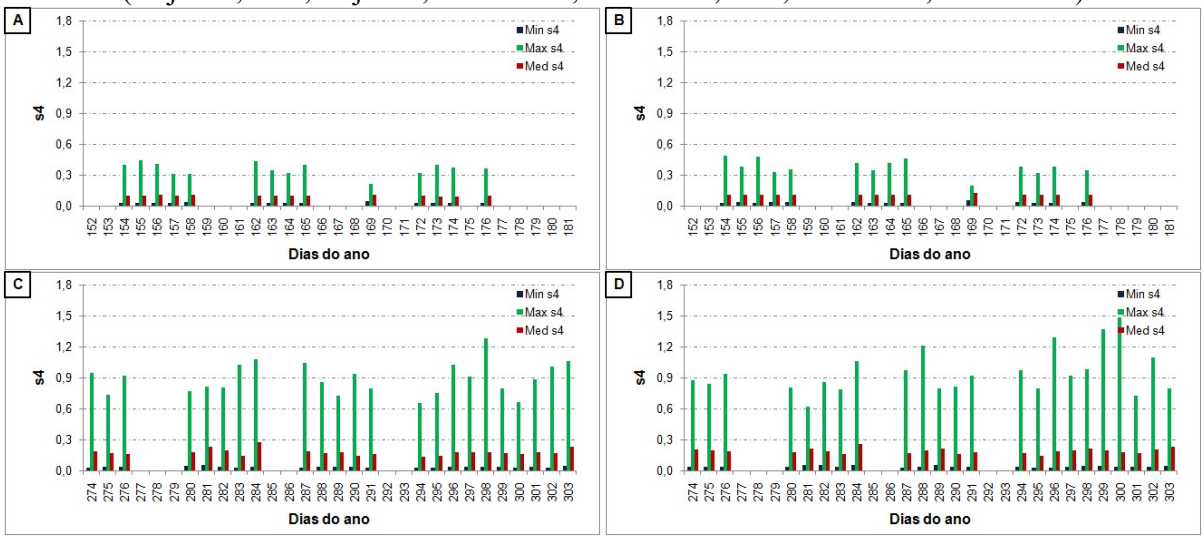


Figura 17 – Índices S4 para estação PRU2 com 04 horas.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

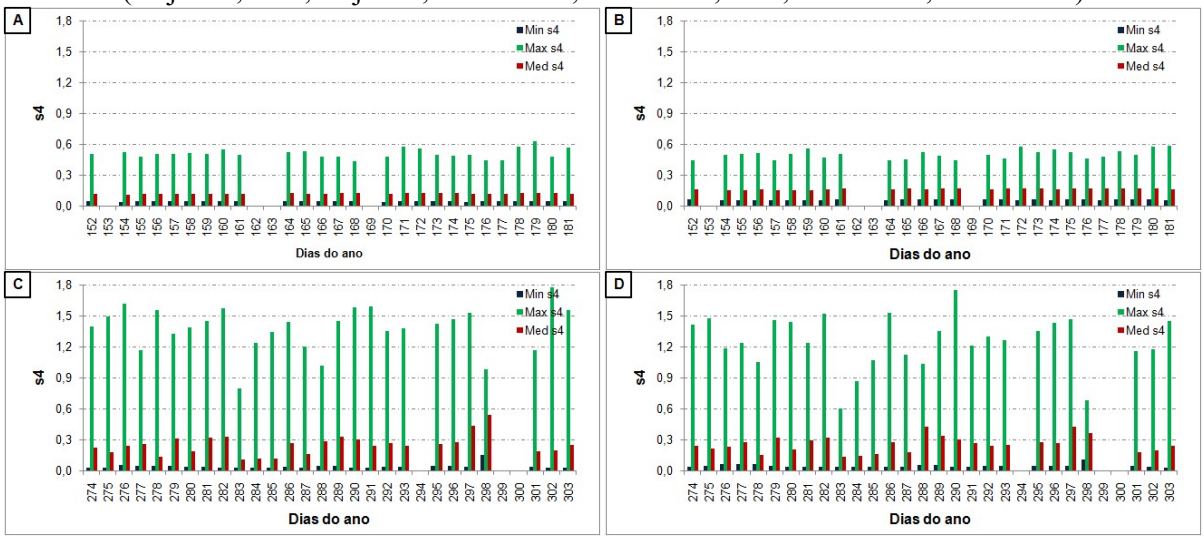
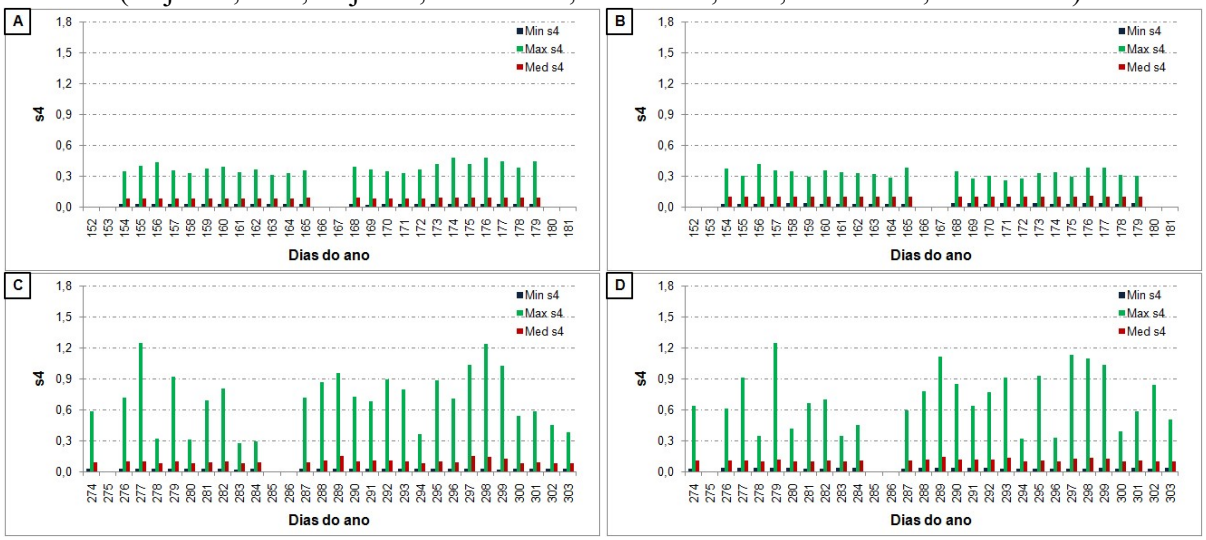


Figura 18 – Índices S4 para estação POAL com 04 horas.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)



Em relação às diferenças do efeito nos sinais dos satélites GPS e GLONASS, foi analisada a quantidade de dias em que um sistema teve valores mínimos, máximos e médios, maiores que o outro. Apesar do comportamento semelhante entre os índices para GPS e GLONASS, o efeito da cintilação no GLONASS se mostrou maior que para o GPS na maior parte dos dias, ainda que a diferença seja muito pequena.

Para analisar os experimentos, foram gerados ainda índices a partir do programa Ion_Index, desenvolvido por Pereira (2015). Como esta ferramenta permite a obtenção de índices de cintilação a partir de dados GNSS, foi possível a análise de dias específicos com dados das próprias estações em que o comportamento dos resultados do posicionamento se destacava em relação aos demais dias com mesma configuração. Os gráficos gerados pela ferramenta para os índices ROTI são apresentados no Apêndice B.

4.2 MULTICAMINHO

Para análise do multicaminho nas estações utilizadas nos experimentos, foram calculados os índices mp1 e mp2, a partir do *software* TEQC. Como são utilizadas observações coletadas pelas próprias estações, foi possível calcular os índices para todas as estações envolvidas nos experimentos.

Para efeito de comparação foram também gerados os mesmos índices para os meses de junho e outubro, com 30 minutos, 04 horas e 24 horas de dados. A partir dos resultados foi possível perceber a variação na determinação dos índices de um mês para outro. Isso pode ser observado nas três regiões ionosféricas consideradas, conforme resultados com

dados de 24 horas apresentados a seguir para estação CEFT (Figura 19), ILHA (Figura 20) e IMBT (Figura 21).

Figura 19 – Estação CEFT (A: Junho; B: Outubro).

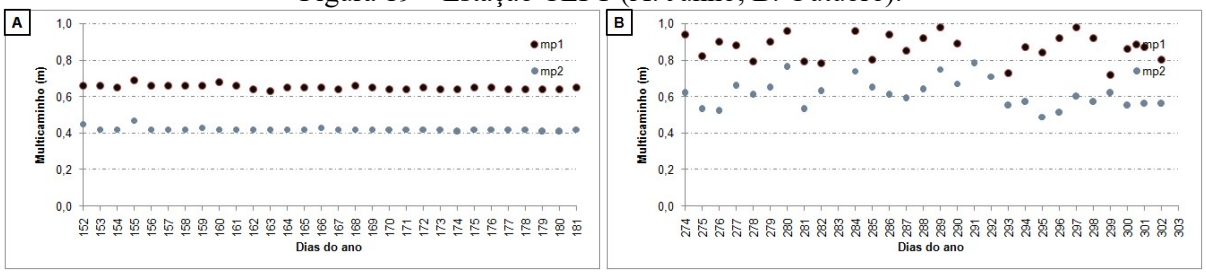


Figura 20 – Estação ILHA (A: Junho; B: Outubro).

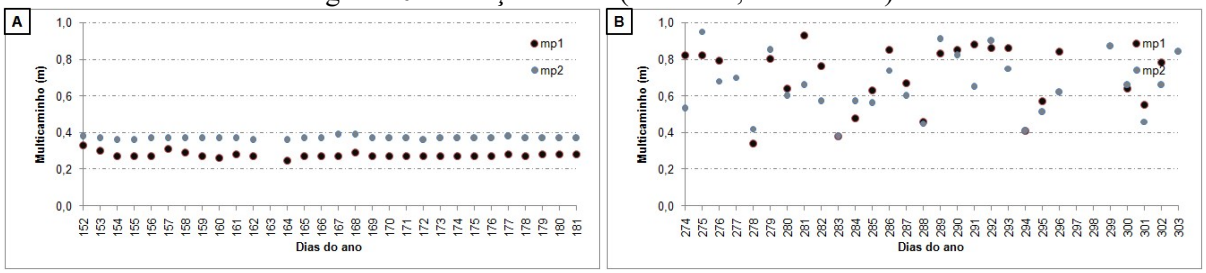
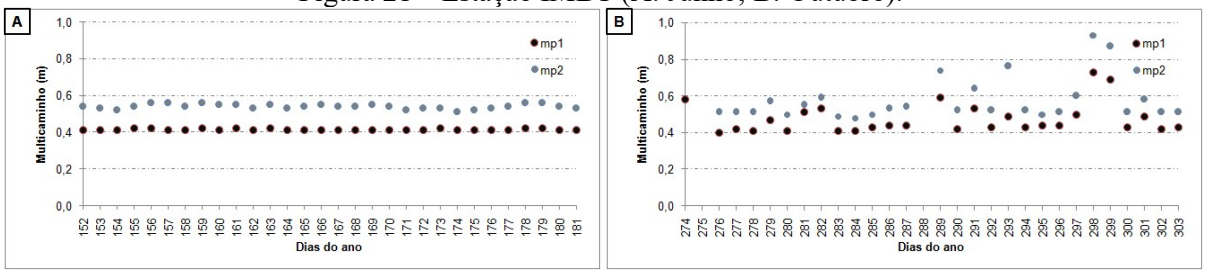


Figura 21 – Estação IMBT (A: Junho; B: Outubro).



Vale lembrar que o cálculo dos índices utiliza a observável fase, portanto, interferências na mesma e perdas de ciclo têm influência direta nos valores obtidos, conforme apresentado também por Alves et al. (2013). É possível observar essa relação devido aos resultados mais discrepantes para o período de outubro, independente do intervalo de tempo utilizado. Para 24 horas de dados no período de outubro, as estações que obtiveram resultados mais regulares foram as localizadas ao sul do país, IMBT, SCLA e POAL (Apêndice C).

Diferente da abordagem utilizada para as consultas dos índices S4 e phi60, que variam de acordo com o horário, a utilização de diferentes intervalos de dados na obtenção dos índices mp1 e mp2 teve intuito de observar variações esporádicas e a estabilização na obtenção dos índices, uma vez que a ocorrência de multicaminho em uma estação é, salvo exceções, um fenômeno local e constante. Algumas estações obtiveram em alguns dias valores de índices discrepantes em relação aos demais dias do mês, porém, estes

casos não apresentaram diferença significativa nos resultados obtidos para os métodos de posicionamento adotados.

Das 17 estações utilizadas sete tiveram os índices mp2 maiores que o mp1. Sendo que em cinco estações os valores dos dois índices foram bem próximos, nas estações ALAR, PBCG, SCCH, SCLA e SPTU. O comportamento dos índices foi regular na maior parte do tempo, salvo algumas exceções como a estação PPTE. Todos os resultados obtidos para os meses de junho e outubro e intervalos de 30 minutos, 04 horas e 24 horas são apresentados no Apêndice C.

5 EXPERIMENTOS

Nesse capítulo são apresentados os experimentos realizados no desenvolvimento da pesquisa. Os testes foram divididos em três, sendo estes relacionados ao PPP, ao posicionamento relativo e ao posicionamento em redes utilizando o conceito de VRS. Nos dois primeiros experimentos foram considerados dois intervalos de dados, 30 minutos e 04 horas. A escolha desses intervalos foi baseada em resultados preliminares obtidos por Jerez et al. (2015), em que foi possível observar indicativos de intervalos de coleta com maior influência do uso de dados combinados e intervalos em que os resultados mostraram maior estabilidade, independente das constelações utilizadas.

5.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

5.1.1 Metodologia

Para os processamentos realizados para o PPP foram selecionadas três estações, sendo uma próxima ao equador geomagnético, CEFT, localizada em Fortaleza, uma em região afetada pelo efeito fonte, PPTE, localizada em Presidente Prudente e uma com menor efeito ionosférico, POAL, localizada em Porto Alegre. A Figura 22 apresenta a distribuição das estações pelo território nacional.

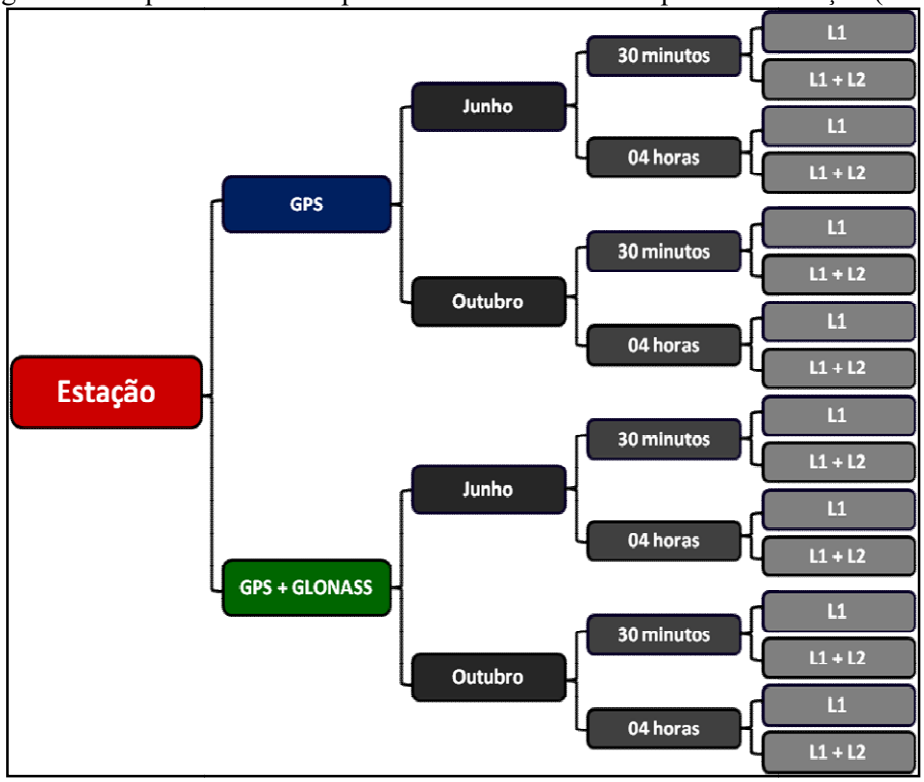
Figura 22 – Distribuição das estações selecionadas para PPP.

Fonte: Google Earth (2017).

Em relação aos processamentos, os mesmos foram realizados utilizando o *software online* CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*) (http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en) da NRCan no modo

estático. Foram utilizados arquivos somente com dados da constelação GPS e com dados mistos das constelações GPS e GLONASS. Os períodos selecionados foram dos meses de junho e outubro de 2014, com intervalo de dados de 30 minutos e 04 horas (com início às 00h TU – Tempo Universal) e, além disso, dados apenas da portadora L1 e das portadoras L1 e L2. Todas as edições de arquivos de observação foram realizadas utilizando o editor TEQC. A Figura 23 esquematiza as configurações utilizadas nos testes.

Figura 23 – Tipo de dados dos processamentos realizados para cada estação (PPP).



Nos processamentos realizados foi utilizada máscara de elevação de 10º. Para os casos com dados apenas de L1, na versão utilizada, o *software* usa a observável pseudodistância. Para modelagem atmosférica são aplicadas as funções de Davis e Hopfied, para as componentes úmida e hidrostática da troposfera, e o IONEX para modelagem ionosférica. Para os casos com L1 e L2 a diferença na configuração fica na utilização das observáveis fase e pseudodistância e em relação ao efeito ionosférico, onde é utilizada a combinação *íon-free*.

5.1.2 Resultados e análises

Os resultados obtidos com o PPP foram comparados com as coordenadas oficiais das estações atualizadas para a época dos dados processados e transformadas de SIRGAS2000 (SIstema de Referência Geocêntrico para as AmericaS) para ITRF2008, referencial ao qual as coordenadas fornecidas pelo *software* da NRCan são associadas. A partir das resultantes das discrepâncias calculadas e dos desvios padrão obtidos nos processamentos foram calculados os erros médios quadráticos 3D (EMQs) que foram utilizados nas análises.

A seguir são apresentados os resultados obtidos. Ressalta-se a diferença nas escalas gráficas, escolhidas com o intuito de permitir melhor visualização dos resultados. Os processamentos com apenas dados da portadora L1 (gráficos A e C) são apresentados com valor máximo de 15 m no eixo do EMQ, enquanto os dados dos processamentos com L1 e L2 (gráficos B e D) possuem valor máximo de 1,5 m. Inicialmente já se nota a clara diferença em todos os casos analisados, entre se utilizar apenas dados de uma ou duas portadoras, pela escala dos gráficos gerados, sendo necessário valor dez vezes maior para representação dos resultados com apenas uma portadora.

Os gráficos são apresentados de acordo com o tempo de dados (30 minutos ou 04 horas) por estação, permitindo comparações entre os meses analisados, as portadoras e constelações utilizadas e os intervalos de tempo de dados. Na Figura 24 são apresentados os gráficos gerados com dados de 30 minutos de dados para a estação CEFT. Nos gráficos A e B são apresentados os resultados de junho, com dados da portadora L1 e portadoras L1 e L2, respectivamente. Nos gráficos C e D são apresentados os resultados de outubro, sendo também utilizados dados de L1 e L1 e L2, respectivamente. Os valores representados pela cor azul são resultados dos processamentos apenas com constelação GPS enquanto os resultados em vermelho são das constelações GPS e GLONASS. Ressalta-se que para o dia 303 os dados da estação CEFT não se encontravam disponíveis, por isso os valores nulos. Em seguida, de maneira análoga, na Figura 25 são apresentados os gráficos gerados com dados de 04 horas de dados também para a estação CEFT.

Figura 24 – Resultados para 30 minutos estação CEFT.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)

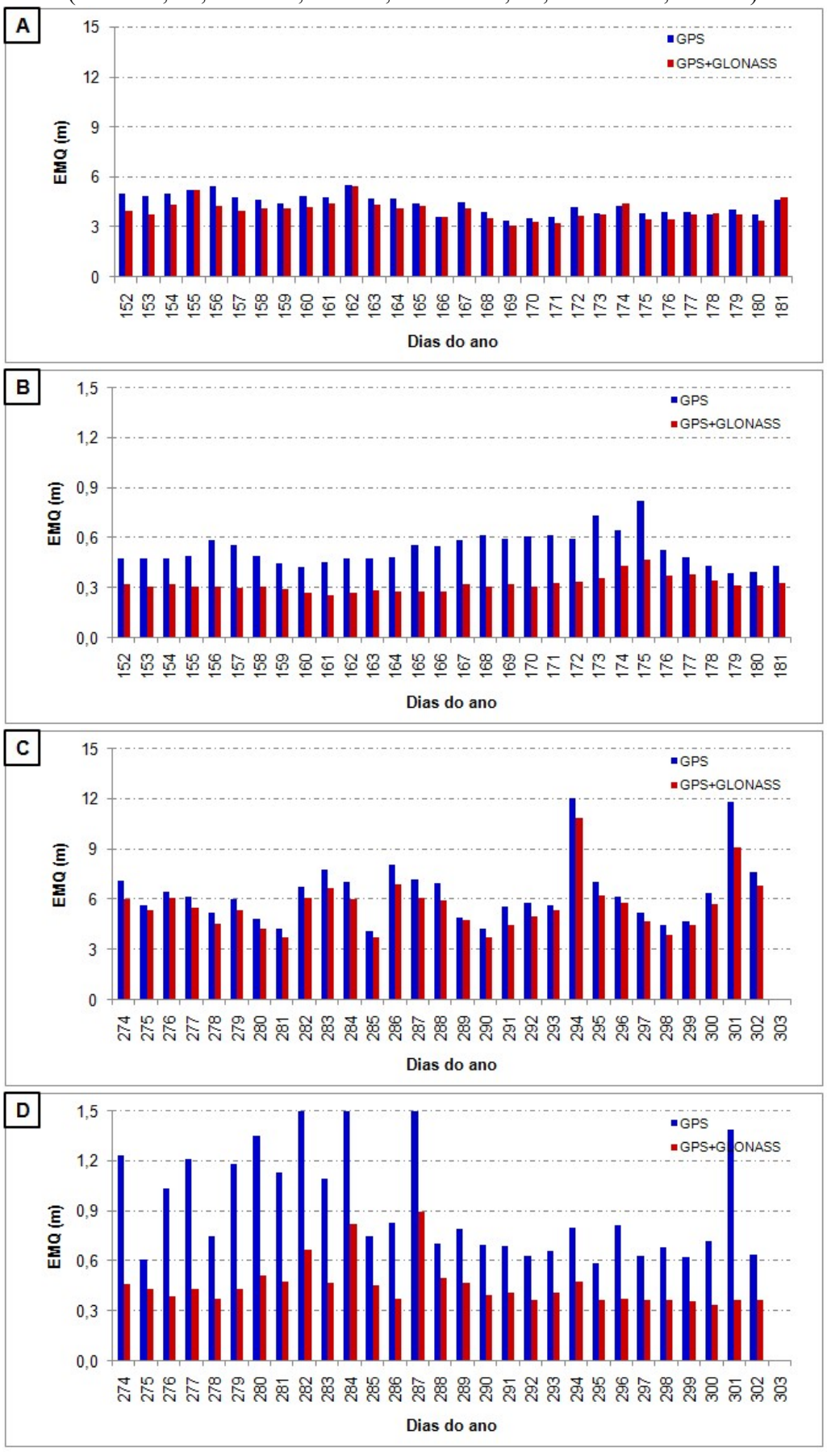
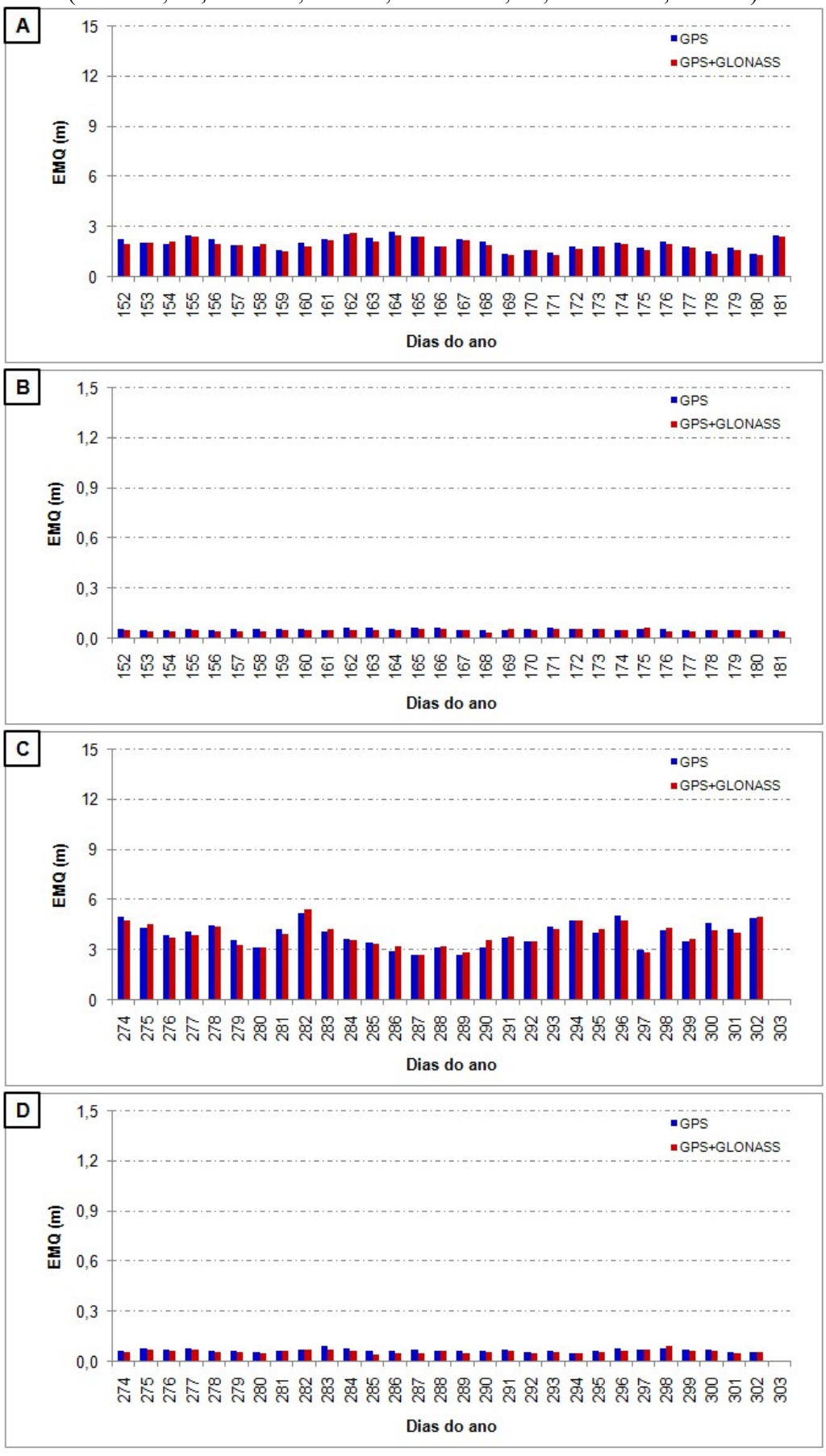


Figura 25 – Resultados para 04 horas estação CEFT.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)



O *software* utilizado realiza processamento apenas da observável pseudodistância, quando disponíveis apenas dados de uma portadora. Com isso, além de se ter uma observável mais ruidosa, a estimativa do erro ionosférico fica dependente da utilização de modelos ou mapas globais, uma vez que com apenas dados de uma portadora não é possível realizar a combinação linear *íon-free*, que permite eliminar os erros de primeira ordem da ionosfera.

Em relação à utilização de dados GPS ou GPS e GLONASS, de maneira geral, fica clara a melhoria nos resultados com a utilização de dados combinados dos dois sistemas. Esse resultado era esperado para o tempo de 30 minutos, uma vez que com pouco tempo de dados a maior quantidade de satélites visíveis deve influenciar diretamente o resultado final.

Observando-se o período do ano dos dados utilizados, junho (gráficos A e B) e outubro (gráficos C e D), é possível notar valores inferiores e comportamento mais regular no mês de junho, período de menor atividade ionosférica. Com os resultados de 04 horas, com dados de dupla frequência, a ordem de grandeza dos resultados de junho e outubro se assemelha mais, apesar de se manter mais elevado em outubro para a maior parte dos dias.

Em relação à época do ano, pode-se ainda comparar os resultados de cada mês por portadora utilizada. De maneira geral, para 30 minutos tanto com L1 quanto com L1 e L2, obteve-se melhoria média em torno de duas vezes maior no período de outubro para uso combinado das constelações. Com 4 horas de dados as melhorias são menores comparando-se os períodos utilizando-se duas frequências. Enquanto para apenas L1 a melhoria em outubro foi 8 cm maior que a obtida em junho, para duas frequências o valor foi em média 1 mm menor em outubro.

Como dito anteriormente, outubro apresenta dados mais irregulares. Comparando os dias 294 e 295 com 30 minutos e dados de L1 (gráfico C, Figura 24), por exemplo, é possível notar discrepância significativamente maior para o dia 294. Analisando os índices S4 (Figura 13) é possível notar maior magnitude da cintilação no dia 294, principalmente para dados GLONASS. O mesmo acontece ao se analisar os primeiros 30 minutos do índice ROTI (Apêndice B, Figura B.2), com valores maiores para o dia 294.

A seguir, na Figura 26, são apresentados os resultados com dados de 30 minutos para a estação PPTE. Já a Figura 27 apresenta os resultados com 04 horas de dados para a mesma estação. A distribuição dos gráficos segue o padrão utilizado anteriormente.

Figura 26 – Resultados para 30 minutos estação PPTE.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)

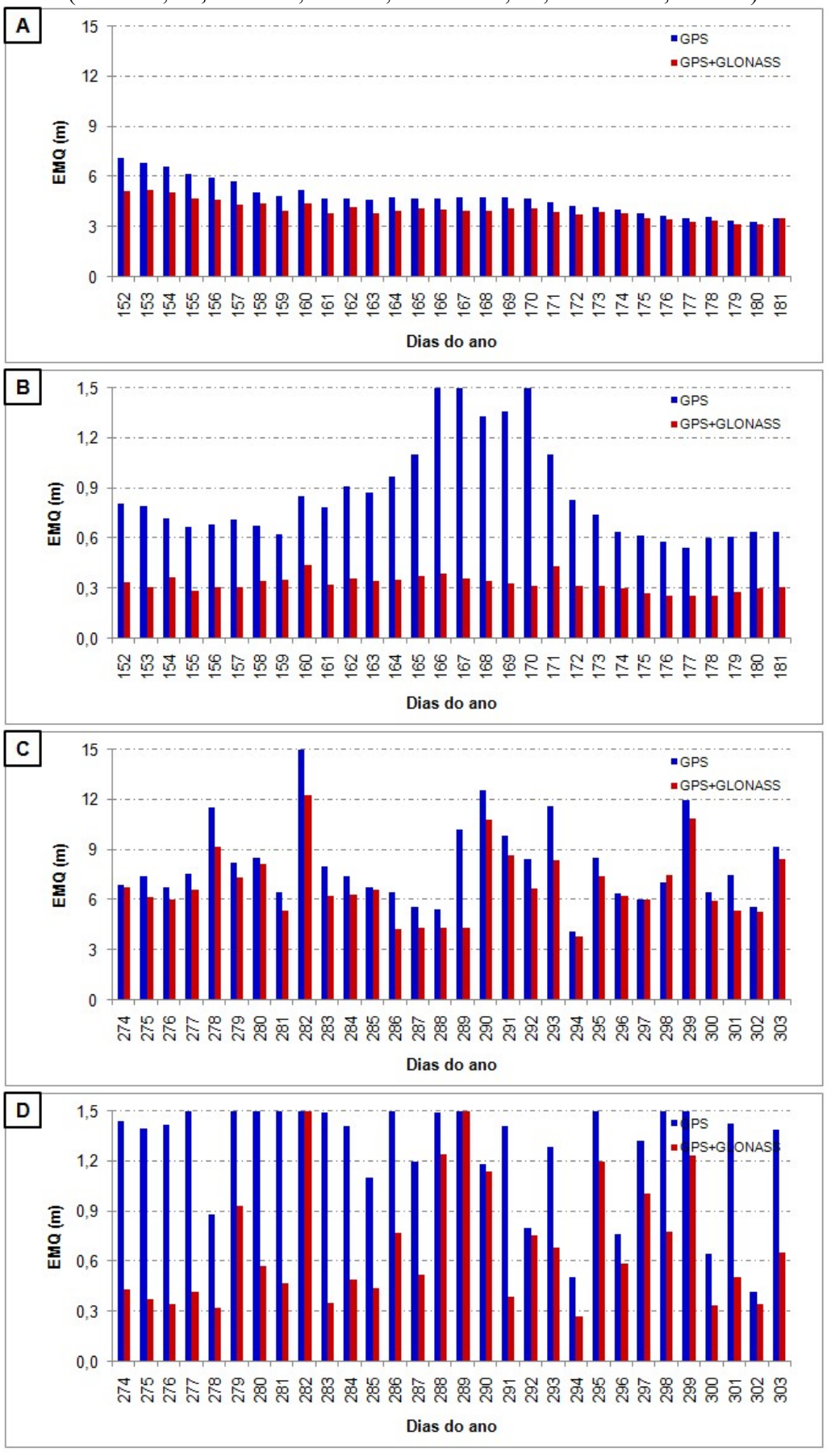
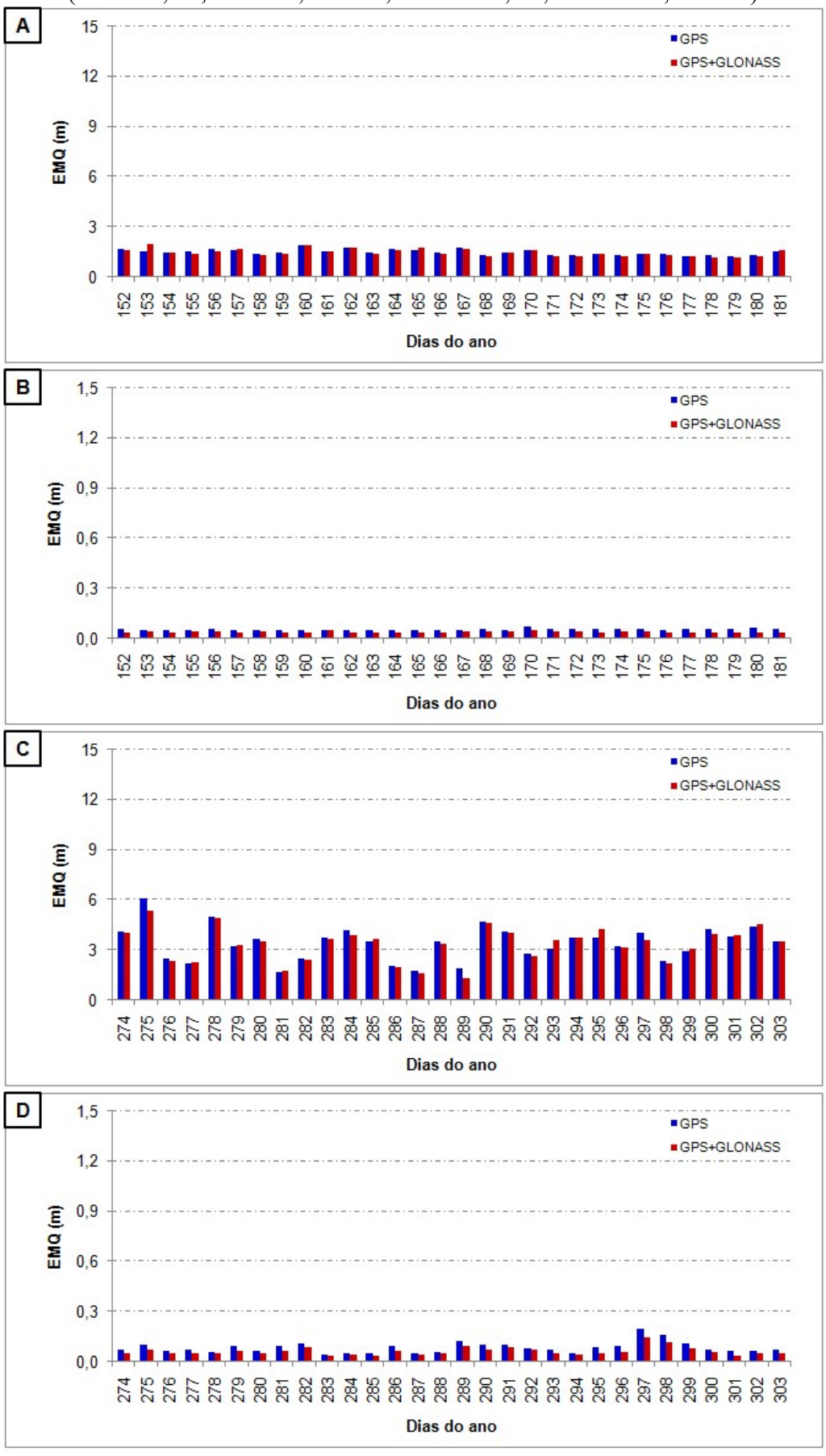


Figura 27 – Resultados para 04 horas estação PPTE.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)



Para os resultados da PPTE os comportamentos apresentados anteriormente se repetem, apresentando, em geral, maiores valores de EMQ. Neste caso, chama atenção o comportamento dos dados de dupla frequência de junho, em que os processamentos apresentaram significativa melhora com o uso de dados GPS/GLONASS. Comparando esses resultados com o correspondente à estação anterior (Figura 24, gráfico B), é possível notar que a maior diferença de comportamento se deu no caso do uso de apenas dados GPS.

Ainda com o tempo de 30 minutos, com L1 e L2, três dias com processamento GPS passaram do valor máximo do gráfico, sendo eles 166, 167 e 170, com valores de EMQ de 1,55, 1,60 e 1, 56 m, respectivamente. Esses dias apresentaram valores de S4 semelhantes ao restante do mês, as médias se mantiveram dentro do considerado como fraca cintilação (Figura 14), e os índices ROTI (Apêndice B, Figura B.9) indicaram baixa irregularidade (inferiores a 0,05). Quanto aos índices mp1 e mp2 (Apêndice C, Figura C.9) estes não foram os dias com diferenças mais significativas, porém, a PPTE foi uma das estações com maior irregularidade em relação aos índices. Para o mês de outubro os resultados foram mais irregulares, com alguns casos bastante discrepantes, e ocorrência de casos como o dia 289 (gráfico C) que alcançou diferença de quase 6 m e índices de irregularidade bastante intensos. Para dados de L1 e L2 mais de um terço dos dias tiveram melhoria superior a 1 m com uso de GPS e GLONASS em relação aos resultados usando apenas GPS.

Para os resultados com dados de 04 horas o comportamento foi semelhante ao observado na estação anterior. Com destaque para dois picos nos dias 297 e 298 com dupla frequência (Figura 27, gráfico D), ambos com altos valores para índice ROTI (Apêndice B, Figura B.9). Observando os índices S4 (Figura 17) é possível notar para esses dois dias ocorrência de cintilação fraca, para os valores médios e maior variação para o GLONASS.

Comparando os meses de junho e outubro por intervalo de dados, para 30 minutos, com dados da L1 a melhoria em outubro foi em torno de 1,8 vezes maior que a de junho. Para dupla frequência a melhoria em outubro foi em torno de 1,3 vezes maior que a de junho. Para 4 horas, com uso da L1 houve melhoria em outubro em torno de 3,8 vezes maior que a de junho. Para dupla frequência a melhoria foi 50% superior ao valor de junho, o que corresponde a 7 mm de diferença no EMQ.

Na Figura 28 são apresentados os resultados com 30 minutos de dados para a estação POAL. Já a Figura 29 apresenta os resultados com 04 horas de dados, a distribuição dos gráficos continua seguindo o padrão utilizado anteriormente. Para o dia 296 não haviam dados disponíveis, levando aos valores nulos da representação gráfica.

Figura 28 – Resultados para 30 minutos estação POAL.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)

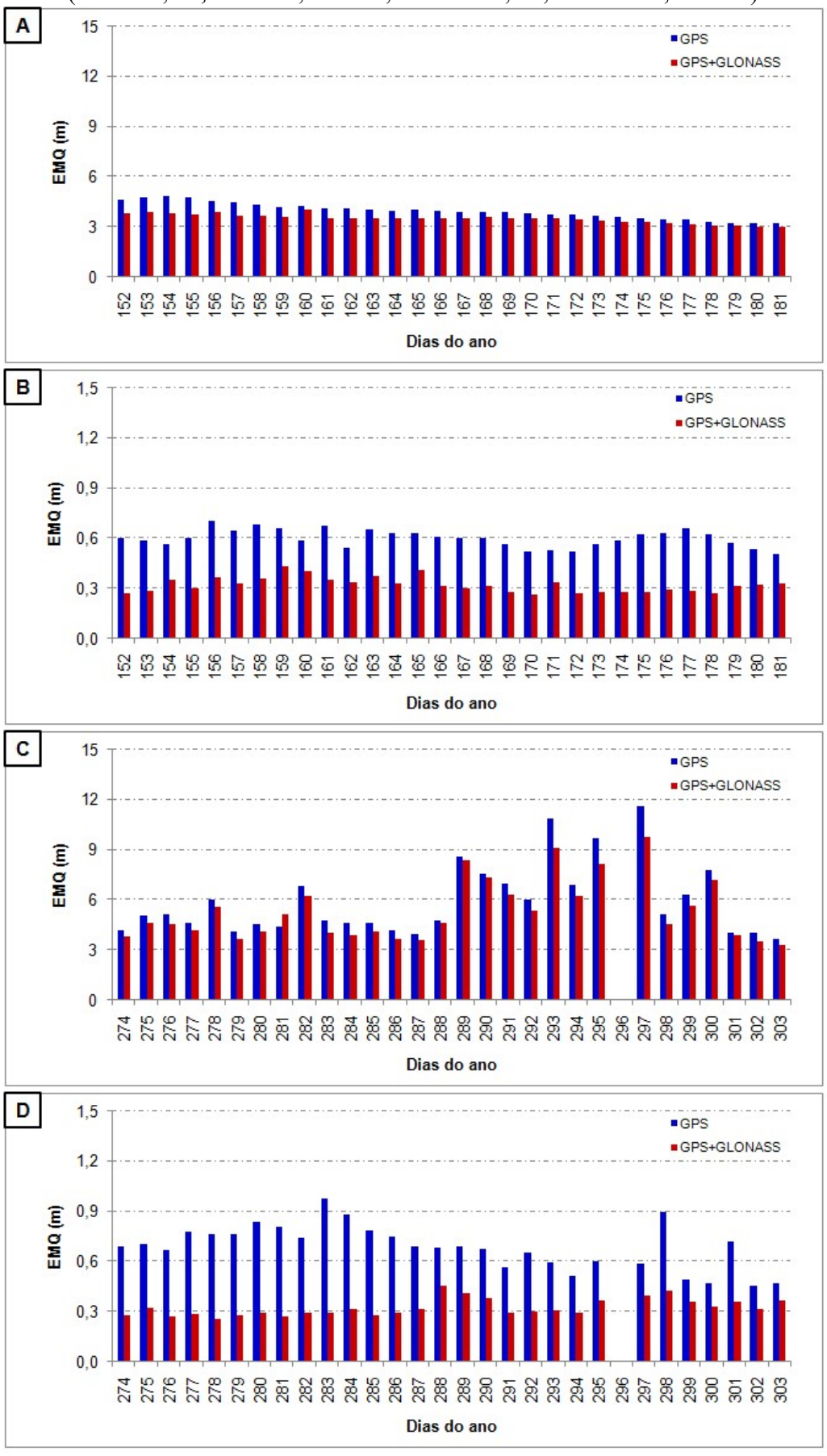
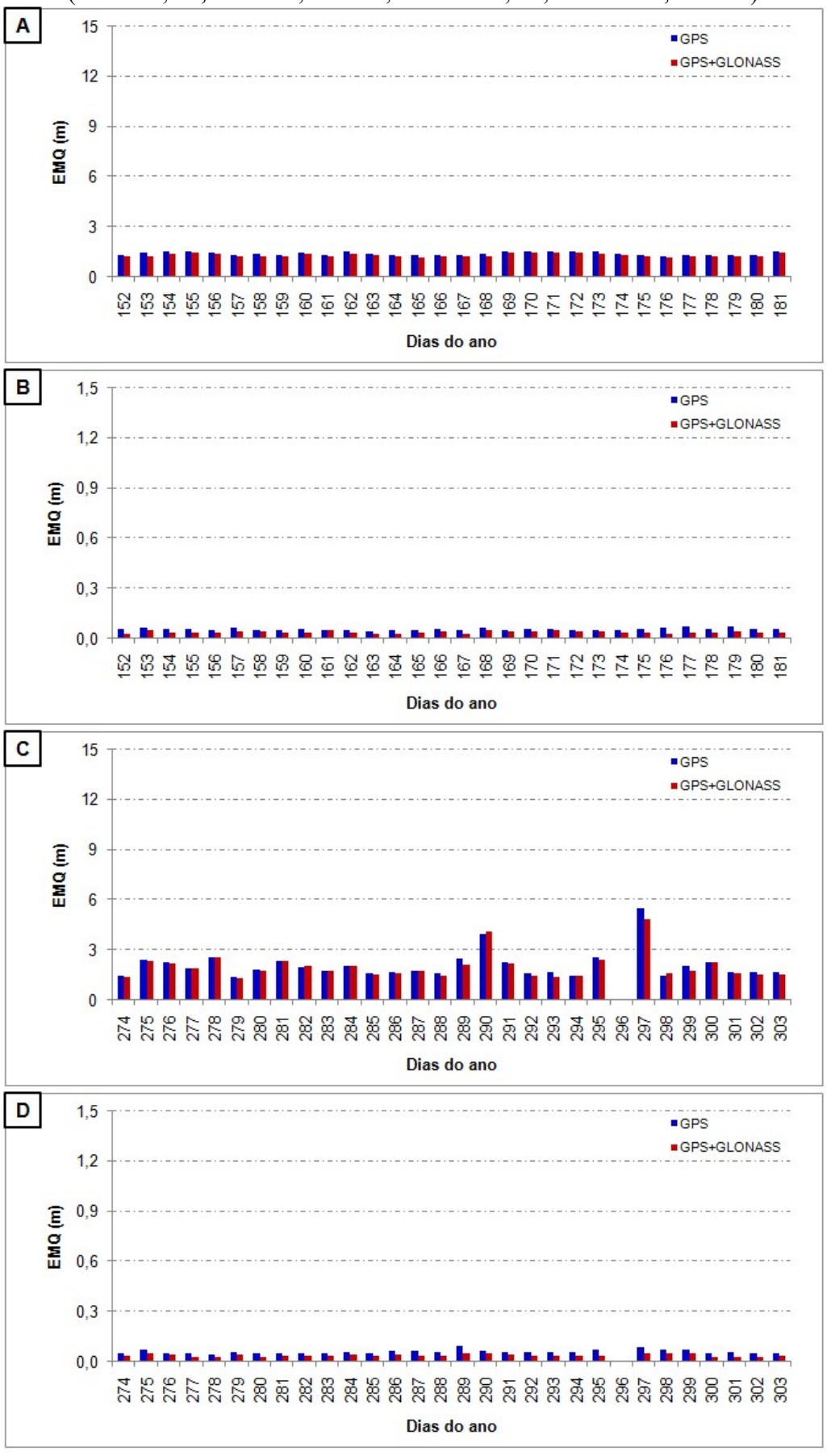


Figura 29 – Resultados para 04 horas estação POAL.
(A: Junho, L1; B: Junho, L1 e L2; C: Outubro, L1; D: Outubro, L1 e L2)



De maneira geral, além do mesmo comportamento observado nas demais estações para o uso de L1 em relação aos dados de junho e outubro, nota-se na estação POAL um comportamento mais regular dos EMQs obtidos principalmente para o mês de junho e para o mês de outubro quando se utilizaram dados das duas portadoras. Para esta estação, com o uso de dados de L1 e L2 e de ambas as constelações, o período de outubro obteve resultados em geral semelhantes aos de junho.

As maiores variações são visíveis para os resultados com 30 minutos, para 04 horas de dados os resultados são melhores que nas configurações anteriores. Além disso, neste caso têm-se os melhores resultados utilizando dados apenas da portadora L1, já para os resultados utilizando dados das duas portadoras os resultados foram mais semelhantes aos das demais estações, tanto para junho quanto para outubro. Vale lembrar que a estação POAL encontra-se na região com menor variação de comportamento ionosférico entre as três estações analisadas.

Comparando os resultados dos dois meses para 30 minutos com L1 e com L1 e L2, obteve-se em outubro em torno de 10 cm a mais de melhoria que junho. Para o período de 4 horas, com dados da L1 obteve-se melhoria 1,5 cm maior em outubro. Para L1 e L2 junho teve melhoria 3 mm menor que em outubro.

Entre os dados de 04 horas com dados de L1 do mês de outubro (Figura 29, gráfico C) um dos casos com variação nos EMQs ocorre para os dias 289 e 290. A partir dos índices S4 (Figura 18) a diferença de intensidade não é tão grande, ficando os valores médios de S4 dentro da classificação de cintilação fraca, porém, o índice ROTI (Apêndice B, Figura B.8) indica maior variação nas irregularidades para o dia 290.

Observou-se ainda, a partir dos relatórios de processamento, que os dias com maiores discrepâncias não tiveram grande diferença no número de observações, porém, tiveram maior número de observações rejeitadas, indicando que possivelmente esses dias apresentaram dados com pior qualidade.

Na Tabela 8 são apresentadas as porcentagens de dias com melhorias ao inserir os dados GLONASS no posicionamento de acordo com cada configuração, a média e desvio padrão das melhorias em cada caso. As médias de melhorias foram calculadas a partir da subtração do EMQ obtido com dados GPS/GLONASS dos resultados com apenas dados GPS. Portanto, valores positivos correspondem a melhoria no desempenho com a adição dados GLONASS e valores negativos indicam piora. A configuração da estação CEFT para outubro com 04 horas e dados apenas de L1 apresentou a menor porcentagem entre os casos analisados (52%).

Tabela 8 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria (PPP).

Estação	Mês	Intervalo de dados	Portadora	Melhoria com GPS+GLONASS		
				Dias	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
CEFT	Junho	30 min	L1	87%	37,0	34,4
			L1+L2	100%	21,0	8,0
		04 horas	L1	80%	9,0	11,0
			L1+L2	87%	0,7	0,6
	Outubro	30 min	L1	100%	76,3	48,2
			L1+L2	100%	51,8	32,7
		04 horas	L1	52%	1,0	20,9
			L1+L2	90%	0,8	0,8
PPTE	Junho	30 min	L1	97%	71,9	50,4
			L1+L2	100%	54,4	29,5
		04 horas	L1	80%	1,7	10,4
			L1+L2	100%	1,5	0,5
	Outubro	30 min	L1	93%	128,0	125,6
			L1+L2	97%	72,9	50,8
		04 horas	L1	70%	6,5	25,8
			L1+L2	100%	2,2	1,2
POAL	Junho	30 min	L1	100%	45,4	24,2
			L1+L2	100%	27,9	5,4
		04 horas	L1	100%	8,2	3,3
			L1+L2	100%	1,8	0,7
	Outubro	30 min	L1	97%	56,3	49,3
			L1+L2	100%	36,2	15,2
		04 horas	L1	86%	9,7	16,1
			L1+L2	100%	2,1	0,7

É possível notar que, apesar de algumas médias de melhorias serem significativas, grande parte dessas tem variabilidade alta. Porém, apenas cinco (destacadas em cinza) das vinte e quatro configurações analisadas possuem o desvio padrão maior que a média das melhorias. Ressalta-se que em todas as configurações adotadas houve melhoria em mais de 50% dos dias com o uso de dados GPS/GLONASS combinados. E, além disso, em metade das configurações testadas houve melhoria em todos os dias analisados. Considerando todos os dias selecionados, independente da configuração, houve melhoria em 92,28% dos dias analisados. A Tabela 9 apresenta as porcentagens dos dias com melhorias de acordo com o mês, intervalo de tempo de dados, portadora e estação.

Tabela 9 – Porcentagens de dias com melhorias para PPP.

Categoria	Dias com melhoria
Mês de junho	94,17%
Mês de outubro	90,34%
Dados da portadora L1	86,80%
Dados das portadoras L1 e L2	97,75%
Intervalo de tempo de 30 minutos	97,47%
Intervalo de tempo de 04 horas	87,08%
Estação CEFT	86,86%
Estação PPTE	92,08%
Estação POAL	97,88%

Conforme apresentado, em todas as categorias analisadas houve melhoria em mais de 86% dos casos. Em relação aos meses selecionados, o mês de junho apresentou melhoria em mais dias que o mês de outubro. Quanto aos dados de uma ou duas portadoras, com dados de dupla frequência houve melhoria em quase 11% a mais dos dias, em relação aos dados de uma frequência. As maiores porcentagens de dias com melhorias ocorreram no menor tempo de dados, como esperado. E quanto às estações a que obteve maior quantidade de dias com melhoria ao se utilizar dados combinados foi a estação POAL, seguida da PPTE e CEFT.

Outra análise realizada foi em relação aos resultados obtidos em sistema geodésico local (SGL), objetivando identificar se algum padrão poderia ser encontrado. Os gráficos obtidos para cada componente de todas as configurações são apresentados no Apêndice D. Para análise, além da visualização gráfica, foram utilizadas as médias das componentes de cada mês por configuração. Os valores obtidos são apresentados a seguir na Tabela 10, para os processamentos com dados GPS e GPS+GLONASS. As diferenças de tons de cinza foram utilizadas para ressaltar em cada configuração a componente com maior e menor valor. O branco representa os menores valores e o tom de cinza mais escuro os maiores. As configurações são dadas pelo nome da estação, mês de referência, intervalo de tempo de dados e portadoras utilizadas. Assim, por exemplo, para estação CEFT, com dados de junho, de 30 minutos e da portadora L1 a sigla correspondente é CEFT_J_30_L1.

Tabela 10 – Médias das componentes em sistema geodésico local (PPP).

Configuração	GPS			GPS+GLONASS		
	E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)
CEFT_J_30_L1	0,089	0,833	-1,732	0,108	0,795	-1,816
PPTE_J_30_L1	0,265	-0,088	-0,033	0,170	-0,202	-0,426
POAL_J_30_L1	-0,018	-0,049	-0,471	0,037	0,006	-0,373
CEFT_O_30_L1	-0,774	1,448	-1,606	-0,968	1,346	-1,687
PPTE_O_30_L1	0,748	-1,439	-1,349	0,813	-1,339	-1,475
POAL_O_30_L1	0,721	-1,196	1,548	0,579	-0,705	1,868
CEFT_J_04_L1	-0,059	0,700	-1,386	0,044	0,653	-1,354
PPTE_J_04_L1	0,345	-0,307	-0,228	0,353	-0,394	-0,345
POAL_J_04_L1	0,065	0,173	-0,525	0,088	0,266	-0,474
CEFT_O_04_L1	-0,814	2,264	-2,355	-0,851	2,121	-2,593
PPTE_O_04_L1	1,515	-1,597	-0,049	1,497	-1,628	0,010
POAL_O_04_L1	0,393	0,199	0,605	0,380	0,279	0,553
CEFT_J_30_L1_L2	0,034	0,032	-0,029	0,036	0,025	-0,013
PPTE_J_30_L1_L2	0,063	0,017	0,052	0,019	0,006	-0,009
POAL_J_30_L1_L2	0,006	-0,004	-0,005	0,000	-0,003	-0,020
CEFT_O_30_L1_L2	-0,149	0,078	0,033	-0,033	0,037	0,016
PPTE_O_30_L1_L2	0,021	-0,003	-0,033	0,186	-0,030	-0,106
POAL_O_30_L1_L2	-0,027	-0,005	0,029	-0,016	-0,001	0,008
CEFT_J_04_L1_L2	0,021	0,022	0,006	0,018	0,021	0,005
PPTE_J_04_L1_L2	0,014	0,015	-0,010	0,012	0,014	-0,012
POAL_J_04_L1_L2	-0,003	0,000	-0,027	0,001	0,000	-0,022
CEFT_O_04_L1_L2	0,020	0,027	0,014	0,023	0,029	0,005
PPTE_O_04_L1_L2	0,006	0,013	-0,003	0,010	0,016	-0,003
POAL_O_04_L1_L2	-0,007	-0,005	-0,015	-0,001	-0,001	-0,012

No geral, a componente mais afetada é a coordenada U, as demais componentes apresentam maior variação de comportamento. É possível notar predominância de menores valores na componente E para as configurações com apenas L1. Para o uso de L1 e L2 a maior parte dos menores valores ficou entre as componentes N e U, sendo que para uso de GPS e GLONASS os valores mais altos alternaram entre a componente N e E, já para apenas dados GPS a componente N foi menos afetada que a U na maior parte dos casos. O mesmo comportamento pode ser observado nos dados apresentados nos gráficos do Apêndice D.

Na Tabela 11 são apresentados os desvios padrão das médias das componentes em sistema geodésico local, nela são destacados em cinza os valores superiores a 1m.

Tabela 11 – Desvios padrão das médias das componentes em SGL (PPP).

Configuração	GPS			GPS+GLONASS		
	E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)
CEFT_J_30_L1	0,296	0,622	0,944	0,331	0,570	0,987
PPTE_J_30_L1	0,244	0,432	0,973	0,245	0,386	0,972
POAL_J_30_L1	0,119	0,240	0,308	0,140	0,337	0,446
CEFT_O_30_L1	2,125	2,107	3,799	1,889	1,855	3,101
PPTE_O_30_L1	1,906	3,521	5,771	1,796	3,105	4,517
POAL_O_30_L1	1,711	3,113	2,834	1,443	2,539	2,745
CEFT_J_04_L1	0,164	0,289	0,475	0,187	0,279	0,480
PPTE_J_04_L1	0,265	0,385	0,361	0,269	0,363	0,463
POAL_J_04_L1	0,099	0,149	0,221	0,096	0,165	0,225
CEFT_O_04_L1	0,742	0,921	1,286	0,760	0,860	1,110
PPTE_O_04_L1	0,943	1,350	1,820	0,855	1,337	1,824
POAL_O_04_L1	0,780	0,924	1,175	0,698	0,870	1,191
CEFT_J_30_L1_L2	0,072	0,025	0,106	0,060	0,021	0,048
PPTE_J_30_L1_L2	0,103	0,035	0,122	0,069	0,017	0,047
POAL_J_30_L1_L2	0,066	0,028	0,087	0,051	0,017	0,048
CEFT_O_30_L1_L2	0,205	0,052	0,185	0,096	0,053	0,097
PPTE_O_30_L1_L2	0,095	0,063	0,148	0,912	0,230	0,615
POAL_O_30_L1_L2	0,087	0,032	0,085	0,052	0,024	0,057
CEFT_J_04_L1_L2	0,010	0,007	0,024	0,010	0,007	0,028
PPTE_J_04_L1_L2	0,006	0,003	0,013	0,005	0,003	0,010
POAL_J_04_L1_L2	0,009	0,004	0,011	0,007	0,004	0,011
CEFT_O_04_L1_L2	0,010	0,005	0,029	0,011	0,005	0,031
PPTE_O_04_L1_L2	0,014	0,006	0,017	0,012	0,006	0,020
POAL_O_04_L1_L2	0,006	0,007	0,016	0,005	0,006	0,013

Os processamentos com dados de apenas uma portadora apresentaram maiores valores de desvio padrão. As configurações com apenas L1 que obtiveram valores superiores a 1 m foram as de outubro com 30 minutos de dados. Com dados de 04 horas a componente U das configurações de outubro também passou de 1 m, assim como a componente N da estação PPTE, para o mesmo período. Nenhuma configuração com dados de dupla frequência alcançou o valor citado, a estação PPTE foi a que mais se aproximou, na componente E para o período de outubro com 30 minutos e dados GPS/GLONASS.

5.2 POSICIONAMENTO RELATIVO

5.2.1 Metodologia

Para os experimentos com posicionamento relativo também foram selecionadas três regiões de diferentes comportamentos ionosféricos. Neste caso, na região próxima ao equador geomagnético, foi utilizado como ponto a ter as coordenadas estimadas a estação PBCG em Campina Grande. Na região afetada pelo efeito fonte foi selecionada a estação SPDR em Dracena e, com menor efeito ionosférico, a estação SCLA em Lages. A Figura 30 apresenta a distribuição das estações de interesse pelo território nacional.

Figura 30 – Distribuição das estações de interesse selecionadas para posicionamento relativo.

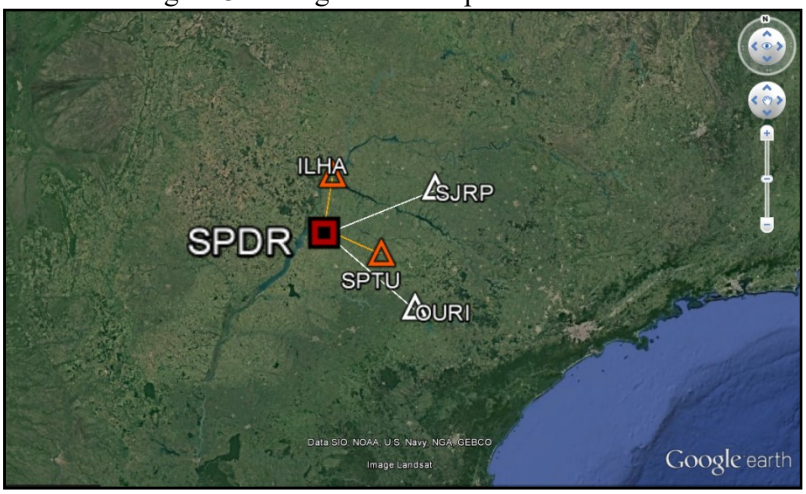
Fonte: Google Earth (2017).

Buscou-se selecionar estações base que possibilitassem estimar as coordenadas de uma mesma estação com duas linhas de base menores e duas maiores, levando em conta a distribuição em regiões com diferentes comportamentos ionosféricos. Nas figuras a seguir são apresentadas as linhas de base menores (em laranja) e maiores (em branco) utilizadas para a determinação das posições das estações de interesse. Na Figura 31 são apresentadas as linhas de base da estação PBCG, na Figura 32 as linhas da estação SPDR e na Figura 33 as da estação SCLA. Vale ressaltar que, como foram utilizadas as estações da RBMC, a seleção ficou limitada à disponibilidade e distribuição das estações da rede.

Figura 31 – Região próxima ao equador geomagnético.

Fonte: Google Earth (2017).

Figura 32 – Região afetada pelo efeito fonte.



Fonte: Google Earth (2017).

Figura 33 – Região com menor atividade ionosférica.

Fonte: Google Earth (2017).

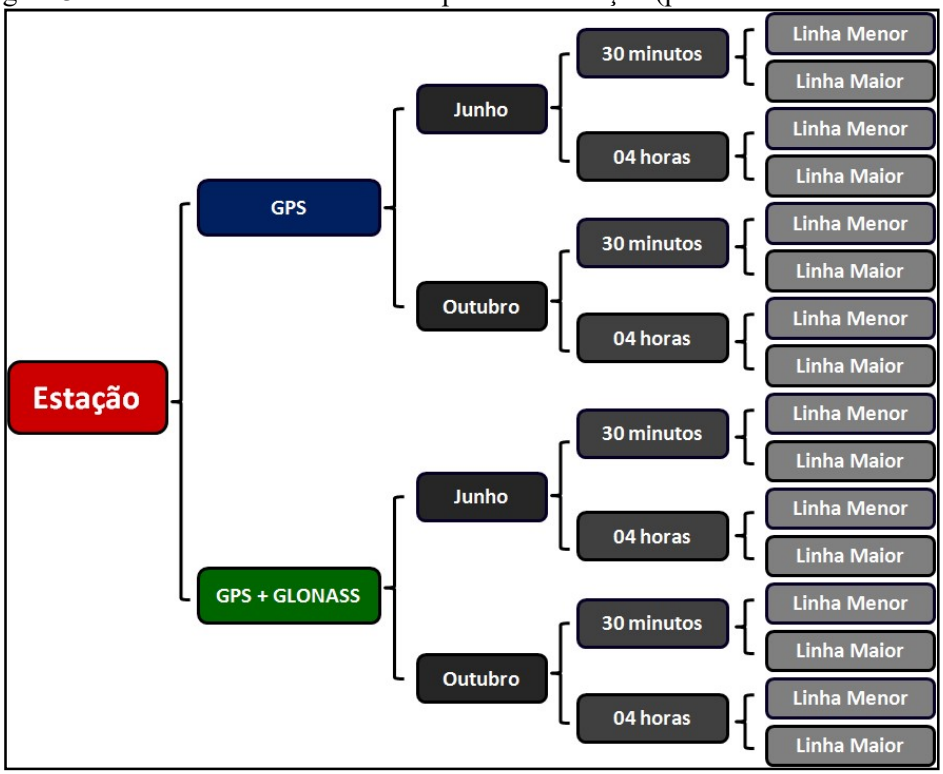
A Tabela 12 apresenta as linhas de base formadas entre as estações com as respectivas bases e comprimentos de linhas de base.

Tabela 12 – Linhas de bases formadas.

Estação	Linhas Menores		Linhas Maiores	
	Bases	Comprimento (km)	Bases	Comprimento (km)
PBCG (Campina Grande)	**PBJP** (João Pessoa)	115	**RNMO** (Mossoró)	280
	RECF (Recife)	140	**ALAR** (Arapiraca)	290
SPDR (Dracena)	**ILHA** (Ilha Solteira)	120	**SJRP** (São José do Rio Preto)	240
	SPTU (Tupã)	120	**OURI** (Ourinhos)	240
SCLA (Lages)	**IMBT** (Imbituba)	170	**SCCH** (Chapecó)	230
	SCFL (Florianópolis)	180	**POAL** (Porto Alegre)	270

Os processamentos foram realizados no modo estático utilizando o *software* comercial TBC (*Trimble Business Center*). Foram configurados processamentos utilizando somente dados da constelação GPS e com dados das constelações GPS e GLONASS. Novamente foram utilizados dados dos meses de junho e outubro de 2014, com intervalo de tempo de 30 minutos e 04 horas (com início às 00h TU). A Figura 34 esquematiza as configurações utilizadas nos testes.

Figura 34 – Processamentos realizados para cada estação (posicionamento relativo).



Para os processamentos foi utilizado o SIRGAS2000 como sistema de referência. Os dados utilizados foram de dupla frequência com intervalo de coleta de 15

segundos e, além disso, foram utilizadas efemérides transmitidas[3] e máscara de elevação de 10 graus. Para o ajustamento o nível de confiança adotado foi de 1 sigma.

5.2.2 Resultados e análises

Os resultados obtidos para o posicionamento relativo foram comparados com as coordenadas oficiais das estações em SIRGAS2000 atualizadas para a época dos dados processados. A partir das resultantes das discrepâncias calculadas e dos desvios padrão obtidos nos processamentos foram calculados os EMQs 3D que foram utilizados nas análises.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com os processamentos. Ressalta-se novamente a diferença nas escalas gráficas, escolhidas com o intuito de permitir melhor visualização e comparação dos resultados. Os processamentos com dados de junho (gráficos A e B) são apresentados com valor máximo de 1,5 m no eixo do EMQ, enquanto os resultados dos processamentos com dados de outubro (gráficos C e D) possuem valor máximo de 15 m.

De maneira análoga ao PPP os gráficos são apresentados de acordo com o intervalo de tempo (30 minutos ou 04 horas) por estação, permitindo comparações entre os meses analisados, os tamanhos das linhas de base, constelações utilizadas e os intervalos de tempo. Nos processamentos com PPP apenas dois dias não tiveram dados disponíveis, já para o posicionamento relativo mais dias apresentaram problemas, pois cada processamento era dependente de três estações. Com isso, falhas de coleta em qualquer uma das três estações envolvidas impossibilitaram o processamento na referente configuração. No Apêndice E é apresentada uma tabela com as configurações sem processamentos e a respectiva estação que apresentou problema na coleta de dados.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para estimar as coordenadas da estação PBCG. Os gráficos A e B apresentam os resultados de junho, com linhas de base menores e maiores, respectivamente. Nos gráficos C e D são apresentados os resultados de outubro, também a partir das linhas de base menores e maiores, respectivamente. Os valores apresentados na cor azul são resultados dos processamentos apenas com constelação GPS enquanto os resultados em vermelho são das constelações GPS e GLONASS. Na Figura 35 são apresentados os processamento com 30 minutos de dados. Na Figura 36 são apresentados os gráficos gerados com dados de 04 horas de dados.

[3]Foram utilizadas efemérides transmitidas, pois a versão disponível para o *software* TBC (versão 2.81) não realiza o processamento de dados GLONASS com efemérides precisas.

Figura 35 – Resultados para 30 minutos estação PBCG.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)

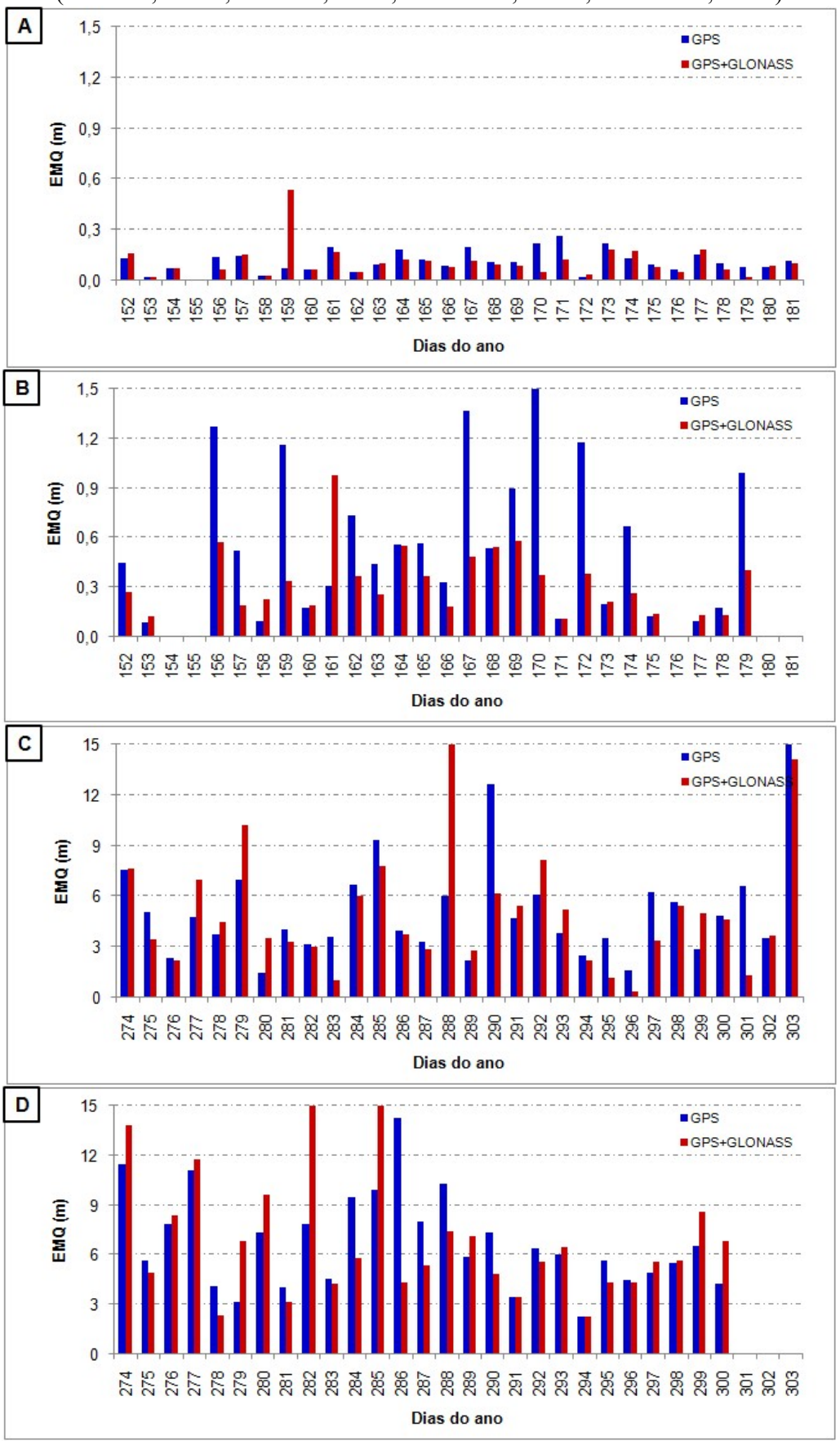
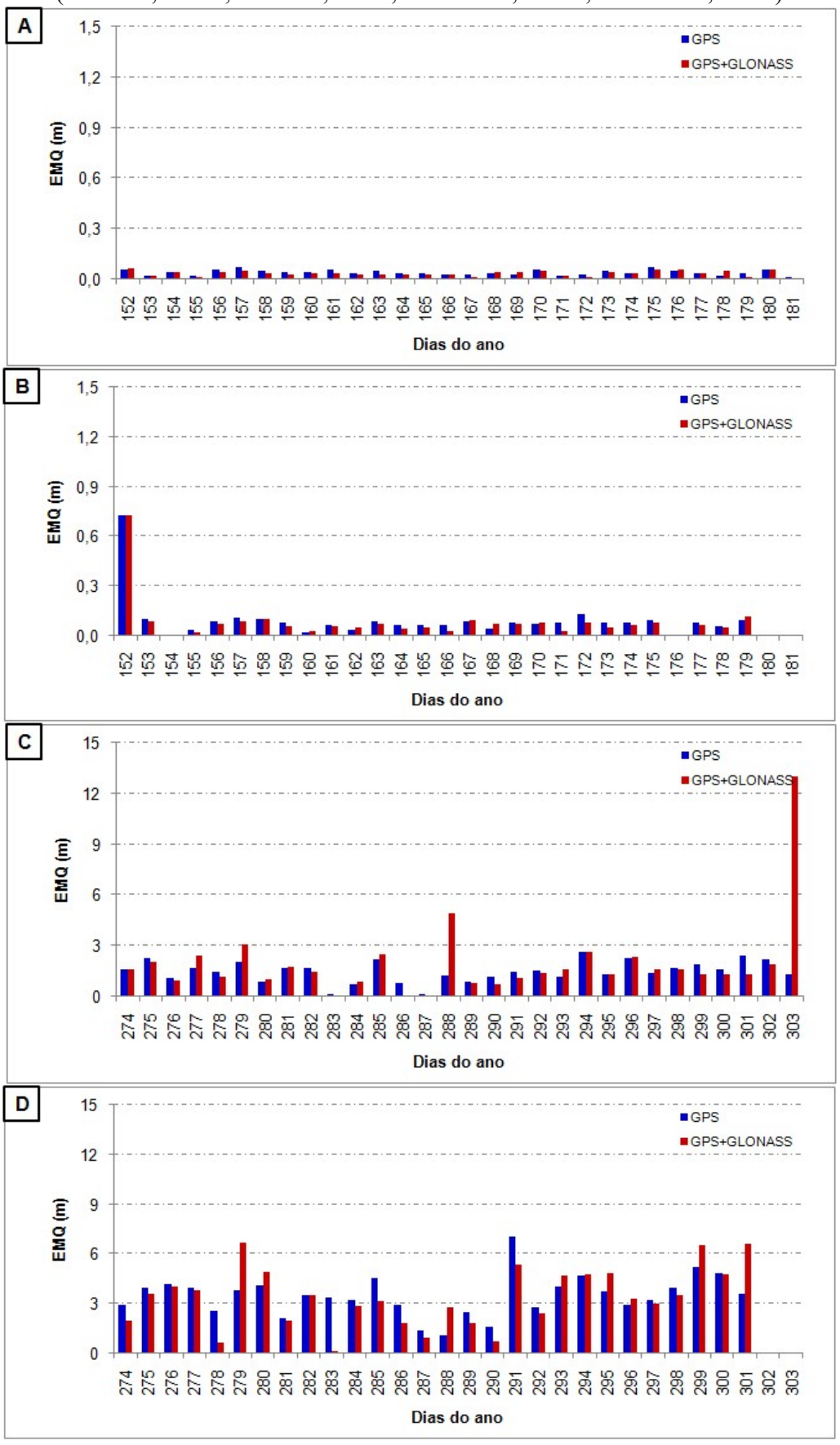


Figura 36 – Resultados para 04 horas estação PBCG.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)



Como citado anteriormente, no mês de outubro a ionosfera tem atividade mais intensa e, além disso, a estação em questão se encontra próxima ao equador geomagnético, o que pode ter levado a EMQs mais elevados, principalmente no período de maior atividade ionosférica. Analisando os gráficos fica clara a diferença de comportamento dos resultados com linhas de base menores e maiores, sendo mais regular com os resultados das linhas de base menores. Para o mês de outubro (gráficos C e D) os resultados são mais discrepantes e irregulares independentemente do comprimento das linhas de base. É possível notar que alguns dias apresentaram grande discrepância entre os processamentos com GPS ou GPS/GLONASS. Para fins de comparação algumas análises foram refeitas para casos onde as discrepâncias alcançaram valores próximos a 10 m. As diferenças são apresentadas no fim dessa seção na Tabela 15.

Para o período de 04 horas de dados os resultados são menos discrepantes, mas, ainda assim, os dados de junho apresentam resultados melhores e mais regulares que os de outubro. Para esses dados as altas discrepâncias não foram tão frequentes quanto na configuração de 30 minutos. As maiores diferenças entre processamentos com GPS ou GPS/GLONASS ocorreram nos dias 288 e 303 do mês de outubro com linha de base menor. Como apenas o dia 303 obteve diferença em torno de 10 m apenas esse dia foi retirado na segunda análise realizada. É possível notar que para este dia o aumento no tempo só trouxe melhoria significativa quando foram utilizados apenas dados GPS, com GPS e GLONASS a ordem de grandeza do EMQ obtido foi quase a mesma para 30 minutos ou 04 horas de dados. Para este dia os índices ROTI das três estações envolvidas foram significativamente maiores para o dia 303 comparando-se, por exemplo, com o dia 302 (Apêndice B, Figura B.6, Figura B.7 e Figura B.10).

Em relação aos dados utilizados, nota-se melhoria nos resultados na maior parte dos dias analisados com a adição de dados GLONASS. Em apenas uma das configurações (dados de junho com 30 minutos e linhas de bases maiores) não houve melhoria em mais de 50% dos dias com o uso de dados combinados.

Na Figura 37 são apresentados os gráficos gerados com dados de 30 minutos de dados para a estação SPDR. Na Figura 38 são apresentados os gráficos gerados com 04 horas de dados.

Figura 37 – Resultados para 30 minutos estação SPDR.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)

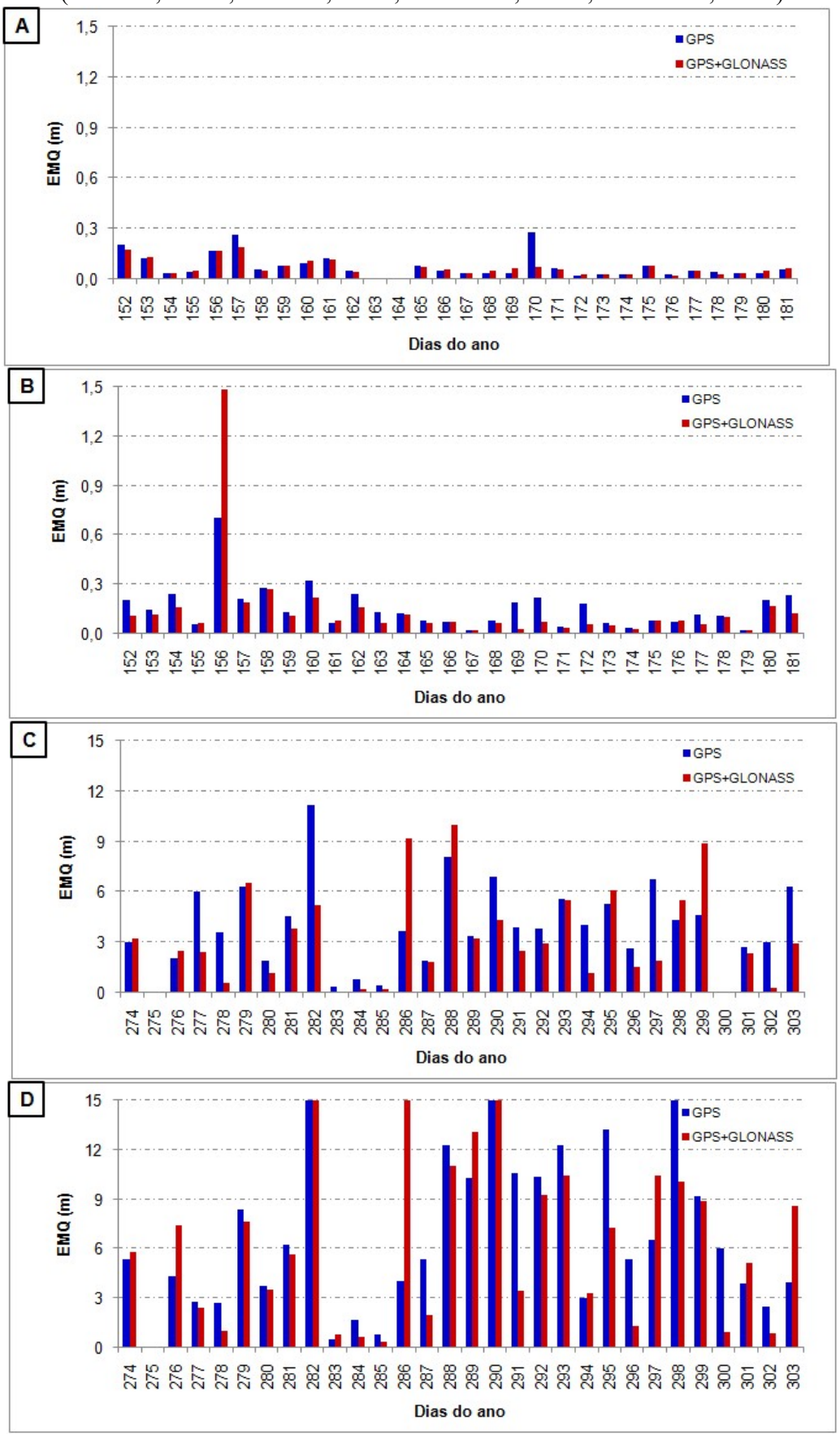
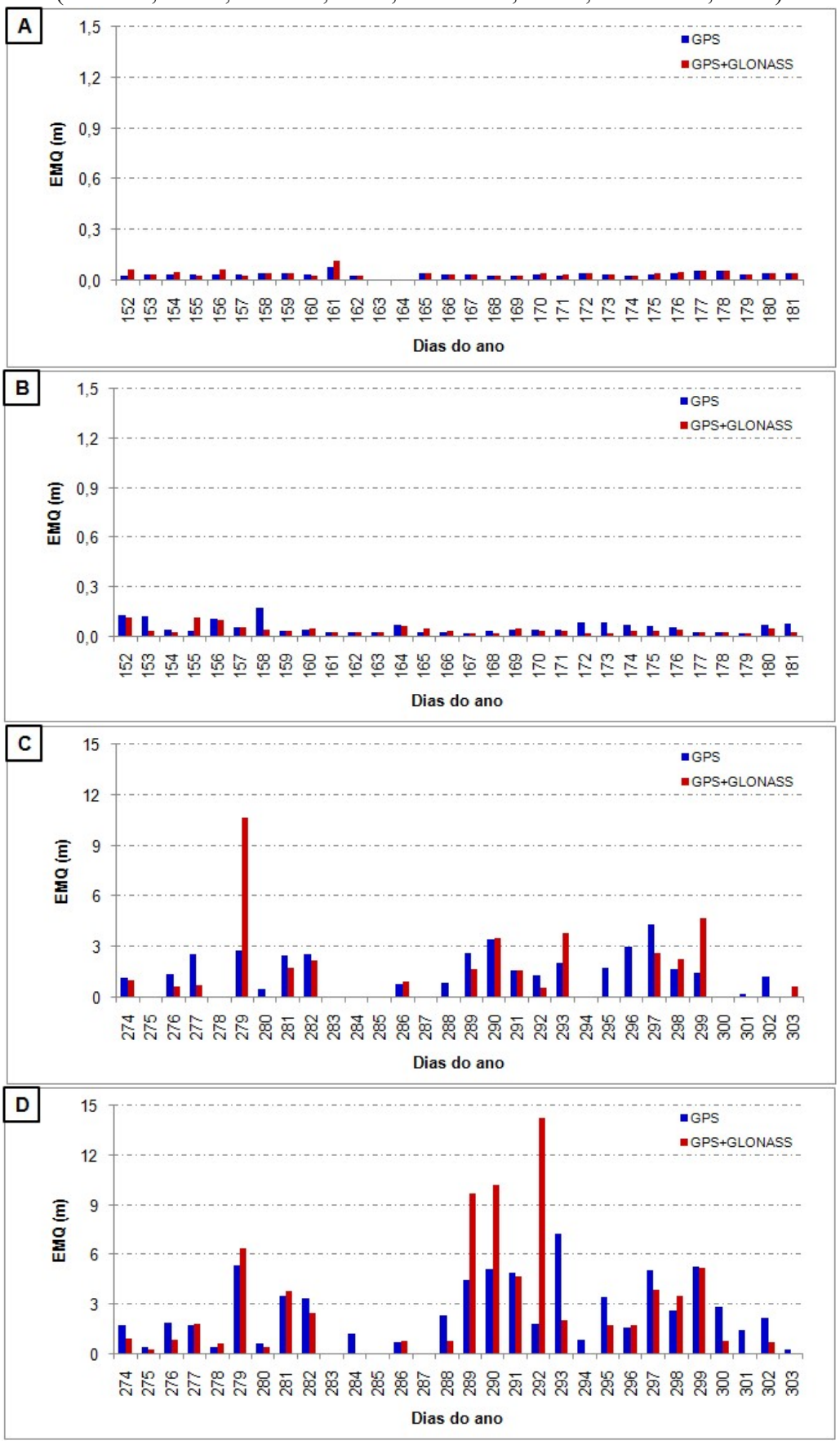


Figura 38 – Resultados para 04 horas estação SPDR.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)



Para o mês de junho com 30 minutos a diferença não é tão grande entre os resultados para linhas de base menores e maiores. Mas ainda assim nota-se comportamento mais regular e erros menores para as linhas de base menores. Os valores obtidos para outubro apresentam valores mais irregulares, principalmente para as linhas de base maiores. Junho apresenta valores um pouco maiores no começo do mês, já em outubro os valores mais altos se concentram na segunda metade do mês para bases maiores. Vale lembrar que esta estação encontra-se em região com intensa atividade ionosférica, podendo ser esta a causa de valores mais irregulares principalmente em outubro.

Novamente nota-se significativa diferença nos resultados para 4 horas, tendo comportamento mais regular e menores erros, se comparados à configuração com 30 minutos. E, em relação aos meses, o mês de outubro apresenta erros maiores e comportamento mais irregular. Quanto aos tamanhos de linhas de base, para o mês de junho as linhas maiores apresentaram valores um pouco maiores. Em outubro é possível notar maior diferença entre os resultados, com valores mais discrepantes para linhas maiores, principalmente na segunda metade do mês.

Em relação à utilização de dados GLONASS, em todas as configurações adotadas houve melhoria em mais da metade dos casos ao se utilizar dados combinados. A menor taxa de dias com melhoria foi para junho, com 04 horas de dados e linhas de base menores, com 57% dos dias com melhorias. Já a com maior taxa foi a configuração de junho, com 30 minutos de dados e linhas de base maiores, em que 83% dos dias tiveram melhoria com o uso de dados da constelação GLONASS.

Houve ocorrência também de dias com maiores discrepâncias no EMQ e que não apresentaram variação nos índices ROTI e S4, como para os resultados com linhas de base maiores, com dados de junho (Figura 37, gráfico B). Nos dias 155 e 156 existe grande variação dos resultados, mas os índices de irregularidade foram baixos (abaixo de 0,05) (Apêndice B, Figura B.16, Figura B.12 e Figura B.5). Já os índices mp1 e mp2 apresentaram alguma irregularidade, principalmente para as estações OURI e SPDR (Apêndice C).

Na Figura 39 são apresentados os gráficos gerados com dados de 30 minutos para a estação SCLA. Na Figura 40 são apresentados os gráficos gerados com dados de 04 horas para a estação SCLA.

Figura 39 – Resultados para 30 minutos estação SCLA.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)

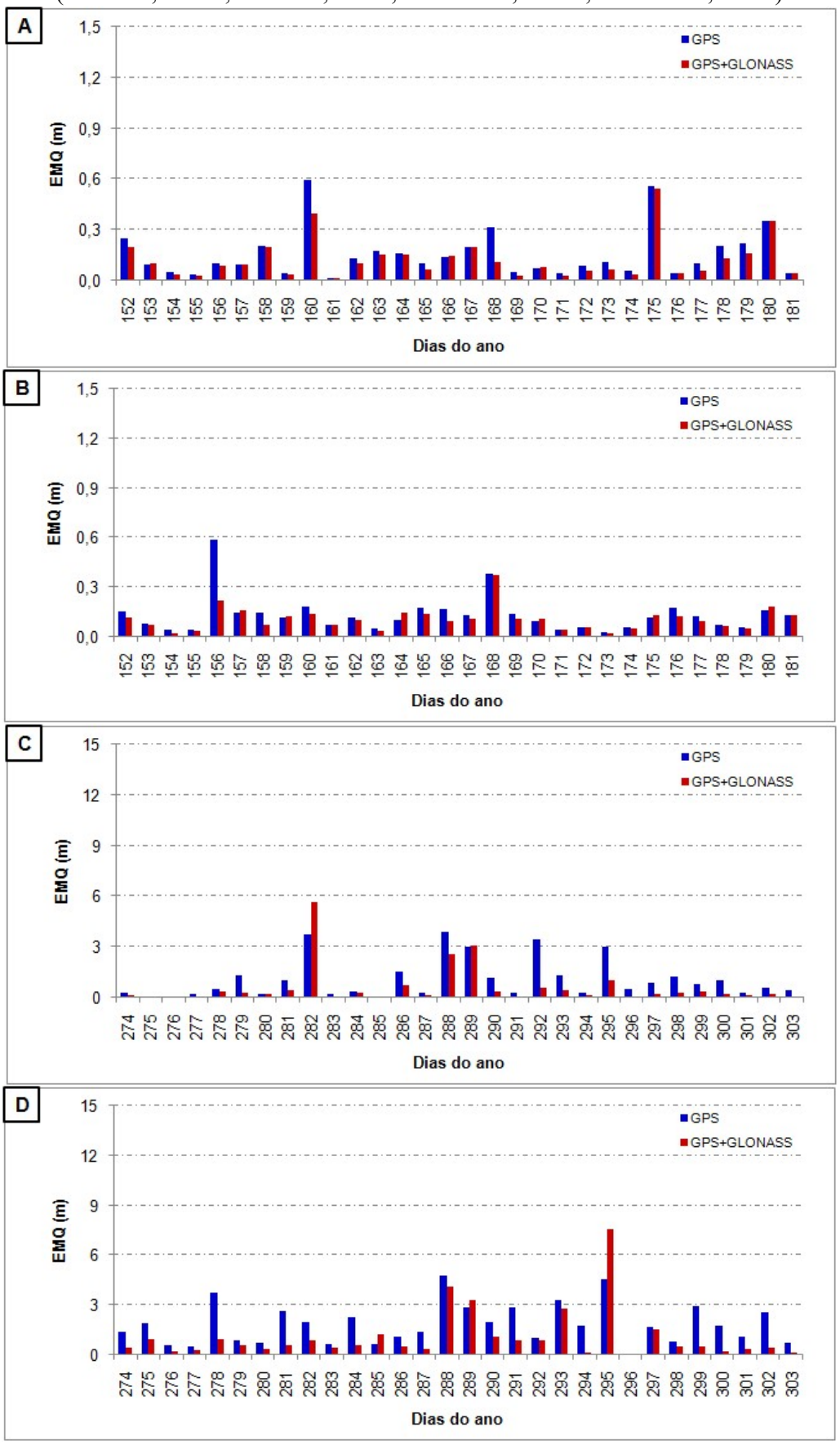
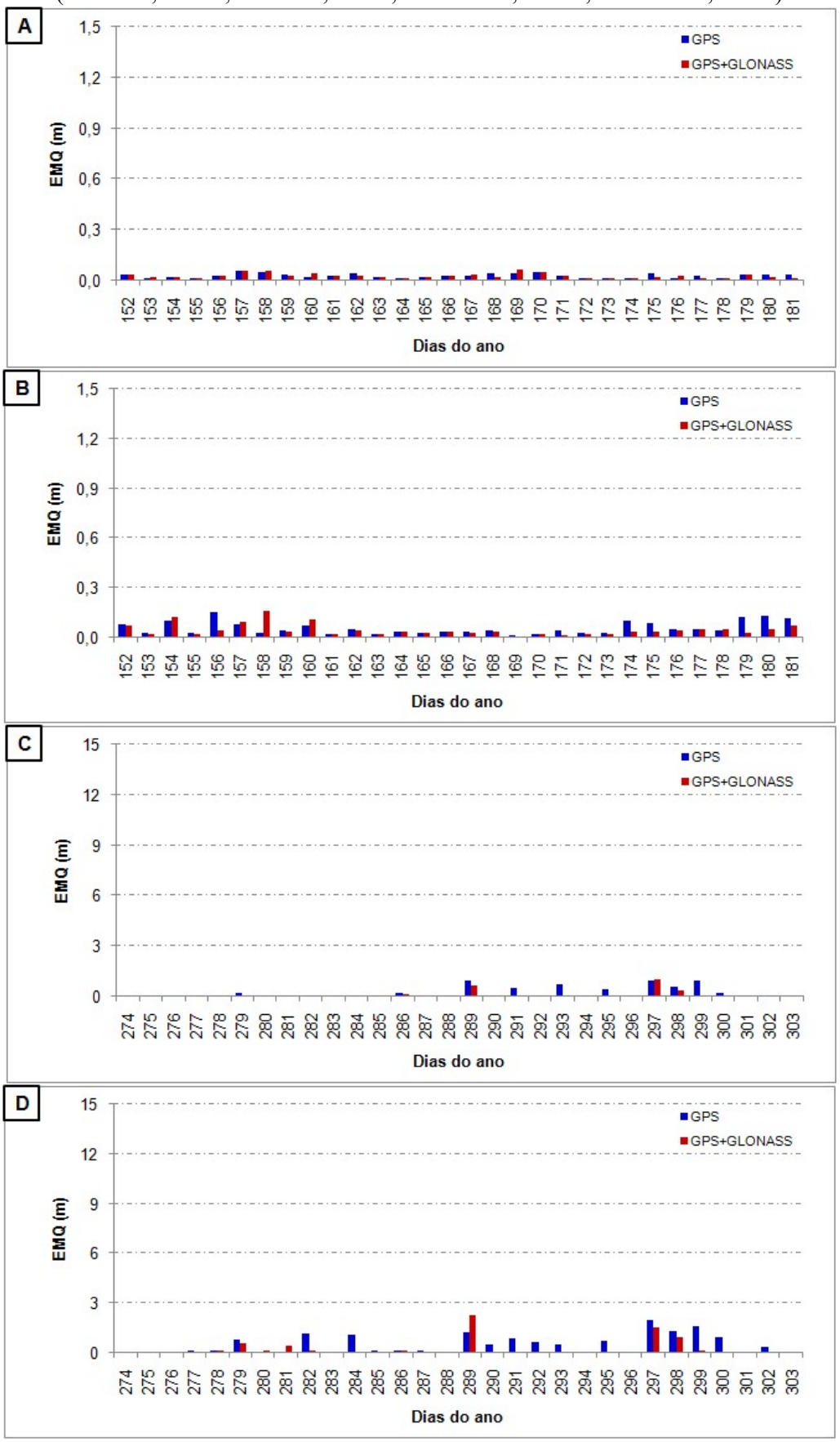


Figura 40 – Resultados para 04 horas estação SCLA.
(A: Junho, menor; B: Junho, maior; C: Outubro, menor; D: Outubro, maior)



Para a estação SCLA, localizada em região menos afetada pela ionosfera que as demais, foram obtidos os menores valores de EMQ. A maior parte dos valores obtidos com 30 minutos em outubro foram inferiores a 1 m, e em junho nenhum valor passou de 60 cm. No mês de junho não há diferença significativa entre os resultados para diferentes tamanhos de linhas de base, sendo que em alguns casos os valores obtidos com linhas maiores tiveram menor erro que os obtidos com linhas menores. Em outubro a diferença de comportamento não é muito significativa, mas ainda assim os valores obtidos com linhas menores possuem EMQ menor.

Com a configuração de 4 horas de dados, a diferença observada nas demais estações com o aumento do intervalo de tempo de dados também pode ser observada, chegando aos menores valores entre todas as configurações. Com destaque para o mês de junho em que a maior parte dos EMQs atingiu valores máximos centimétricos. Em outubro a maior parte dos dias não obteve erro maior que 1 m, e apenas o dia 289 passou o valor de 2 m de EMQ, neste dia as três estações envolvidas apresentaram índices de irregularidade entre moderada e alta (Apêndice B, Figura B.8, Figura B.12 e Figura B.14). Mesmo com valores menores, ainda é possível notar nos dois meses a diferença com a mudança do tamanho da linha de base, sendo observados valores inferiores nos resultados com linhas de base menores.

As configurações da estação SCLA foram as que obtiveram maiores índices de dias com melhorias ao utilizar dados combinados, ficando todos acima de 60%. A configuração de outubro, com 30 minutos e linhas de bases menores obteve o maior índice, com melhoria em 93% dos dias analisados, ao incluir dados GLONASS.

As informações analisadas foram reunidas na Tabela 13 onde são apresentados esses dados em porcentagens de dias com melhorias, médias e desvios padrão das melhorias para cada configuração testada. Os valores foram obtidos de maneira análoga aos apresentados no experimento com PPP, apresentados na Tabela 8. São destacados na Tabela 13 os casos que apresentaram valores negativos na média dos EMQs com o uso de dados combinados, indicando piora nos resultados, e a única configuração que apresentou melhoria em menos de 50% dos dias analisados, estação PBCG, dados de outubro com 4 horas de dados, utilizando linhas de base maiores. Considerando-se todos os dias, independente das configurações, obteve-se melhoria em 69,18% dos casos analisados.

Tabela 13 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria (Relativo).

Estação	Mês	Intervalo de dados	Linha de base	Melhoria com GPS+GLONASS		
				Dias	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
PBCG	Junho	30 minutos	Menor	60%	0,6	10,0
			Maior	64%	26,1	43,5
		04 horas	Menor	70%	0,4	1,2
			Maior	73%	1,1	2,0
	Outubro	30 minutos	Menor	60%	**-5,7**	364,4
			Maior	**48%**	**-65,9**	510,0
		04 horas	Menor	60%	**-44,7**	226,7
			Maior	64%	9,4	132,6
SPDR	Junho	30 minutos	Menor	64%	0,9	4,3
			Maior	83%	1,4	15,8
		04 horas	Menor	57%	**-0,4**	1,1
			Maior	73%	1,5	3,7
	Outubro	30 minutos	Menor	71%	74,8	242,6
			Maior	69%	114,7	546,0
		04 horas	Menor	64%	1,2	191,2
			Maior	67%	**-17,8**	296,0
SCLA	Junho	30 minutos	Menor	77%	3,0	5,1
			Maior	70%	2,4	6,9
		04 horas	Menor	60%	0,2	1,0
			Maior	73%	1,0	4,3
	Outubro	30 minutos	Menor	93%	48,9	79,6
			Maior	90%	77,2	111,6
		04 horas	Menor	68%	11,7	22,9
			Maior	79%	25,8	48,1

As porcentagens de melhoria são também apresentadas de acordo com o mês, tamanho da linha de base, intervalo de tempo de dados e estação na Tabela 14.

Tabela 14 – Porcentagens de dias com melhorias para Relativo.

Categoria	Dias com melhoria
Mês de junho	68,88%
Mês de outubro	69,48%
Linhas de base menores	66,95%
Linhas de base maiores	71,43%
Intervalo de 30 minutos de dados	70,93%
Intervalo de 04 horas de dados	67,44%
Estação PBCG	62,39%
Estação SPDR	68,83%
Estação SCLA	76,07%

Em relação aos meses selecionados as melhorias ocorreram em quantidade semelhante, sendo a diferença inferior a 1%. Levando-se em conta o tamanho das linhas de base, fica mais evidente a diferença entre as configurações adotadas. Para linhas de base maiores houve melhoria em mais dias com o uso de dados GPS/GLONASS. Em relação ao intervalo de tempo de dados novamente houve mais dias com melhoria no menor tempo de dados. Considerando as estações, de maneira análoga ao que ocorreu no PPP, a estação com mais dias com melhoria foi a localizada mais ao sul do país, SCLA, seguida da localizada próxima à região afetada pelo efeito fonte, SPDR e, por fim, PBCG, mais próxima ao equador geomagnético.

Conforme destacado anteriormente, alguns dias apresentaram valores muito discrepantes em relação à mesma configuração entre dados da constelação GPS e GPS/GLONASS, ou mesmo em relação aos demais dias, chegando, em alguns casos, a 10 m de diferença. Como esses valores muito altos influenciam diretamente as médias e desvios calculados, as porcentagens, médias e desvios padrão foram recalculados para esses casos excluindo-se os dias com resultados muito discrepantes. Esses resultados são apresentados na Tabela 15, onde os valores recalculados foram destacados em cinza. Com estas modificações todas as configurações apresentaram melhoria em mais de 50% dos dias, e os casos com piora da média do EMQ passaram de cinco configurações para três.

Mesmo com a exclusão de dias com valores muito discrepantes e consequente diminuição dos desvios padrão das respectivas médias, ainda é possível notar elevado valor dos desvios padrão, superando em todos os casos os valores de média de diferença de EMQ, tanto nos casos de melhoria quanto de piora. No entanto, vale lembrar que excluindo os casos muito discrepantes, houve melhoria em 69,79% dos dias analisados com o uso de dados combinados GPS e GLONASS.

Tabela 15 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e média de melhoria com exclusão de dados muito discrepantes (Relativo).

Estação	Mês	Intervalo de dados	Linha de base	Melhoria com GPS+GLONASS		
				Dias	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
PBCG	Junho	30 minutos	Menor	60%	0,6	10,0
			Maior	64%	26,1	43,5
		04 horas	Menor	70%	0,4	1,2
			Maior	73%	1,1	2,0
	Outubro	30 minutos	Menor	61%	27,0	184,2
			Maior	52%	**-25,6**	234,7
		04 horas	Menor	62%	**-6,0**	81,8
			Maior	64%	9,4	132,6
SPDR	Junho	30 minutos	Menor	64%	0,9	4,3
			Maior	83%	1,4	15,8
		04 horas	Menor	57%	**-0,4**	1,1
			Maior	73%	1,5	3,7
	Outubro	30 minutos	Menor	71%	74,8	242,6
			Maior	70%	99,2	293,8
		04 horas	Menor	67%	30,3	115,5
			Maior	69%	24,3	189,1
SCLA	Junho	30 minutos	Menor	77%	3,0	5,1
			Maior	70%	2,4	6,9
		04 horas	Menor	60%	0,2	1,0
			Maior	73%	1,0	4,3
	Outubro	30 minutos	Menor	93%	48,9	79,6
			Maior	90%	77,2	111,6
		04 horas	Menor	68%	11,7	22,9
			Maior	79%	25,8	48,1

A Tabela 16 apresenta as porcentagens de melhoria por mês, tamanho de linhas de base, intervalo de tempo de dados e estação.

Tabela 16 – Porcentagens de dias com melhorias para Relativo com exclusão de dados muito discrepantes.

Categoria	Dias com melhoria
Mês de junho	68,88%
Mês de outubro	70,75%
Linhas de base menores	67,44%
Linhas de base maiores	72,19%
Intervalo de 30 minutos de dados	71,60%
Intervalo de 04 horas de dados	68,02%
Estação PBCG	63,35%
Estação SPDR	69,60%
Estação SCLA	76,07%

Com a exclusão dos dias com grande discrepância ocorreram pequenas alterações nas porcentagens obtidas (destacados em cinza), porém, o comportamento se manteve o mesmo para todas as categorias.

De maneira análoga à realizada no PPP, foram calculados os erros por componente para o sistema geodésico local para os resultados do posicionamento relativo. Os gráficos gerados por componente para cada configuração são apresentados no Apêndice F. As médias das componentes por configuração são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Médias das componentes em sistema geodésico local (Relativo).

Configuração	GPS			GPS+GLONASS		
	E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)
PBCG_J_30_menor	-0,014	0,015	-0,048	-0,009	0,018	-0,041
PBCG_J_30_maior	-0,056	-0,061	0,017	-0,031	-0,031	-0,062
PBCG_J_04_menor	0,002	0,008	0,027	0,002	0,005	0,029
PBCG_J_04_maior	-0,025	-0,008	0,009	-0,025	-0,010	0,006
PBCG_O_30_menor	-0,541	0,939	0,587	-0,618	0,715	-0,067
PBCG_O_30_maior	-0,387	0,636	-0,631	-0,153	0,611	0,234
PBCG_O_04_menor	-0,460	0,494	0,166	-0,609	0,478	-0,130
PBCG_O_04_maior	0,258	0,303	-0,545	0,024	0,218	-0,531
SPDR_J_30_menor	-0,018	-0,008	0,004	-0,020	-0,010	0,001
SPDR_J_30_maior	-0,027	0,006	0,014	-0,020	0,017	0,041
SPDR_J_04_menor	-0,010	-0,005	-0,013	-0,011	-0,005	-0,021
SPDR_J_04_maior	-0,002	0,011	-0,017	-0,011	0,006	-0,015
SPDR_O_30_menor	0,023	-0,854	-0,479	-0,208	-0,321	0,457
SPDR_O_30_maior	-1,880	0,892	-1,423	-0,884	1,230	-1,114
SPDR_O_04_menor	-0,120	-0,233	0,157	-0,155	0,061	0,120
SPDR_O_04_maior	-0,739	0,269	-0,606	-0,502	0,681	-0,089
SCLA_J_30_menor	-0,024	-0,012	-0,096	-0,027	-0,015	-0,091
SCLA_J_30_maior	0,008	0,000	-0,012	0,012	0,007	-0,006
SCLA_J_04_menor	-0,003	0,001	0,010	-0,003	-0,002	0,013
SCLA_J_04_maior	-0,002	-0,005	0,009	-0,008	-0,008	0,007
SCLA_O_30_menor	0,110	-0,510	-0,175	0,029	-0,354	-0,094
SCLA_O_30_maior	0,365	0,025	-0,057	0,248	-0,117	0,242
SCLA_O_04_menor	-0,023	-0,047	-0,015	-0,014	-0,010	0,009
SCLA_O_04_maior	0,089	-0,016	0,054	0,051	-0,063	0,015

Novamente foram utilizados tons de cinza para identificar as componentes mais afetadas em cada configuração, onde o branco indica os menores valores e o cinza mais escuro os maiores. As configurações são dadas pelo nome da estação, mês de referência, intervalo de tempo de dados e tamanho de linha de base. É possível verificar predominância dos maiores erros na componente U. Na identificação da segunda componente mais afetada

não se identificou uma configuração com mais alteração, mas de maneira geral a maior ocorrência de erros mais significantes foi na componente E. Isso ocorreu tanto para os processamentos com dados GPS (15 configurações) quanto para GPS e GLONASS (14 configurações).

A Tabela 18 apresenta os desvios padrão das médias dos erros por componente em SGL. Destacados em cinza estão os casos que alcançaram valores superiores a 1m.

Tabela 18 – Desvios padrão das médias das componentes em SGL (Relativo).

Configuração	GPS			GPS+GLONASS		
	E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)
PBCG_J_30_menor	0,032	0,021	0,086	0,015	0,025	0,092
PBCG_J_30_maior	0,231	0,208	0,241	0,110	0,065	0,242
PBCG_J_04_menor	0,008	0,007	0,021	0,006	0,006	0,018
PBCG_J_04_maior	0,013	0,013	0,029	0,013	0,013	0,022
PBCG_O_30_menor	1,943	1,787	4,703	1,772	2,031	5,680
PBCG_O_30_maior	2,916	1,758	4,692	2,087	2,201	8,005
PBCG_O_04_menor	0,609	0,457	0,918	0,691	0,615	1,849
PBCG_O_04_maior	0,681	0,699	1,282	0,802	0,779	1,280
SPDR_J_30_menor	0,029	0,017	0,086	0,022	0,009	0,066
SPDR_J_30_maior	0,075	0,028	0,119	0,027	0,077	0,153
SPDR_J_04_menor	0,005	0,002	0,015	0,004	0,003	0,022
SPDR_J_04_maior	0,029	0,013	0,037	0,017	0,010	0,028
SPDR_O_30_menor	1,176	1,274	2,698	1,746	1,184	2,757
SPDR_O_30_maior	2,953	3,689	5,164	3,255	3,318	5,138
SPDR_O_04_menor	0,385	0,426	0,718	0,572	0,706	0,498
SPDR_O_04_maior	0,805	0,947	1,212	1,221	1,746	0,955
SCLA_J_30_menor	0,069	0,041	0,159	0,042	0,025	0,130
SCLA_J_30_maior	0,066	0,039	0,094	0,066	0,028	0,087
SCLA_J_04_menor	0,006	0,010	0,021	0,005	0,007	0,021
SCLA_J_04_maior	0,025	0,011	0,037	0,015	0,012	0,024
SCLA_O_30_menor	0,563	1,084	0,791	0,311	1,042	0,534
SCLA_O_30_maior	0,411	0,990	0,996	0,566	1,041	1,169
SCLA_O_04_menor	0,155	0,102	0,192	0,060	0,059	0,181
SCLA_O_04_maior	0,250	0,174	0,384	0,154	0,321	0,090

As ocorrências de valores superiores a 1 m foram mais irregulares que para os resultados do experimento com PPP. Todas as componentes das configurações das estações PBCG e SPDR com 30 minutos de dados do mês de outubro alcançaram desvio padrão de ordem métrica. Algumas componentes de outras configurações do mesmo mês para as três estações também atingiram valores maiores que 1 m.

5.3 POSICIONAMENTO EM REDES NO CONCEITO DE VRS

Para o posicionamento baseado em redes foi aplicado o conceito de estação virtual de referência. Isso foi possível a partir da versão adaptada da ferramenta VRS-UNESP, desenvolvida na FCT-UNESP por Alves (2008).

A ferramenta, implementada em linguagem C++, tem como finalidade gerar observáveis de estações virtuais de referência para dados GPS, com a possibilidade de aplicação de diversos modelos de correções. Durante o desenvolvimento desta pesquisa o programa foi adaptado para possibilitar a geração de arquivos com dados GLONASS e GPS/GLONASS.

A primeira modificação foi realizada na biblioteca de leitura do arquivo de entrada, que ao invés de apenas ler as observáveis passou a verificar o tipo de dado, permitindo a leitura também de observáveis GLONASS, quando requerido. Além da identificação e leitura dos dados das diferentes constelações, foram necessárias modificações em relação ao armazenamento dos dados. A principal diferença entre os dados utilizados é em relação às frequências dos satélites, uma vez que os satélites GPS possuem uma única frequência para cada portadora em todos os satélites, enquanto os satélites GLONASS possuem suas frequências relacionadas ao canal de cada veículo. Com isso, para os dados GPS foram definidas duas variáveis, uma com cada valor de frequência, já para o GLONAS foram criados dois vetores de frequências. Foram também criados vetores diferentes para armazenamento de dados GPS e GLONASS, para facilitar as operações e levando em conta que dependendo da etapa de processamento seriam utilizadas informações diferentes.

Nesta versão da VRS-UNESP são utilizadas efemérides precisas, que possuem o mesmo formato tanto para dados GPS quanto para dados GLONASS, assim a modificação realizada foi em relação à identificação e transferência da efeméride necessária, a interpolação utilizada é a mesma em ambos os casos.

Após esta etapa, são calculados os deslocamentos geométricos e efeitos atmosféricos presentes nas estações base e virtuais. Além do armazenamento separado, no caso do cálculo do efeito ionosférico, a frequência teve que ser levada em consideração novamente, sendo necessárias algumas alterações também na biblioteca que realiza os cálculos ionosféricos. Outra contribuição nesta etapa do processo foi a automatização da transferência dos arquivos IONEX, na opção que utiliza mapas globais ionosféricos, na versão anterior esse processo era realizado manualmente.

Além disso, algumas modificações foram feitas na biblioteca de escrita dos arquivos de saída. Foram feitas adaptações nos nomes e nos cabeçalhos dos arquivos RINEX (*Receiver INdependet EXchange format*) para identificação do tipo de constelação selecionada, seguindo a padronização do formato RINEX 2.10. Além disso, foram inseridas as letras que representam as constelações antes do PRN de cada satélite por época. Na versão original isso não era necessário uma vez que só se utilizavam dados de uma constelação e, além disso, quando se tem arquivos apenas com dados GPS é permitida a omissão da identificação dos satélites por PRN. Alguns exemplos de dados de entrada e saída da ferramenta antes e depois da adaptação são apresentados no Apêndice G.

5.3.1 Metodologia

Para o experimento com VRS foram selecionadas seis estações, sendo três utilizadas como estação base no conceito de VRS (Seção 2.2.3) e três que tiveram suas coordenadas utilizadas para serem geradas as observáveis de estações virtuais. Conforme apresentado na Figura 41 a distribuição das estações busca novamente abranger as três regiões com diferentes comportamentos da ionosfera.

Figura 41 – Distribuição das estações de interesse selecionadas para VRS.

Fonte: Google Earth (2017).

As estações selecionadas como estações base foram, respectivamente, RECF, em Recife, SPTU, em Tupã, e IMBT, em Imbituba. As estações com coordenadas fornecidas para geração das observáveis (posições da VRS) foram PBJP, em João Pessoa, SPDR, em Dracena, e SCFL, em Florianópolis. As localizações são apresentadas a seguir, na

Figura 42, na Figura 43 e na Figura 44. As estações representadas em amarelo são as estações base, as vermelhas são as estações que tiveram dados virtuais gerados.

Figura 42 – Região próxima ao equador geomagnético.

Fonte: Google Earth (2017).

Figura 43 – Região afetada pelo efeito fonte.

Fonte: Google Earth (2017).

Figura 44 – Região com menor atividade ionosférica.

Fonte: Google Earth (2017).

A Tabela 19 apresenta as estações selecionadas e as distâncias entre os locais das VRSs a serem geradas e as respectivas estações base.

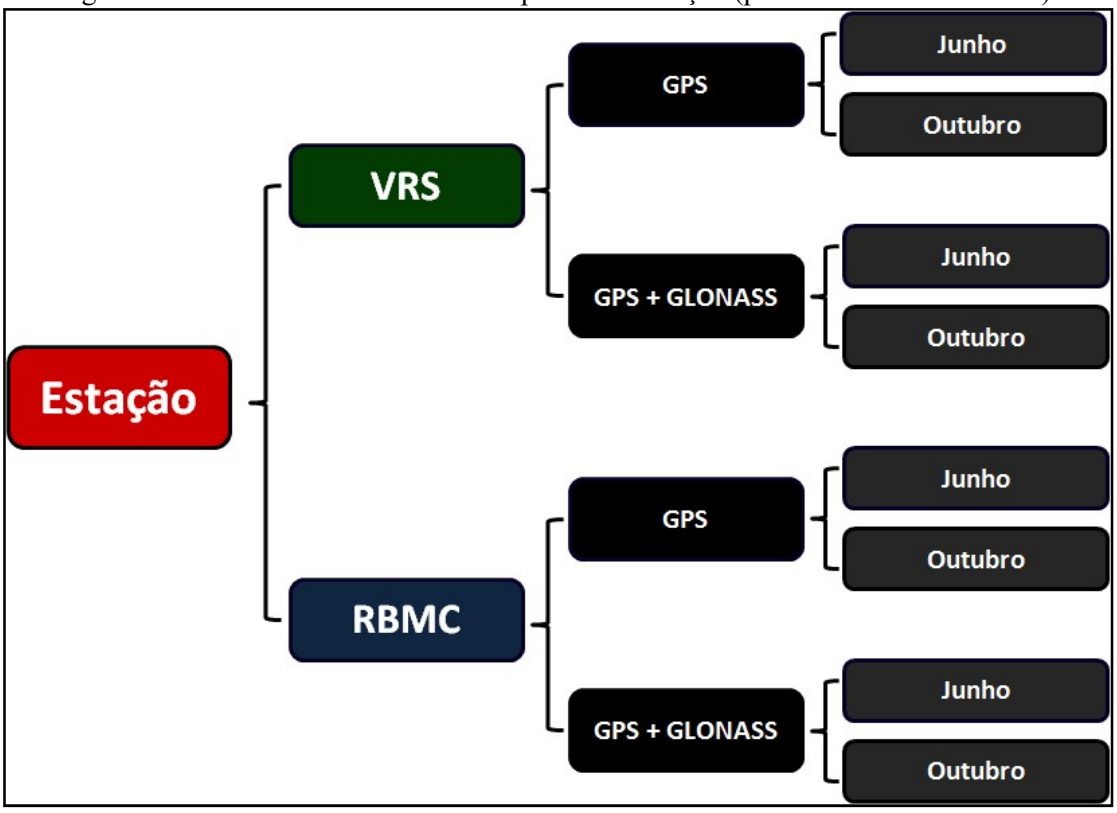
Tabela 19 – Distâncias entre estações base e VRS.

Estação Base	VRS	Distância (km)
RECF (Recife)	**PBJP** (João Pessoa)	100
SPTU (Tupã)	**SPDR** (Dracena)	115
IMBT (Imbituba)	**SCFL** (Florianópolis)	75

O período selecionado, assim como nos casos anteriores, compreende os meses de junho e outubro de 2014. Para as análises os arquivos gerados, com dados virtuais, e os coletados para as estações PBJP, SPDR e SCFL, foram processados no *software online* NRCan, em procedimento semelhante ao do PPP apresentado na Seção 5.1.

A Figura 45 esquematiza os processamentos realizados, onde para cada posição foram realizados os processamentos dos dados virtuais e reais, para arquivos com apenas dados GPS e GPS/GLONASS e para os meses de junho e outubro. O intervalo de tempo de dados utilizado para este experimento foi de 30 minutos.

Figura 45 – Processamentos realizados para cada estação (posicionamento em redes).



5.3.2 Resultados e análises

Os resultados obtidos com os dados virtuais e reais foram comparados com as coordenadas oficiais das estações, atualizadas para a época do levantamento e transformadas de SIRGAS2000 para ITRF2008. Assim como nos dois experimentos anteriores, a partir das resultantes das discrepâncias calculadas e dos desvios padrão obtidos nos processamentos foram calculados os erros EMQs 3D que foram utilizados nas análises.

Os resultados foram reunidos de acordo com a estação de interesse. O limite gráfico foi mantido em 3 m, pois permitia abranger quase todos os resultados sem prejudicar a visualização dos demais resultados. A maior parte dos resultados de junho foi em torno ou abaixo de 1 m. No mês de outubro apenas a estação SCFL manteve padrão semelhante de comportamento.

A seguir são apresentados os resultados para PBJP na Figura 46, SPDR na Figura 47 e SCFL na Figura 48. Vale ressaltar que no dia 293, não houve processamento para os dados virtuais na posição da estação SPDR devido à indisponibilidade de dados da estação utilizada como base (SPTU). O mesmo ocorreu para os dias 274, 275, 276 e 297 para a VRS na posição da estação SCFL, em que a estação utilizada como base (IMBT) apresentou falhas de coleta. Para o dia 159 da estação SCFL a VRS gerada apresentou pouco satélites GLONASS visíveis, por isso o processamento não utilizou observáveis GLONASS e os resultados para esse dia foram desconsiderados.

Nos resultados para as três estações é possível notar semelhança entre os resultados com dados reais e virtuais, não apenas em relação à ordem de grandeza dos EMQs, mas também no comportamento, principalmente para o mês de junho. Nesse mês, todos os resultados com dados GPS/GLONASS ficaram em torno ou abaixo de 0,5 m, já os resultados com apenas GPS tiveram comportamento mais variável.

Para o mês de outubro a estação em que se nota comportamento mais regular é a SCLA, embora alguns dias também apresentem discrepâncias maiores. Porém, mesmo nestes casos, o comportamento foi semelhando entre dados reais e virtuais. Para as estações PBJP e SPDR é mais visível a maior irregularidade dos resultados no mês de outubro, sendo que a estação PBJP apresentou resultados mais parecidos resultantes de observáveis reais e virtuais.

Figura 46 – Resultados para 30 minutos estação PBJP.
(A: Junho, VRS; B: Junho, RBMC; C: Outubro, VRS; D: Outubro, RBMC)

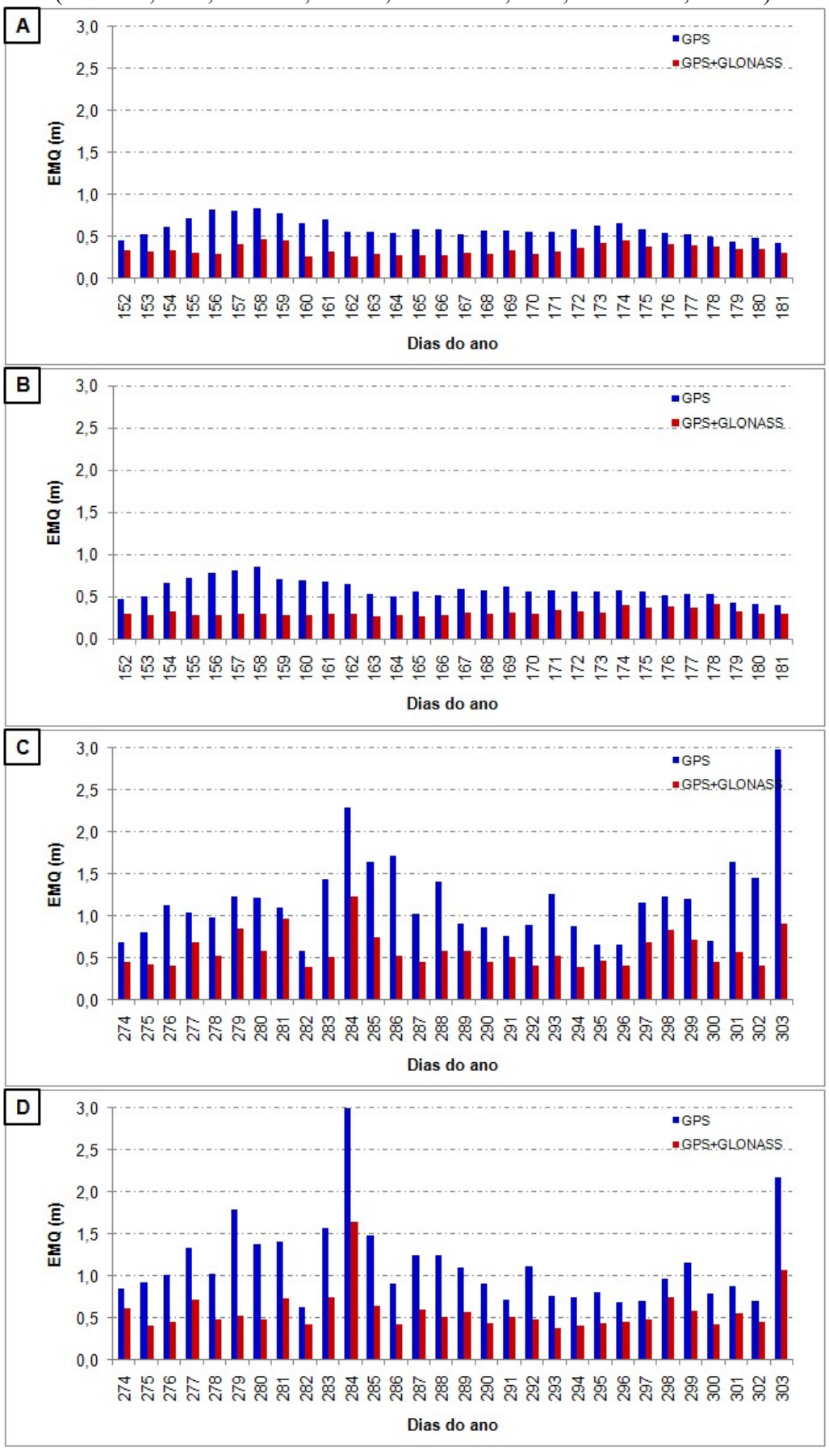


Figura 47 – Resultados para 30 minutos estação SPDR.
(A: Junho, VRS; B: Junho, RBMC; C: Outubro, VRS; D: Outubro, RBMC)

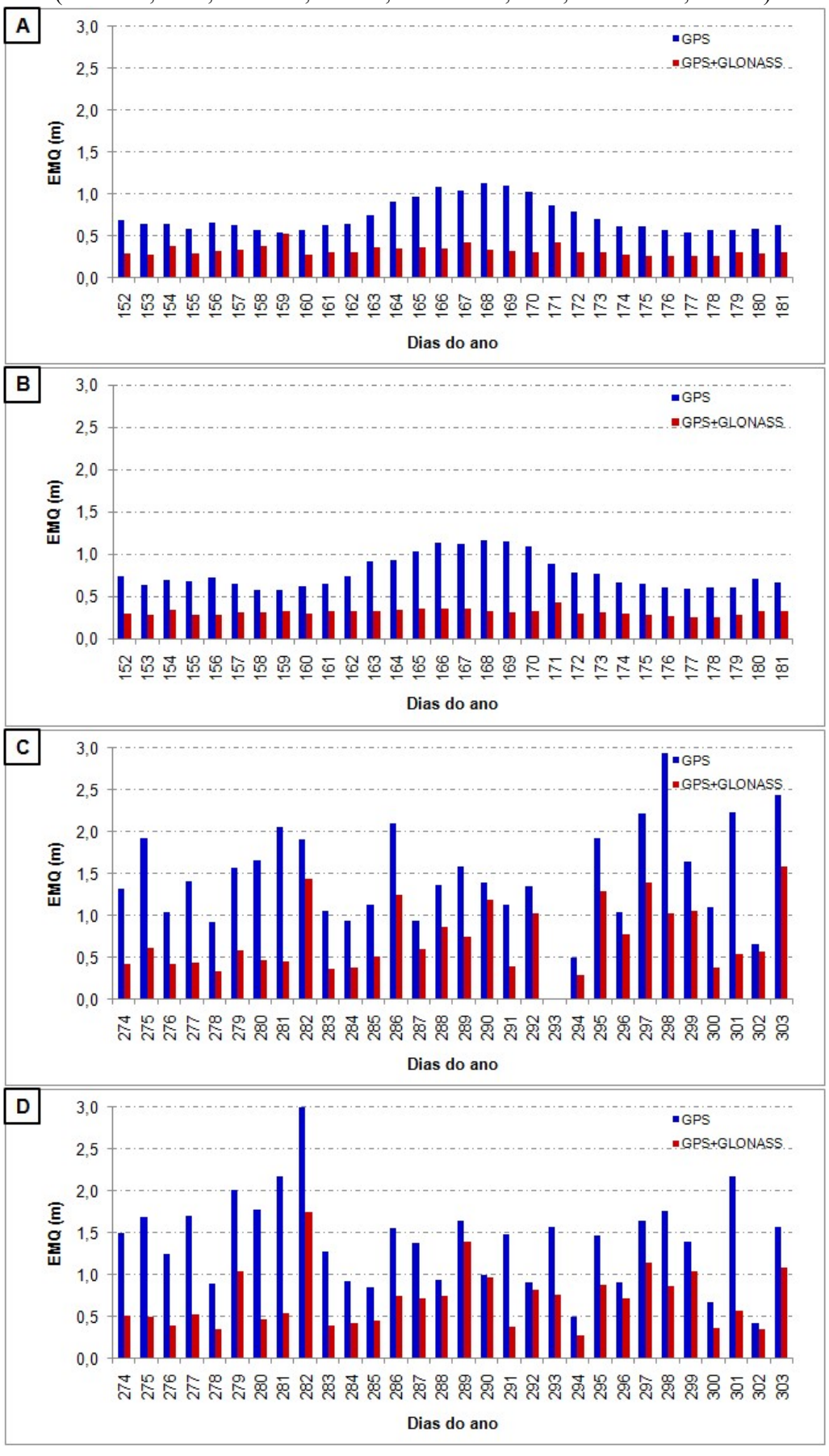
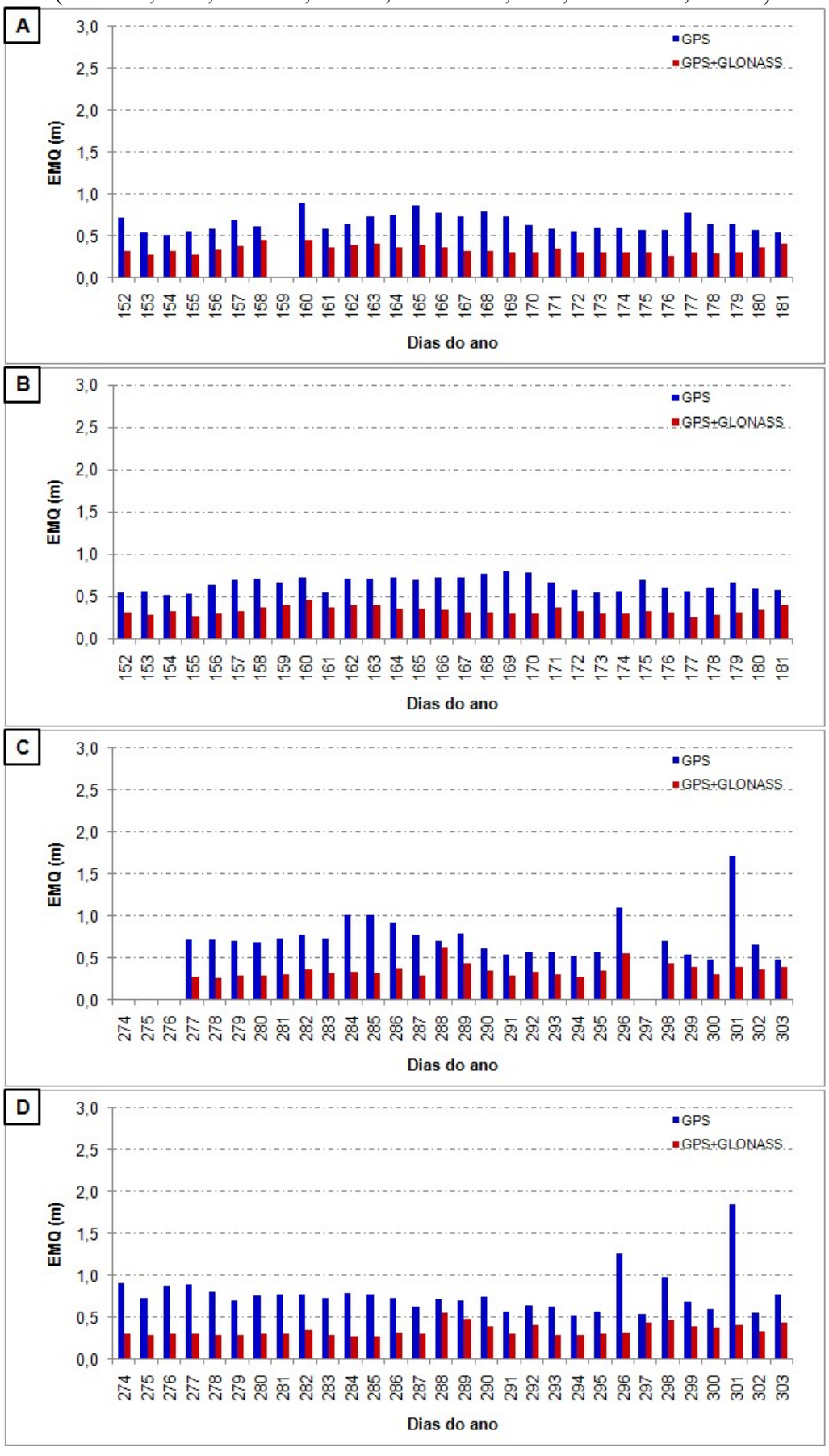


Figura 48 – Resultados para 30 minutos estação SCFL.
(A: Junho, VRS; B: Junho, RBMC; C: Outubro, VRS; D: Outubro, RBMC)



Para as três estações houve casos discrepantes, como os dias 302 e 303 da estação PBJP, dias 286 e 287 da estação SPDR e dias 300 e 301 da SCFL. Para as duas primeiras estações citadas os índices ROTI (Apêndice B, Figura B.7, Figura B.10, Figura B.16 e Figura B.17) indicaram maior irregularidade para os dias mais discrepantes. Para a estação SCFL (Figura B.13) os valores obtidos foram inferiores, porém, também indicaram ocorrência de irregularidades, principalmente para a estação IMBT (Figura B.4), utilizada como base na geração dos dados virtuais.

A seguir são apresentados os gráficos das diferenças entre resultados com observáveis virtuais e reais, onde valores positivos indicam maiores erros para VRS, e negativos para dados da RBMC. A Figura 49 corresponde aos resultados da estação PBJP, a Figura 50 apresenta os resultados da estação SPDR e na Figura 51 os da estação SCFL.

Figura 49 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação PBJP (A: Junho; B: Outubro).

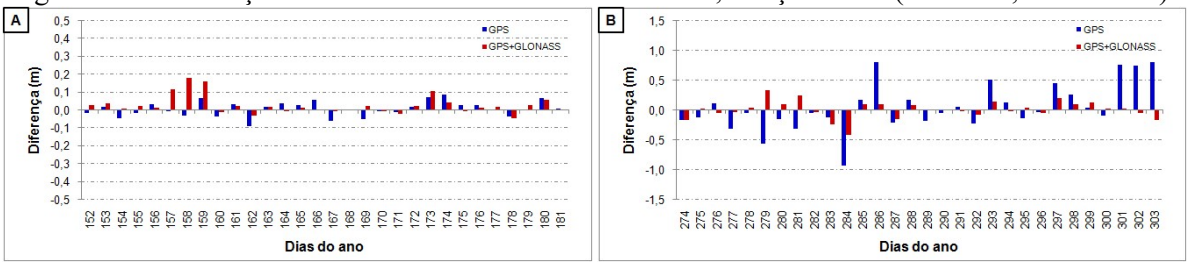


Figura 50 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação SPDR (A: Junho; B: Outubro).

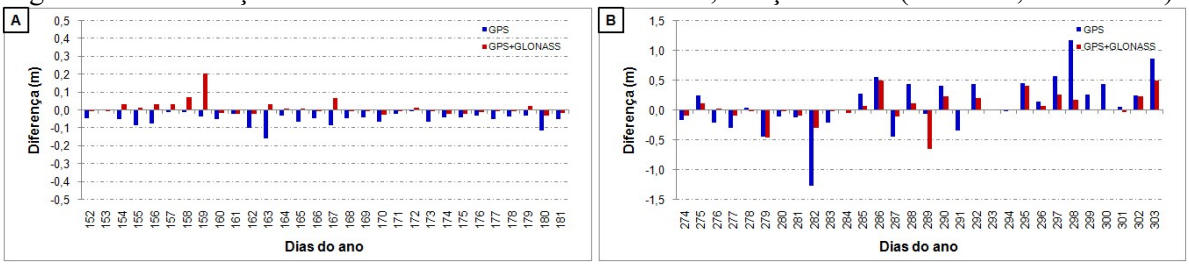
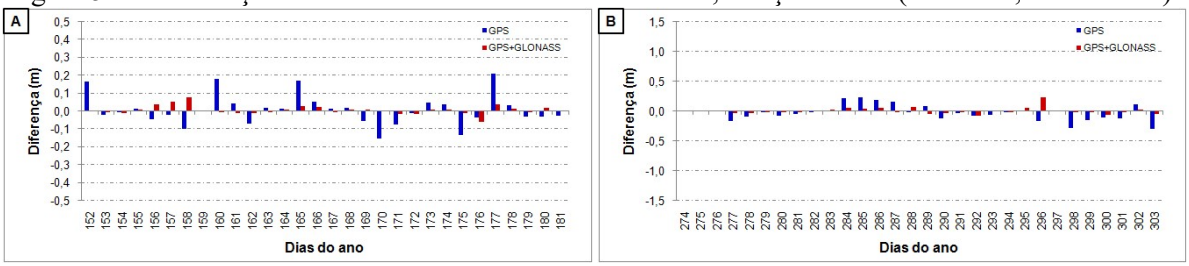


Figura 51 – Diferenças PPP utilizando dados reais e virtuais, estação SCFL (A: Junho; B: Outubro).



Os gráficos de junho (gráficos A) apresentam valor máximo de 0,5 m, enquanto os de outubro (gráficos B) de 1,5 m. Além da variação do comportamento dos resultados já observada anteriormente, é possível notar que, na maioria dos casos, o desempenho dos dados virtuais com GPS ou GPS/GLONASS segue o mesmo comportamento em relação aos resultados com dados reais. Assim como nos experimentos anteriores, as

porcentagens de dias com melhoria ao se utilizar dados GLONASS e as médias e desvios padrão das melhorias foram reunidas na Tabela 20.

Tabela 20 – Melhorias obtidas em porcentagem de dias e médias de melhoria (VRS).

Estação	Dados	Mês	Melhoria com GPS+GLONASS		
			Dias	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
PBJP	VRS	Junho	100%	25,6	10,4
		Outubro	100%	59,7	41,1
	RBMC	Junho	100%	27,6	12,8
		Outubro	100%	56,2	33,0
SPDR	VRS	Junho	100%	40,4	18,3
		Outubro	100%	76,1	44,4
	RBMC	Junho	100%	46,5	17,6
		Outubro	100%	70,0	46,2
SCFL	VRS	Junho	100%	30,4	11,0
		Outubro	100%	38,8	25,0
	RBMC	Junho	100%	31,3	8,2
		Outubro	100%	42,5	26,2

É importante ressaltar que em todos os casos considerados, tanto para dados virtuais quanto reais, houve melhoria nos resultados com a utilização de dados GLONASS. Em relação ao tipo de dados (virtuais e reais), para cada região houve mudança na média dos resultados, mas os mesmos mantiveram a mesma ordem de grandeza, tanto em média quanto em desvio padrão, para cada mês analisado. E, em nenhuma configuração o valor do desvio padrão foi superior ao da média de melhoria em EMQ.

Assim como nos casos anteriores, os resultados em SGL também foram considerados, os gráficos por componente são apresentados no Apêndice H. A seguir, na Tabela 21 são apresentadas as médias por configuração. As configurações são dadas pelo nome da estação, mês e tipo de dado.

Tabela 21 – Médias das componentes em sistema geodésico local (VRS).

Configuração	GPS			GPS+GLONASS		
	E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)
PBJP_J_VRS	-0,049	-0,003	-0,071	-0,014	-0,005	-0,098
PBJP_O_VRS	-0,152	0,010	-0,039	-0,072	-0,002	-0,028
PBJP_J_RBMC	-0,019	0,013	-0,033	-0,002	0,006	-0,043
PBJP_O_RBMC	-0,061	0,037	-0,025	-0,027	0,012	-0,001
SPDR_J_VRS	0,021	0,021	0,008	0,006	0,014	-0,021
SPDR_O_VRS	0,008	0,011	-0,040	-0,006	0,003	0,016
SPDR_J_RBMC	0,040	0,020	0,058	-0,008	0,008	-0,031
SPDR_O_RBMC	0,000	-0,009	0,082	-0,021	-0,011	0,054
SCFL_J_VRS	-0,007	-0,011	-0,064	-0,008	-0,013	-0,070
SCFL_O_VRS	-0,019	-0,007	-0,031	-0,014	0,001	-0,036
SCFL_J_RBMC	0,015	0,013	-0,008	-0,005	0,001	-0,044
SCFL_O_RBMC	-0,027	-0,009	0,009	-0,011	0,002	-0,028

Tanto para configurações com dados GPS quanto para GPS e GLONASS há predominância dos maiores valores para a componente U, sendo a componente N a menos afetada. Na Tabela 22 são apresentados os desvios padrão das médias das componentes, onde é possível notar que os maiores desvios também ocorreram nas componentes U e E, enquanto a N manteve os menores desvios em todos os casos, sendo 8,1 cm o maior valor alcançado para esta componente.

Tabela 22 – Desvios padrão das médias por componente em SGL (VRS).

Configuração	**GPS**			**GPS+GLONASS**		
	E (m)	**N (m)**	**U (m)**	**E (m)**	**N (m)**	**U (m)**
PBJP_J_VRS	0,067	0,023	0,142	0,057	0,020	0,098
PBJP_O_VRS	0,168	0,044	0,157	0,117	0,042	0,150
PBJP_J_RBMC	0,062	0,022	0,140	0,052	0,020	0,053
PBJP_O_RBMC	0,158	0,046	0,143	0,135	0,048	0,093
SPDR_J_VRS	0,069	0,023	0,068	0,042	0,018	0,041
SPDR_O_VRS	0,137	0,069	0,189	0,099	0,049	0,099
SPDR_J_RBMC	0,104	0,029	0,116	0,050	0,017	0,036
SPDR_O_RBMC	0,146	0,081	0,223	0,114	0,050	0,158
SCFL_J_VRS	0,116	0,061	0,202	0,078	0,028	0,094
SCFL_O_VRS	0,069	0,027	0,079	0,040	0,025	0,070
SCFL_J_RBMC	0,107	0,052	0,119	0,076	0,030	0,063
SCFL_O_RBMC	0,100	0,038	0,123	0,042	0,026	0,078

5.4 CONSIDERAÇÕES

De maneira geral fica clara a diferença entre os experimentos que envolveram PPP e o de posicionamento relativo, sendo que o relativo apresenta comportamento muito mais irregular e discrepante. Porém, deve-se levar em conta que no posicionamento relativo não apenas os erros relacionados a uma estação estão envolvidos, mas de todas as estações utilizadas, para este caso três estações por processamento. Além disso, os sinais percorrem caminhos diferentes até cada receptor, sofrendo diferentes influências. E, ainda, no PPP são utilizadas efemérides precisas enquanto no posicionamento relativo foram utilizadas efemérides transmitidas, devido a limitações do *software*. Sendo assim, diferenças de comportamento dos resultados obtidos para cada método eram esperadas para as configurações adotadas.

Em todos os experimentos foi possível notar ocorrência de casos discrepantes em relação aos demais dias de mesma configuração, principalmente no experimento com posicionamento relativo. A identificação da causa desses casos específicos é complexa devido às diversas fontes de erro que podem ser responsáveis. Esta análise se torna ainda mais complexa no caso do posicionamento relativo, uma vez que este envolve três estações por configuração. Para investigar os casos discrepantes foram analisadas as ocorrências de irregularidades nos índices de multicaminho e nos índices S4 e ROTI. Para esses casos o uso dos índices de multicaminho não foi conclusivo, uma vez que a maior parte das ocorrências de irregularidades foi para o período de outubro, mês que apresentou índices de muticaminho bastante irregulares.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

As atividades que utilizam posicionamento tiveram um grande avanço com o desenvolvimento dos sistemas de navegação global por satélite. Após o restabelecimento e modernização do GLONASS, novas análises da viabilidade da integração do sistema com o GPS se tornam relevantes levando em conta a quantidade de satélites visíveis que os dois sistemas em conjunto podem oferecer.

Além das metodologias empregadas no posicionamento, faz-se necessária a investigação das fontes de erros a que os sinais transmitidos estão sujeitos. Entre as principais fontes de erros, em especial para usuários de simples frequência, tem-se a ionosfera, que possui irregularidades como a cintilação ionosférica, que podem causar desde interferência até perdas de sinal.

Neste contexto, o presente trabalho buscou fazer uma revisão dos principais sistemas de navegação disponíveis atualmente, com ênfase na estrutura e evolução do GLONASS. Além disso, foi feita uma revisão dos conceitos relacionados aos principais métodos de posicionamento, à ionosfera e à cintilação ionosférica. No total foram realizados três experimentos, considerando-se índices de multicaminho, de irregularidade e de cintilação ionosférica.

As análises dos índices de multicaminho chamaram a atenção para as influências que o cálculo dos mesmos pode sofrer. Nos casos analisados foi visível a irregularidade dos índices calculados para outubro, período com maior atividade ionosférica e mais propício para a ocorrência de perdas de ciclo. Em relação à cintilação os índices considerados no trabalho foram o S4 e o σ_ϕ, além do ROTI, utilizado em algumas comparações específicas. Por meio dos índices de cintilação das estações da Rede CIGALA/CALIBRA pôde-se observar a variação da ocorrência de cintilação nos meses considerados, junho e outubro de 2014. Além disso, foi verificada semelhança no efeito da cintilação para sinais GPS e GLONASS, mas ainda assim, na maior parte dos casos o GLONASS mostrou maiores índices, indicando maior influência.

Nos experimentos realizados, para o posicionamento por ponto preciso foram realizados testes com dados de dois meses levando em consideração a região da estação, o período do ano, o intervalo de tempo de dados, as constelações utilizadas e as portadoras. Considerando-se todos os dias analisados, independente da configuração, houve melhoria em 92,28% dos casos analisados.

Além disso, foram observados maiores erros nos casos em que se utilizaram apenas dados da portadora L1 e em outubro, configurações que, em geral, se tem maior influência da ionosfera. Para os casos com 30 minutos com apenas L1, em particular, notou-se maior importância da utilização de dados combinados para o posicionamento, tanto em período de alta quanto de baixa cintilação.

Foram ainda analisados os erros por componente no sistema geodésico local. Em geral, a componente mais afetada foi a componente U, enquanto nas outras componentes o comportamento foi mais variado. Foi possível notar predominância de menores valores na componente E para as configurações com apenas L1. Já com o uso de L1 e L2 a maior parte dos menores valores ficou entre as componentes N e U, sendo que para uso de GPS e GLONASS os valores mais altos alternaram entre a componente N e E, já para apenas dados GPS a componente N foi menos afetada que a U na maior parte dos casos.

Para o posicionamento relativo a metodologia empregada na escolha dos dados buscou seguir a estrutura proposta para o primeiro experimento. Também foram utilizados dados de dois meses, considerando três regiões com comportamento ionosférico diferentes, período do ano, intervalo de tempo de dados e constelações GPS e GPS/GLONASS. A diferença nesse caso foi que ao invés da utilização de dados de uma ou duas portadoras, foram testados processamentos com dois tamanhos de linhas de base diferentes para cada estação de interesse.

O comportamento dos resultados para o posicionamento relativo se mostrou mais irregular que para o PPP. Foram feitas duas análises principais, uma considerando todos os dados processados, e outra desconsiderando dias com resultados muito discrepantes em relação ao processamento com uma ou duas constelações, ou em relação aos demais dias com mesma configuração.

Considerando todos os dias, independente da configuração, houve melhoria em 69,18% dos casos utilizando-se dados combinados GPS/GLONASS. Sendo que apenas uma configuração não apresentou melhoria em mais de 50% dos dias. Desconsiderando-se os dias muito discrepantes, a melhoria ocorreu em 69,79% dos casos analisados e em todas as configurações houve melhoria em mais de 50% dos dias. Os resultados de outubro apresentaram, em geral, resultados mais discrepantes, com valores de EMQ consideravelmente mais altos que os de junho. As porcentagens de melhoria novamente foram maiores nos períodos de menor intervalo de tempo de dados.

Analisando os erros por componente no sistema geodésico local para posicionamento relativo foi possível verificar predominância dos maiores erros na

componente U. Como segunda componente mais afetada não se identificou uma configuração com mais alteração, mas de maneira geral a maior ocorrência de erros mais significantes foi na componente E. Havendo o mesmo comportamento tanto para os processamentos com dados GPS (15 configurações) quanto para GPS e GLONASS (14 configurações).

Em ambos os experimentos foi possível notar maior porcentagem de dias com melhorias nas estações ao sul do país, seguidas pelas estações próximas à região afetada pelo efeito fonte e por fim as mais próximas ao equador geomagnético.

Utilizando o conceito de VRS, foi adaptada a ferramenta VRS-UNESP para possibilitar o cálculo de observáveis virtuais GLONASS. Para o experimento, foram gerados dados para estações virtuais nas três regiões adotadas nos experimentos anteriores, também para os períodos de junho e outubro. Para testar os dados gerados os mesmos foram processados em metodologia semelhante à utilizada no experimento sobre PPP. Para comparação também foram processados os dados reais das estações da RBMC com a mesma posição. Os resultados se mostraram semelhantes, tanto em ordem de grandeza quanto em comportamento. Assim como nos experimentos anteriores ficou clara a influência no posicionamento que o período do ano e as regiões exercem de acordo com aumento da atividade ionosférica.

Em todos os casos analisados houve melhoria na adição de dados GLONASS, tanto para dados reais quanto virtuais. Quanto aos resultados em SGL, tanto para configurações com dados GPS quanto para GPS e GLONASS houve predominância dos maiores valores na componente U, enquanto a componente N foi a menos afetada.

Com este trabalho foi possível verificar a viabilidade da utilização de dados GLONASS junto aos da constelação GPS, tanto para períodos de baixa quanto de alta cintilação ionosférica. Como contribuição ainda foi desenvolvida uma versão do sistema VRS-UNESP que suporta arquivos de entrada não editados e que gera dados virtuais GLONASS no modo pós-processado.

Como recomendação para trabalhos futuros podem ser realizados estudos complementares relacionados ao experimento com posicionamento relativo levando em consideração os DOPs (*Dilution of Precision*), além de novos testes utilizando algum *software* que possibilite mais possibilidades de configuração e a utilização de efemérides precisas.

Quanto ao posicionamento em redes aplicando o conceito de VRS, existe a possibilidade de serem realizados testes com os dados virtuais aplicando o posicionamento relativo. Além disso, podem ser desenvolvidas outras versões da VRS-UNESP para dados

GLONASS, levando em conta, por exemplo, a solução das ambiguidades ou com processamento em tempo real. Para este último caso, entre outras adaptações, se faz necessária a implementação de um método de integração numérica, como o Runge-Kutta, para a interpolação das posições dos satélites GLONASS a partir de suas efemérides transmitidas. Além da possibilidade de versões da ferramenta para os demais sistemas GNSS.

Em breve devem estar disponíveis dados da nova portadora L3 GLONASS, com sinal CDMA, em quantidade suficiente para aplicações no posicionamento. A utilização dos mesmos se mostra promissora, uma vez que a compatibilidade com os dados GPS deve ser maior.

Outra possibilidade que existe é a verificação e investigação do desempenho do GLONASS sozinho no posicionamento. Atualmente existem poucas possibilidades de *softwares* que permitem este tipo de posicionamento, ou em alguns casos as versões disponíveis não se encontram completas. Este é o caso do NRCan, onde é possível realizar o processamento de apenas dados GLONASS, porém, é esclarecido que a ferramenta não foi desenvolvida para esta finalidade, sendo que nesta opção de processamento não é calculado, por exemplo, o erro do relógio do receptor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-SHAERY, A.; ZHANG, S.; RIZOS, C. An enhanced calibration method of GLONASS inter-channel bias for GNSS RTK. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V. 17: 165-173, 2013.

ALVEZ, D. B. M.; SOUZA, E. M.; KANESHIRO, V. Y.; SOUZA, J. S. Análise de séries temporais de multicaminho em estações de monitoramento. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, (Versão Online), V.19, N.03, p. 353-373, 2013.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V. 15: 253-261, 2011.

ALVES, D. B. M. **Desenvolvimento e implantação do RTK em rede para posicionamento geodésico no estado de São Paulo.** 2011. 141f. Pós-Doutorado – Universidade Estadual Paulista – Departamento de Cartografia, Presidente Prudente.

ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado em redes GPS utilizando o conceito de estação virtual.** 2008. 165f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

BEIDOU. Disponível em <http://en.beidou.gov.cn/>. Acesso em Ago. 2016.

BIPM. **Relations of UTC and TAI with GPS time and GLONASS time.** Disponível em <http://www.bipm.org/en/bipm/tai/annual-report.html>. Acesso em Mai. 2016.

BRACK, A. Reliable GPS + BDS RTK positioning with partial ambiguity resolution. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, (Online), 2016.

BRUYNINX, C. Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V. 11: 97-106, 2007.

CAI, C.; GAO, Y. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V. 17: 223-236, 2013.

CALDEIRA, M. C. O. **Análise do impacto do efeito ionosférico e cintilação ionosférica no posicionamento baseado em redes e por ponto.** 2015. 122f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência.** 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. **Radio Science**. Virginia. V. 38 (1): 1-23, 2003.

Diário de Pernambuco. Disponível em <http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/tecnologia/2016/02/16/interna_tecnologia,627340/recife-vai-sediar-estacao-russa-de-monitoramento-de-navegacao.shtml>. Acesso em Mar. 2016.

FEAIRHELLER, S.; CLARK, R. Other Satellite Navigation Systems. In: KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (Eds). **Understanding GPS: Principles and Applications**, 2 ed. Artech House, Norwood, 2006, cap 11, p. 595-634.

FEDRIZZI, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS.** 1999. 123f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil.** 2002. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GALILEO. Disponível em <http://www.galileoic.org/node/326>. Acesso em Fev. 2017.

Gazeta Russa. Disponível em <http://gazetarussa.com.br/ciencia/2014/06/23/estacoes_do_glonass_ serao_instaladas_em_cuba_e_na_nicaragua_26181>. Acesso em Dez. 2014a.

Gazeta Russa. Disponível em <http://gazetarussa.com.br/ciencia/2014/06/19/russia_vai_instalar_ estacoes_do_glonass_em_cuba_26141>. Acesso em Dez. 2014b.

Gazeta Russa. Disponível em <http://gazetarussa.com.br/ciencia/2016/03/30/glonass-na-america-latina_580395>. Acesso em Mai. 2016.

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. **Journal of Geodesy.** Berlin: Springer-Verlag, V. 82: 389-399, 2008.

GLONASS. **Interface control document.** Edition 5.1. Moscow, 2008.

GLONASS. Disponível em < https://www.glonass-iac.ru/en/content/news/?ELEMENT_ID=721>. Acesso em Mai. 2016a.

GLONASS. Disponível em <https://www.glonass-iac.ru>. Acesso em Fev. 2017.

GLONASS/GNSS FORUM. Disponível em <http://www.aggf.ru/eng/pr.php?nn=120010>. Acesso em Mai. 2016.

GPS. Disponível em <http://www.gps.gov/systems/gps/space>. Acesso em Fev. 2017.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/final-glonass-m-satellite-passes-tests/>. Acesso em Mai. 2015a.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/directions-2016-glonass-priorities-improved-accuracy-and-reliability/>. Acesso em Mai. 2015b.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/first-glonass-station-outside-russia-opens-brazil/>. Acesso em Mai. 2016a.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/russia-launches-single-glonass-satellite/>. Acesso em Mai. 2016b.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/glonass-launches-no-53-to-replenish-constellation/>. Acesso em Mai. 2016c.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/iss-reshetnev-to-build-11-new-glonass-k-satellites/>. Acesso em Mai. 2016d.

GPS World. Disponível em <http://gpsworld.com/china-launches-21st-beidou-navigation-satellite/. Acesso em Mai. 2016e.

GPS World. Disponível em < http://gpsworld.com/roscosmos-could-launch-up-to-four-replacement-glonass-in-2017/**>.** Acesso em Fev. 2017.

HERNANDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ARAGÓN-ÀNGEL, À.; GARCÍA-RIGO, A.; SALAZAR, D.; ESCUDERO, M. The ionosphere: effects: GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. **Journal of Geodesy.** Berlin: Springer-Verlag, V. 85: 887-907, 2011.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

INSIDE GNSS. Disponível em <http://www.insidegnss.com/node/4837>. Acesso em Mai. 2016.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. S. **Análise do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica**. Revista Brasileira de Cartografia, v.67, n. 1, p.201-214, 2015.

KERMARREC, G.; SCHON, S. A priory fully populated covariance matrices in least-squares adjustment-case study: GPS relative positioning. **Journal of Geodesy.** Berlin: Springer-Verlag. (*Online*). 2016.

KHODABANDEH, A.; TEUNISSEN, P. J. G. PPP-RTK and inter-system biases: the ISB look-up table as a means to support multi-system PPP-RTK. **Journal of Geodesy.** Berlin: Springer-Verlag. V. 90: 837-851, 2016.

KLOBUCHAR, J. A. Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users, In: PLANS-86 conference, Las Vegas, **Proceedings…**, 1986. p. 280-286.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying.** 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2004. 435p.

LIU, Y.; SONG, W.; LOU, Y.; ZHANG, R. GLONASS phase bias estimation and its PPP ambiguity resolution using homogeneous receivers. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, (Online), 2016.

McNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. 2012**. 244 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região brasileira. 2007**. 263 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação Ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS.** 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

OFFICE OF GEOMATICS. **National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) Standardization Document**. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. 2014.

PAN, L.; CAI, C.; SANTERRE, R.; ZHU, J. Combined GPS/GLONASS precise point positioning with GPS ambiguities. **Sensors**. V. 14 (9): 17530-17547, (Online), 2014.

PEREIRA, V. A. S. **Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado.** 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera: I_{ROT} e ROTI. In: **Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Universidade Federal do Paraná, Recife, 12-14. 2014.

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, V. 24, (18): 2283-2286, 1997.

PINTO, M. S. **Influência da combinação e modernização dos sistemas que integram o GNSS no georreferenciamento de imóveis rurais.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

POLEZEL, W. G. C. **Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no posicionamento.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Russian Federation. **Parametry Zemli 1990 (PZ-90.11): Reference Document.** Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, 2014.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications.** Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SKONE, S. H. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance. **Journal of Geodesy.** Berlin: Springer-Verlag, V. 75: 457-468, 2001.

SKONE, S. **Wide area ionosphere grid modeling in the auriral region.** 1998. 198f. Dissertation (PhD in Science) – The University of Calgary, Calgary.

SKONE, S.; LACHAPELLE, G.; YAO, D.; YU, W.; WATSON, R. Investigation the impact of ionospheric scintillation using a GPS software receiver. In: ION GNSS 2005 CONFERENCE, 2005, Long Beach. **Electronic Proceedings…** Long Beach, 2005. p. 1-12.

SLEEWAEGEN, J.; SIMSKY, A.; WILDE, W.; BOON, F.; WILLEMS, T. Digital versus Analog: Demystifying GLONASS inter-frequency carrier phases biases. **Inside GNSS**. 2012.

Sputinik News. Disponível em: <http://br.sputniknews.com/mundo/20151027/2554254/Glonass-estacao-36-paises-navegacao.html>. Acesso em Nov. 2015.

STATELLA, T.; AGUIAR, C. R.; MONICO, J. F. G.; NOGUEIRA, J. R. Cálculo dos vetores de posição e velocidade dos satélites GLONASS a partir das efemérides transmitidas e aspectos relacionados à sua integração com o GPS. **Pesquisas em Geociências**. V. 40 (2), p 177-183, 2013.

TAKAC, F. GLONASS inter-frequency biases and ambiguity resolution. **Inside GNSS**. 2009.

TATARNIKOV, D. V.; STEPANENKO, A. P.; ASTAKHOV, A. V. Moderately compact helix antennas with cutoff patterns for millimeter RTK positioning. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V. 20:587-594, 2016.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for geodesy**. Berlim: Springer, 1998. 650p.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGEWAYS, H. J. 3WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region. **IEEE**, 2011**.** Disponível em: <http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>.

URLICHICH, Y.; SUBBOTIN, V.; STUPAK, G.; DVORKIN, V.; POVALYAEV, A.; KARUTIN, S. GLONASS: Developing Strategies for Future. **GPS World**, V.22, N. 4, p. 42-49, April. 2011a.

URLICHICH, Y.; SUBBOTIN, V.; STUPAK, G.; DVORKIN, V.; POVALYAEV, A.; KARUTIN, S.; BAKITKO, R. GLONASS Modernization. **GPS World**. V. 22, N. 11, p. 34-39, 2011b.

VAN DIERENDONCK, A. J.; KLOBUCHAR, J. A.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: **Proceedings of the Institute of Navigation**. Alexandria, p. 1324–1333, 1993.

VENTORIM, B. G.; DAL POZ, W. R. Avaliação do desempenho dos sistemas GPS e GLONASS no posicionamento por ponto preciso, combinados e individualmente. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, (Versão Online), V.22, N.02, p. 264-281, 2016.

Voz da Rússia. Disponível em <http://portuguese.ruvr.ru/news/2014_12_01/Segundo-sat-lite-Glonass-K-entra-em-contato-a-partir-da-rbita-4740/>. Acesso em Dez. 2014.

WEBER, R.; FRAGNER, E. Combined GLONASS orbits. In: SLATER, J. A.; NOLL, C. E.; GOWEY, K. T. (Eds). **International GLONASS experiment (IGEX-98)**, Workshop Proceedings, IGS Central Bureau, p. 233-246, 1999.

WU, F.; KUBO, N.; YASUDA, A. Estimation of Atmospheric Delays Using Multiple Reference Stations for RTK-GPS Positioning. In: ION GPS 2003, Oregon Convertion Center, Portland. **Proceedings...,** 2003.

YANG, Z.; LIU, Z. Correlation between ROTI and Ionospheric Scintillation Indices using Hong Kong low-latitude GPS data. **GPS Solutions.** Berlin: Springer-Verlag, V.20: 815-824, 2016.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, D. B. M. **Método dos mínimos quadrados com penalidades: aplicação no posicionamento relativo GPS.** 2004. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

BARBOSA, E. M. **Integridade, disponibilidade e acurácia no posicionamento RTK e RTK em rede: Investigação no contexto da rede GNSS ativa do Estado de São Paulo.** 2010. 141f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

BIPM. **Annual Report on Time Activities**. France. Vol. 9, 2014.

IGS. **IGEX-98 - Session 1: Introduction, overview and GLONASS operations**. Workshop Proceedings.1999. Disponível em <https://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs/igex98.html>.

IGS. **IGEX-98 - Session 5: Orbit determination**. Workshop Proceedings. 1999. Disponível em <https://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs/igex98.html>.

NIS-GLONASS. Disponível em < http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/development_history/>. Acesso em Nov. 2015.

SAVITCH, W. J. **C++ Absoluto**. São Paulo: Addison Wesley, 2004. 612p.

SCHILDT, H. **Borland C++ Builder, a referência complete**. Rio de Janeiro: Campus, 2001. 780p.

SILVA, E. G. S. **Avaliação da qualidade do posicionamento GNSS com integração GPS/GLONASS**. **2015**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A., **Análise de séries temporais de coordenadas GNSS sob efeitos da cintilação ionosférica**, 2012, Anais do III Simpósio Brasileiro de Geomática, v.1. p. 228-233.

VANI, B. C. **Análise da cintilação ionosférica no Brasil empregando GNSS e técnicas de mineração e visualização de dados.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

APÊNDICE A – ÍNDICES PHI60

Figura A.1– Índices phi60 para estação FORT com 30 minutos em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

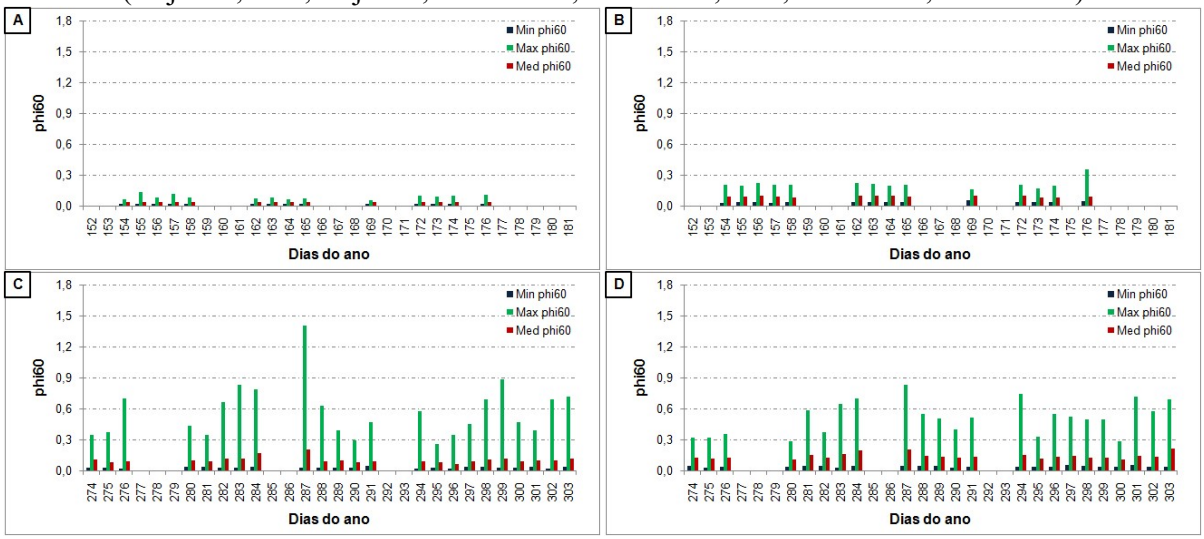


Figura A.2 – Índices phi60 para estação PRU2 com 30 minutos em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

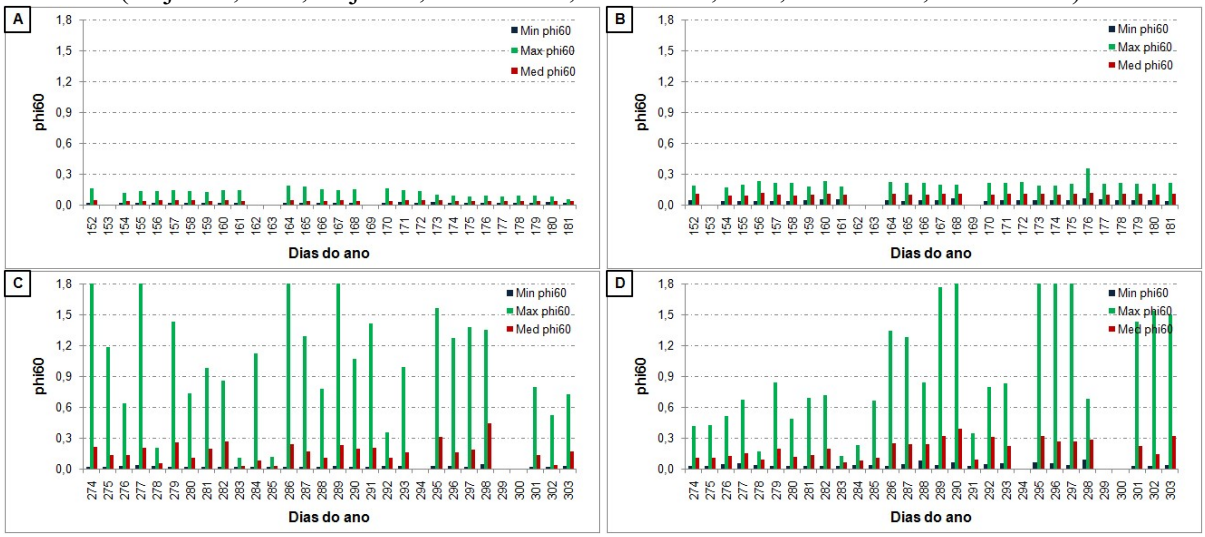


Figura A.3 – Índices phi60 para estação POAL com 30 minutos em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

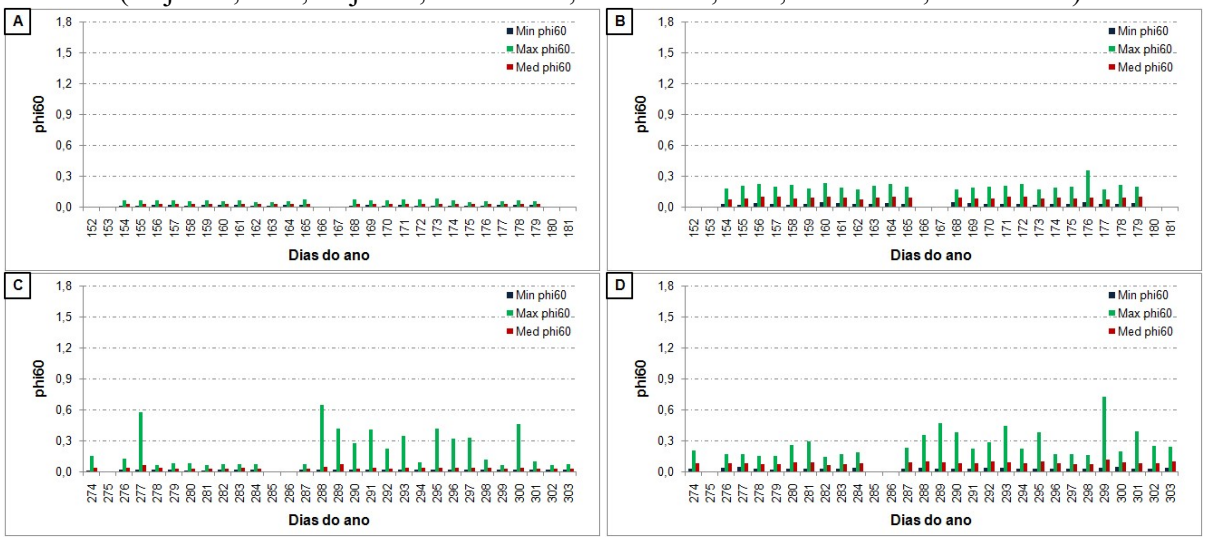


Figura A.4 – Índices phi60 para estação FORT com 04 horas em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

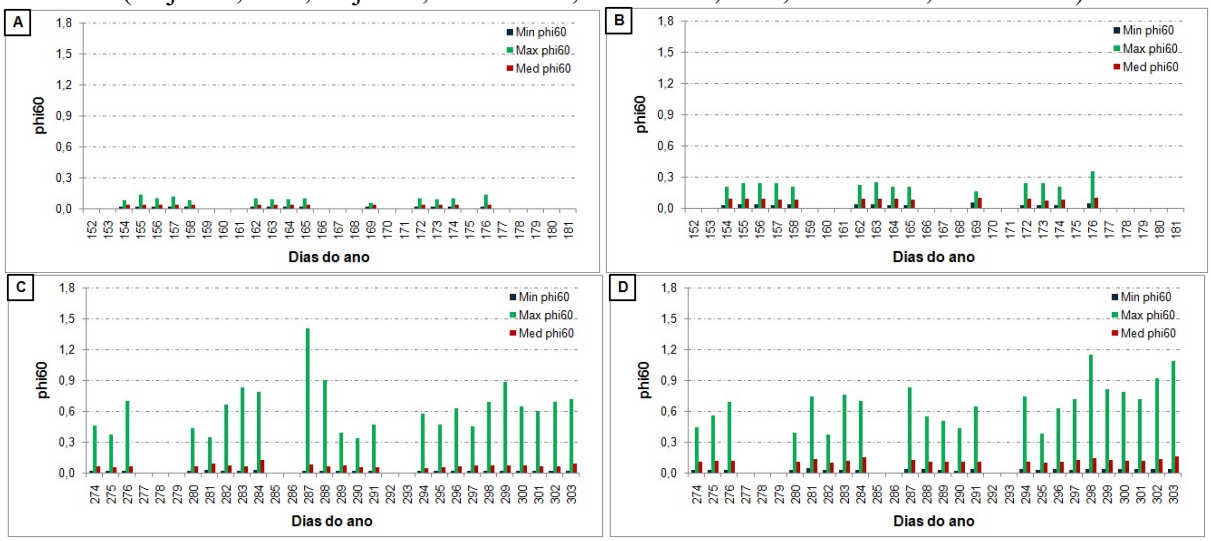


Figura A.5 – Índices phi60 para estação PRU2 com 04 horas em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)

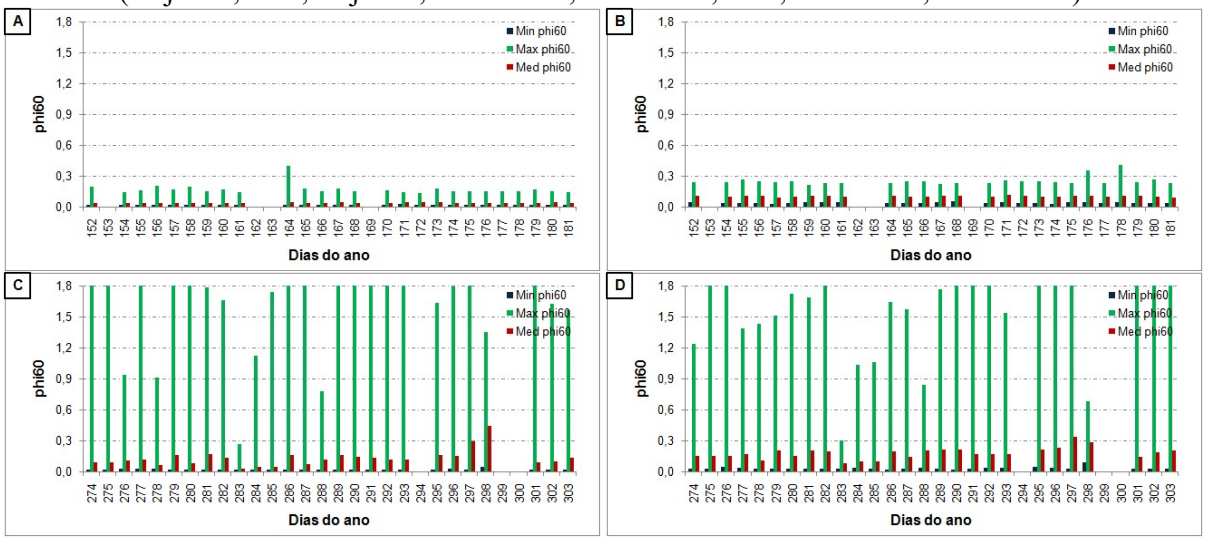
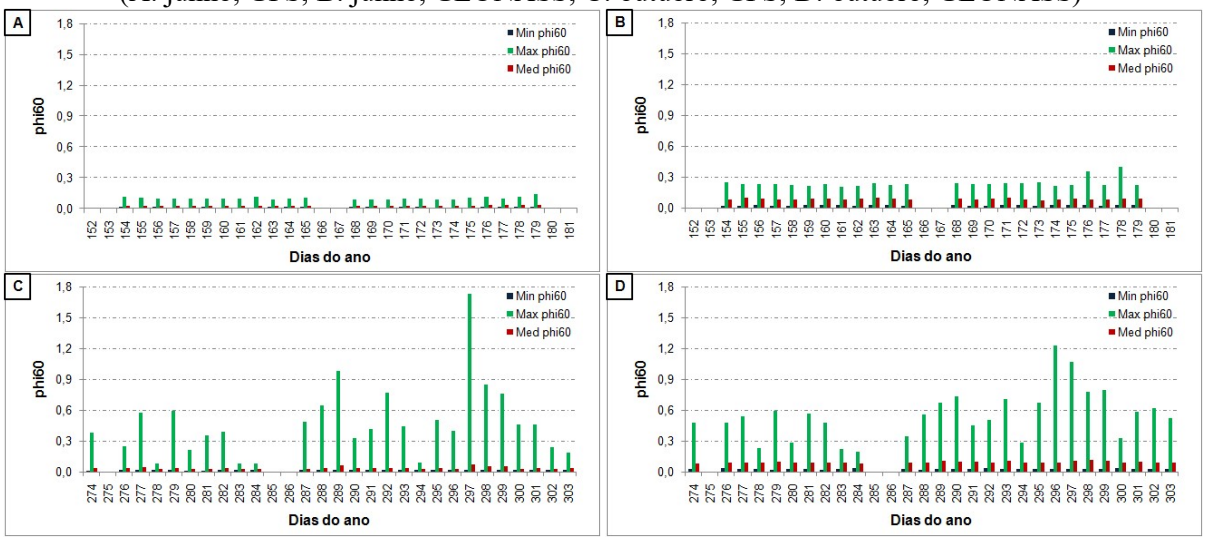


Figura A.6– Índices phi60 para estação POAL com 04 horas em radianos.
(A: junho, GPS; B: junho, GLONASS; C: outubro, GPS; D: outubro, GLONASS)



APÊNDICE B – ÍNDICES ROTI

Figura B.1 – Índices ROTI, estação ALAR.

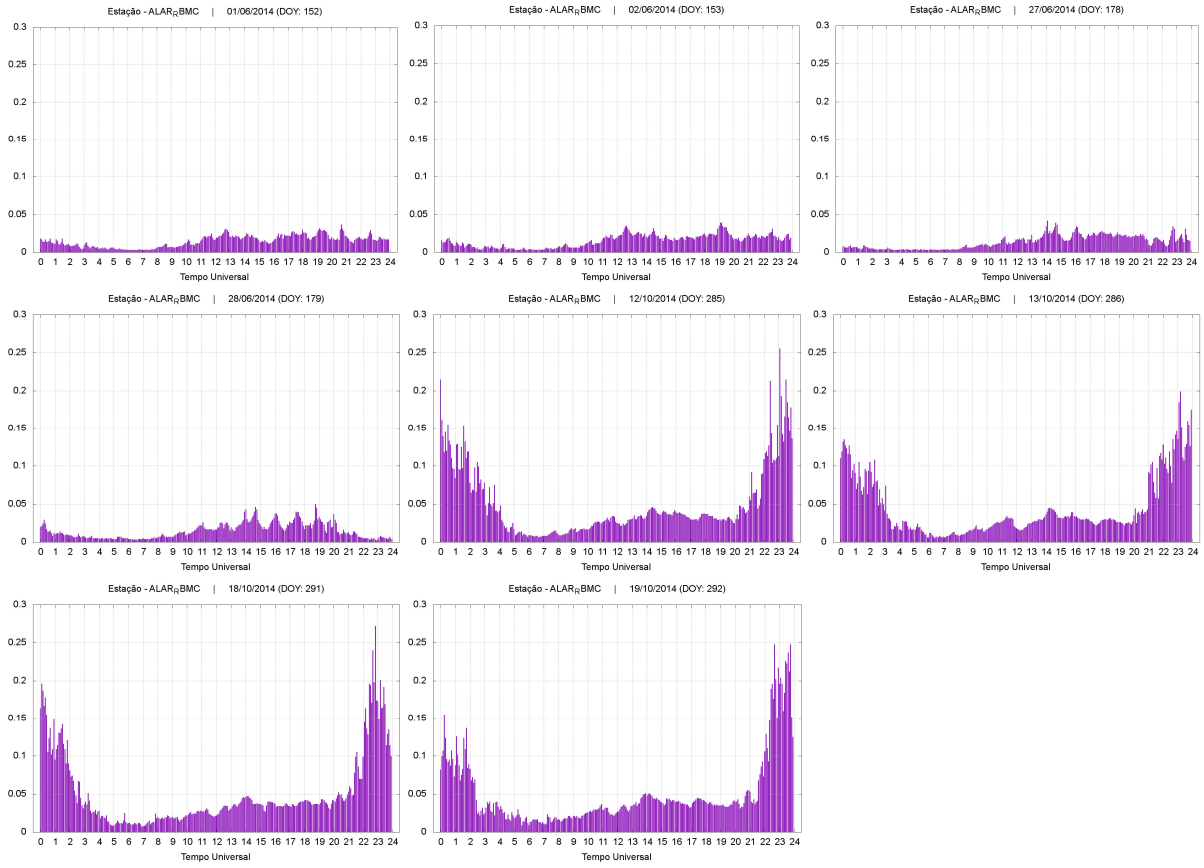


Figura B.2 – Índices ROTI, estação CEFT.

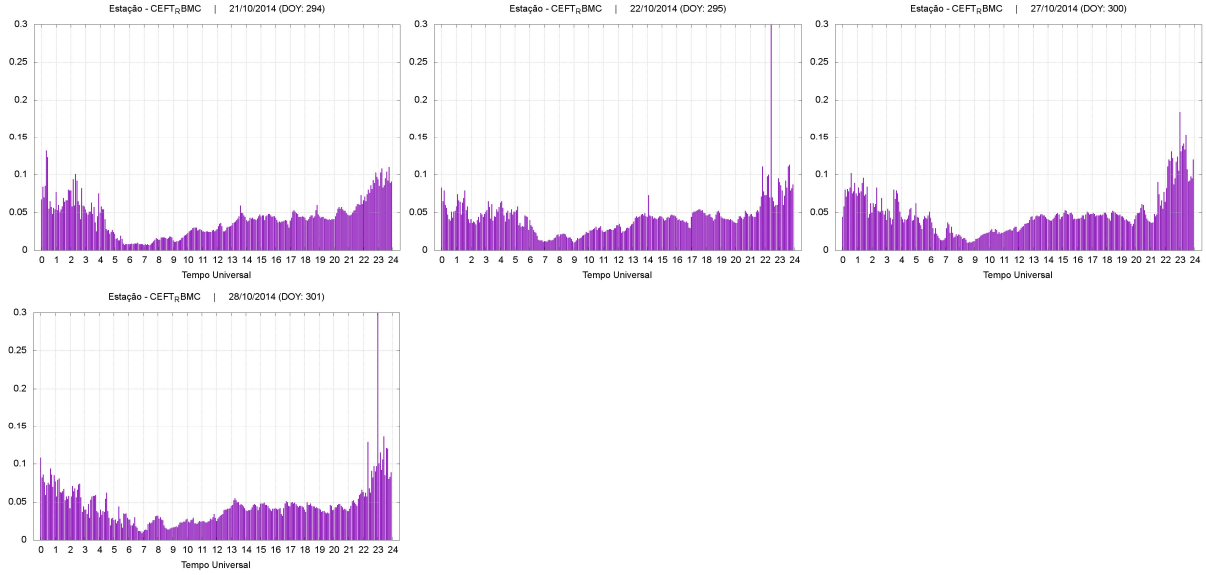


Figura B.3 – Índices ROTI, estação ILHA.

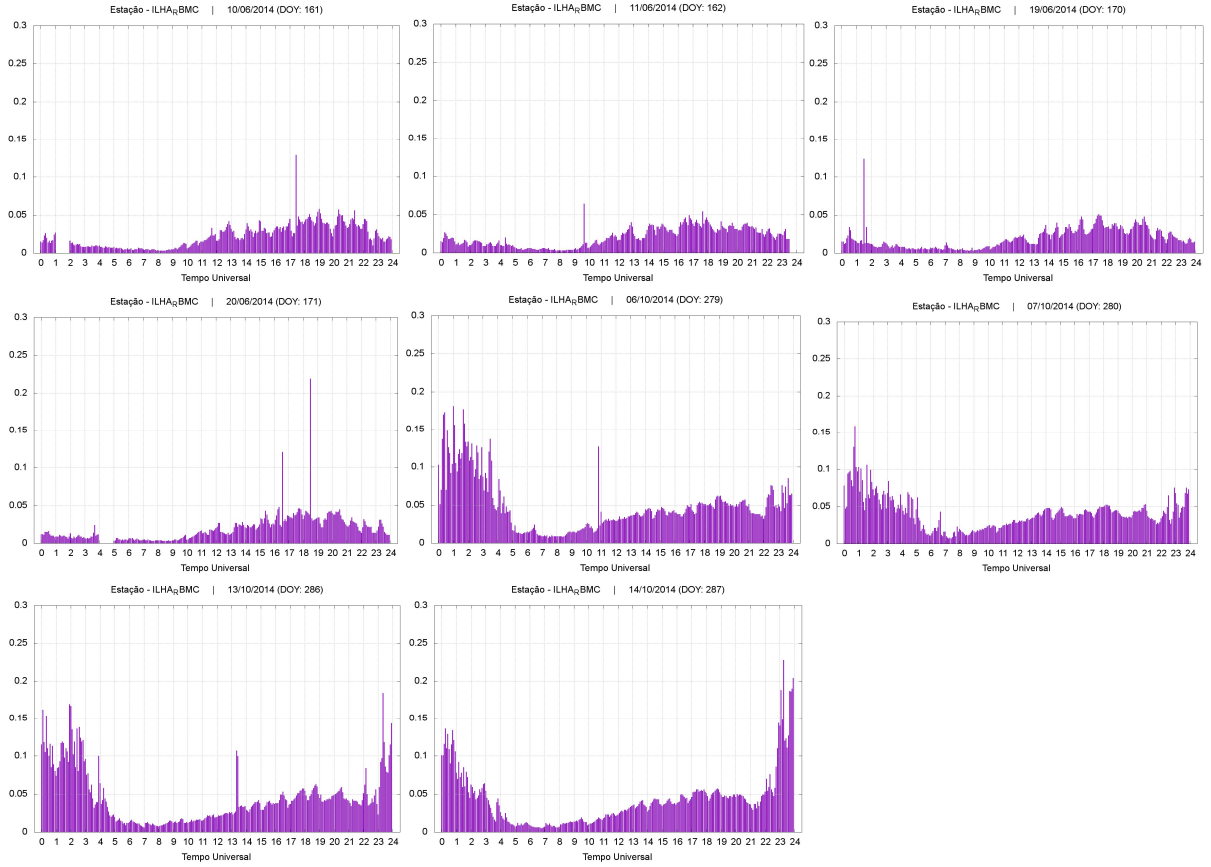


Figura B.4 – Índices ROTI, estação IMBT.

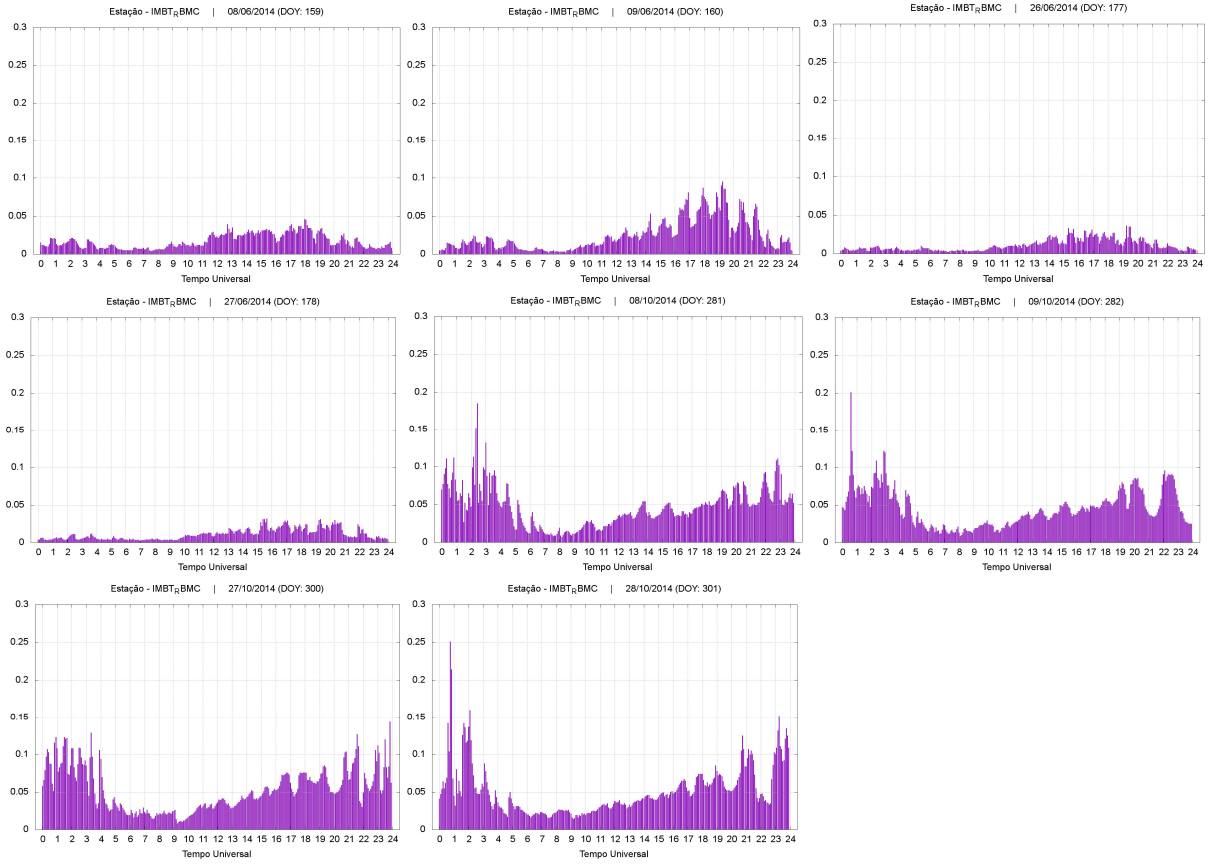


Figura B.5 – Índices ROTI, estação OURI.

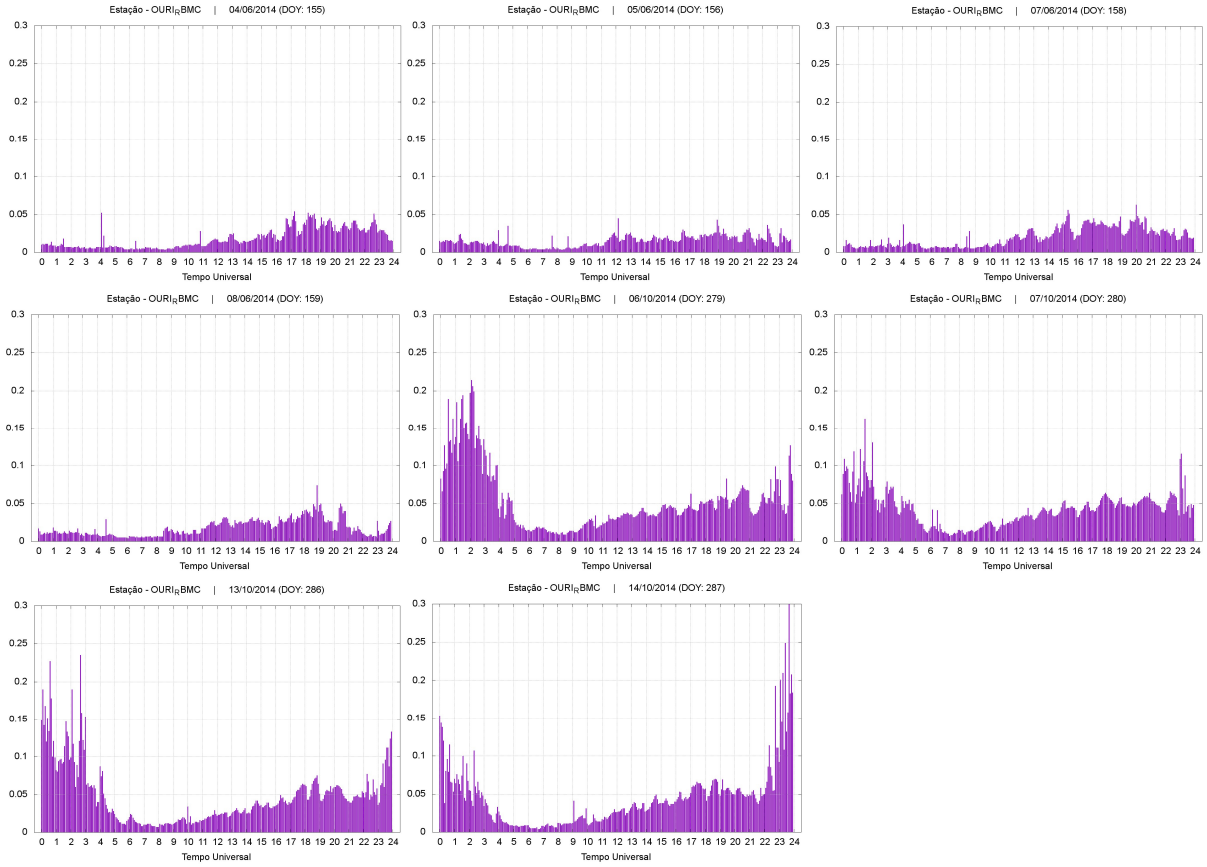
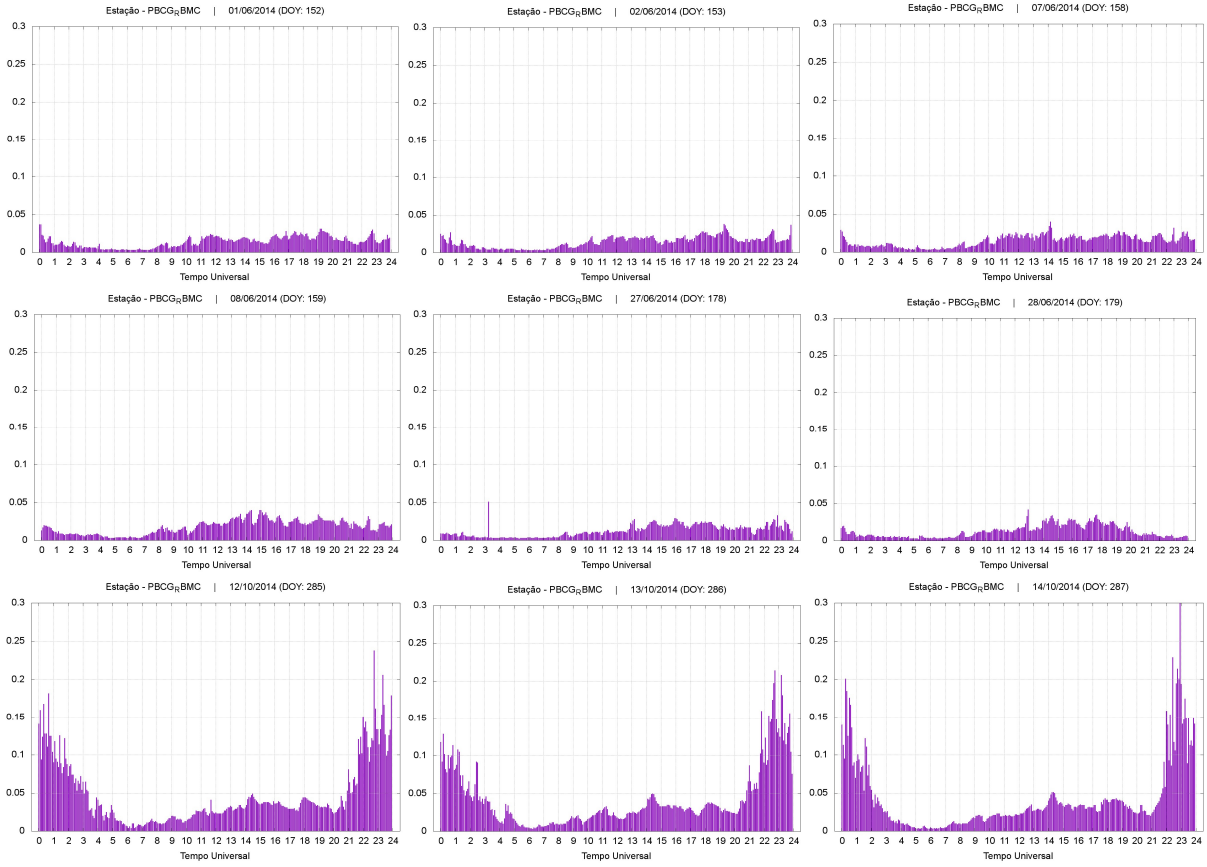


Figura B.6 – Índices ROTI, estação PBCG.



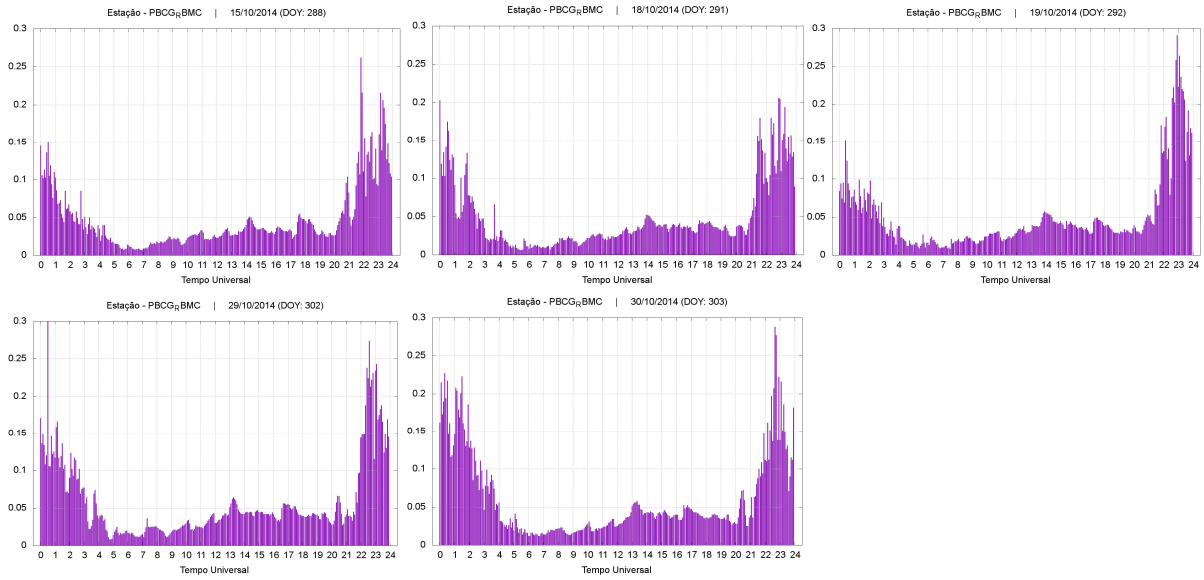


Figura B.7 – Índices ROTI, estação PBJP.

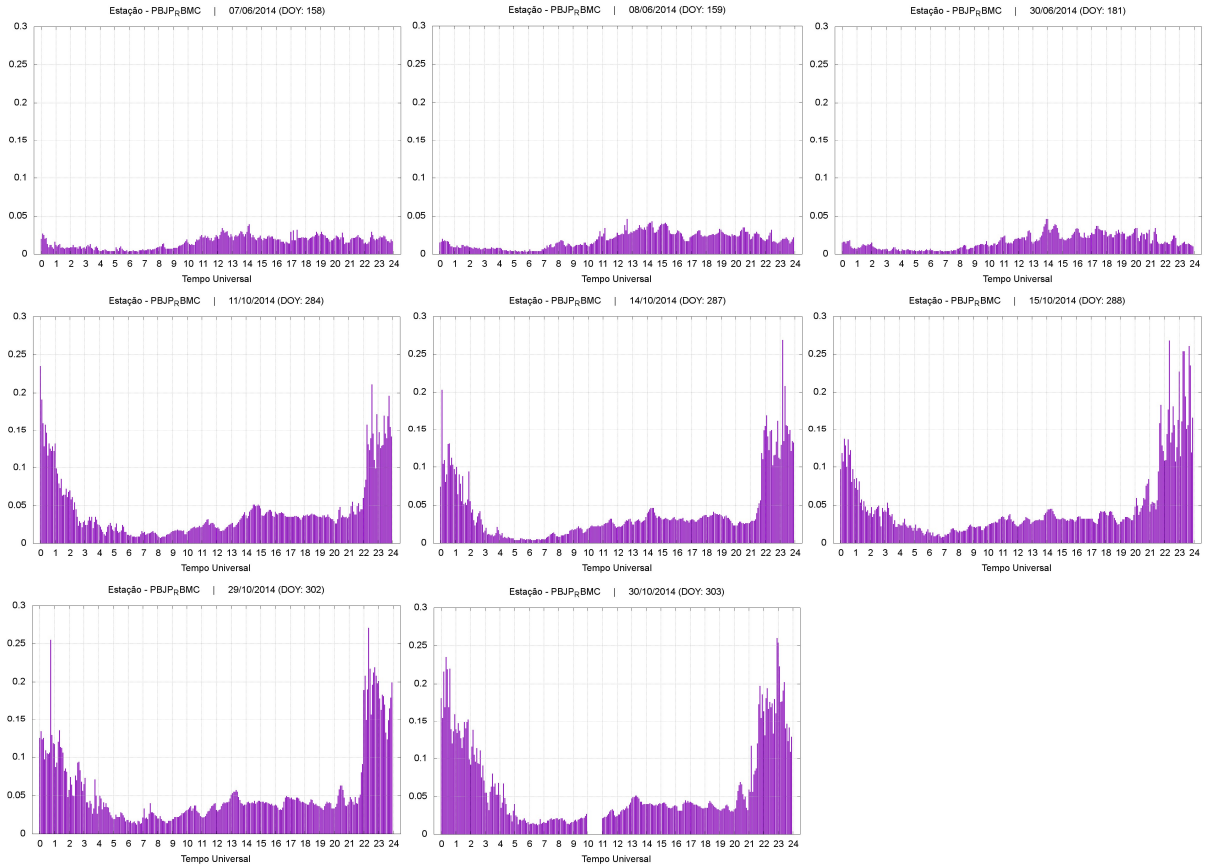


Figura B.8 – Índices ROTI, estação POAL.

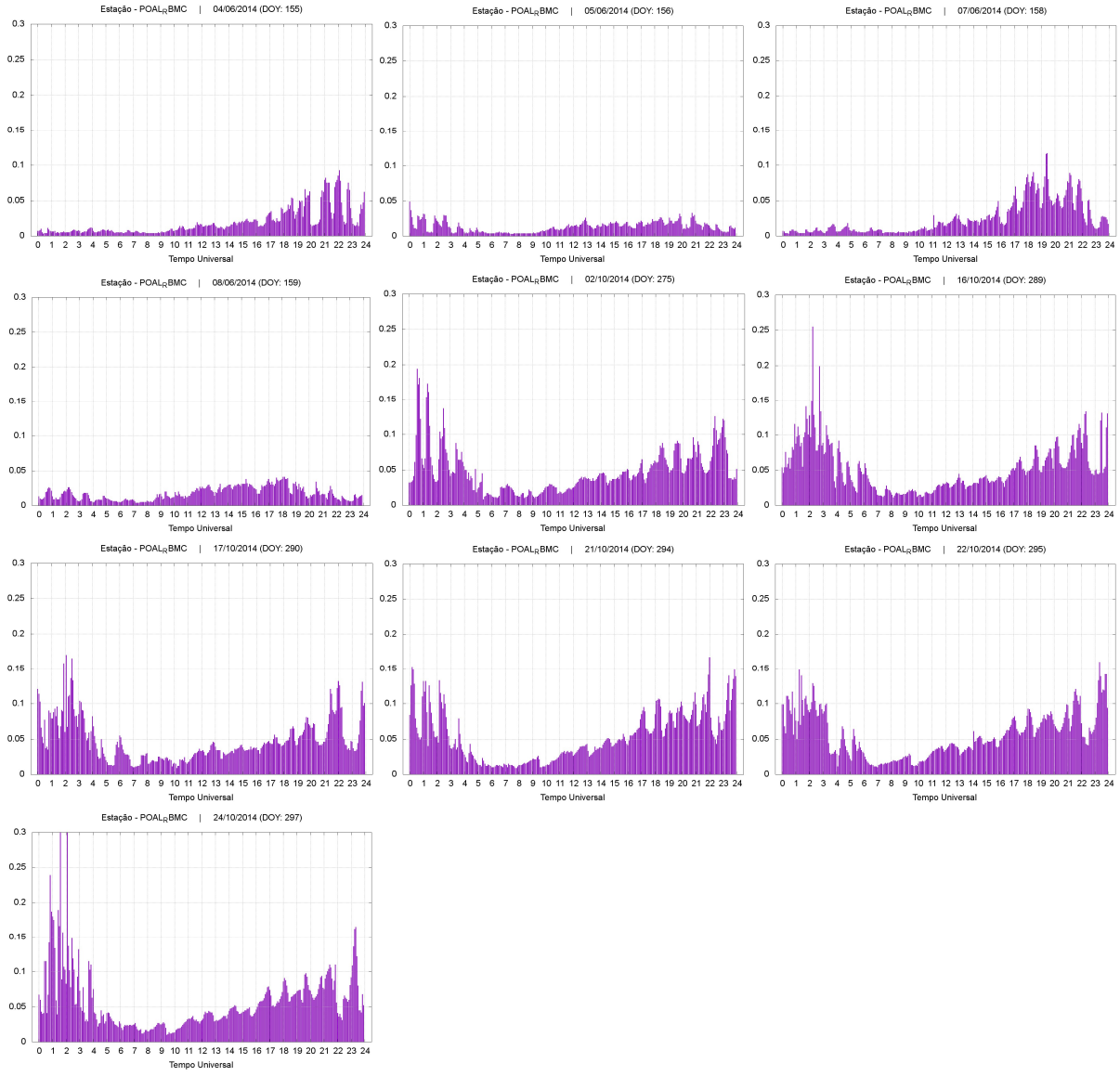
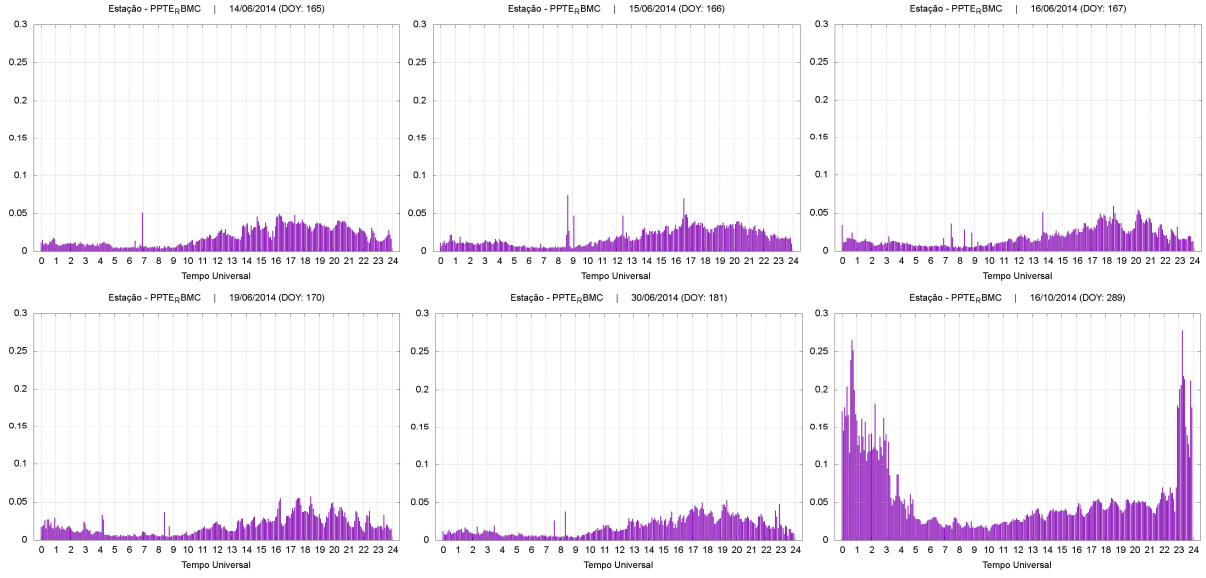


Figura B.9 – Índices ROTI, estação PPTE.



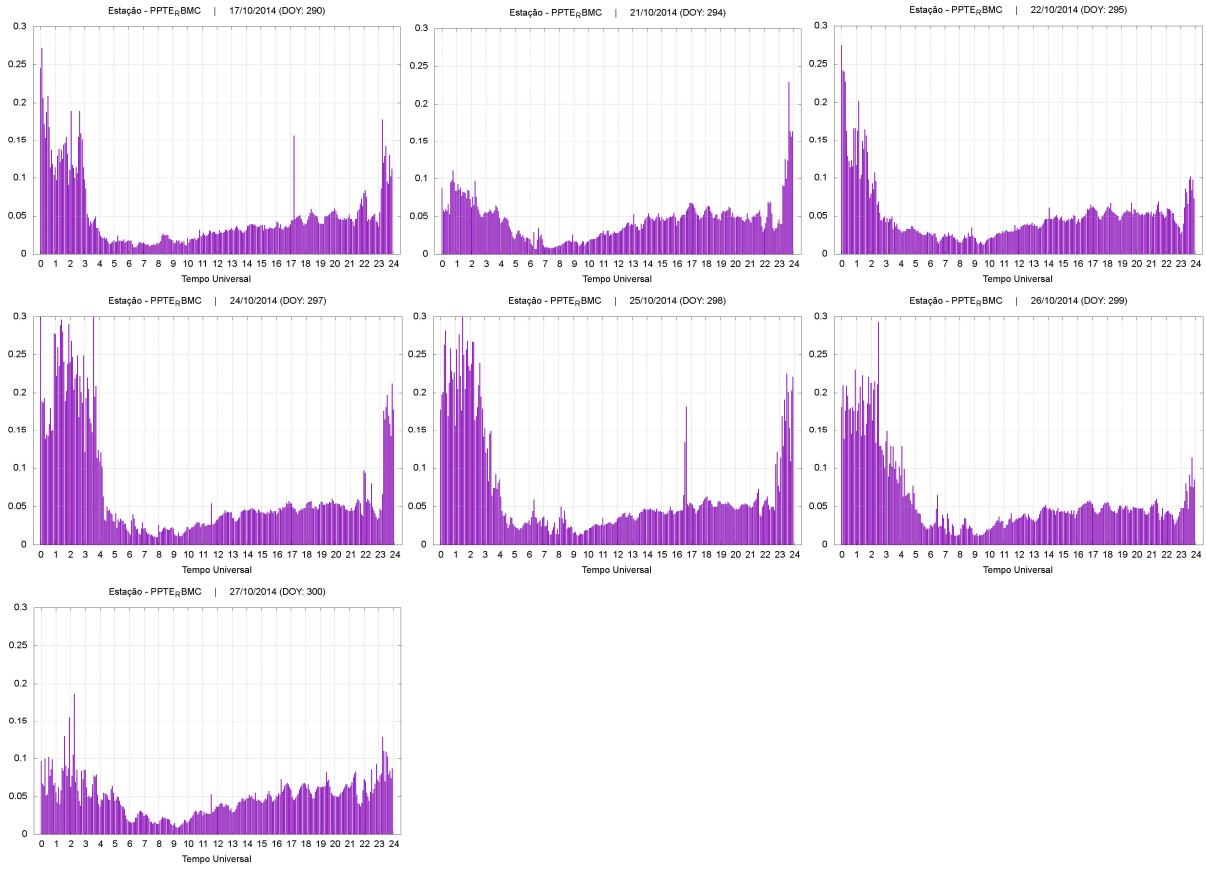


Figura B.10 – Índices ROTI, estação RECF.

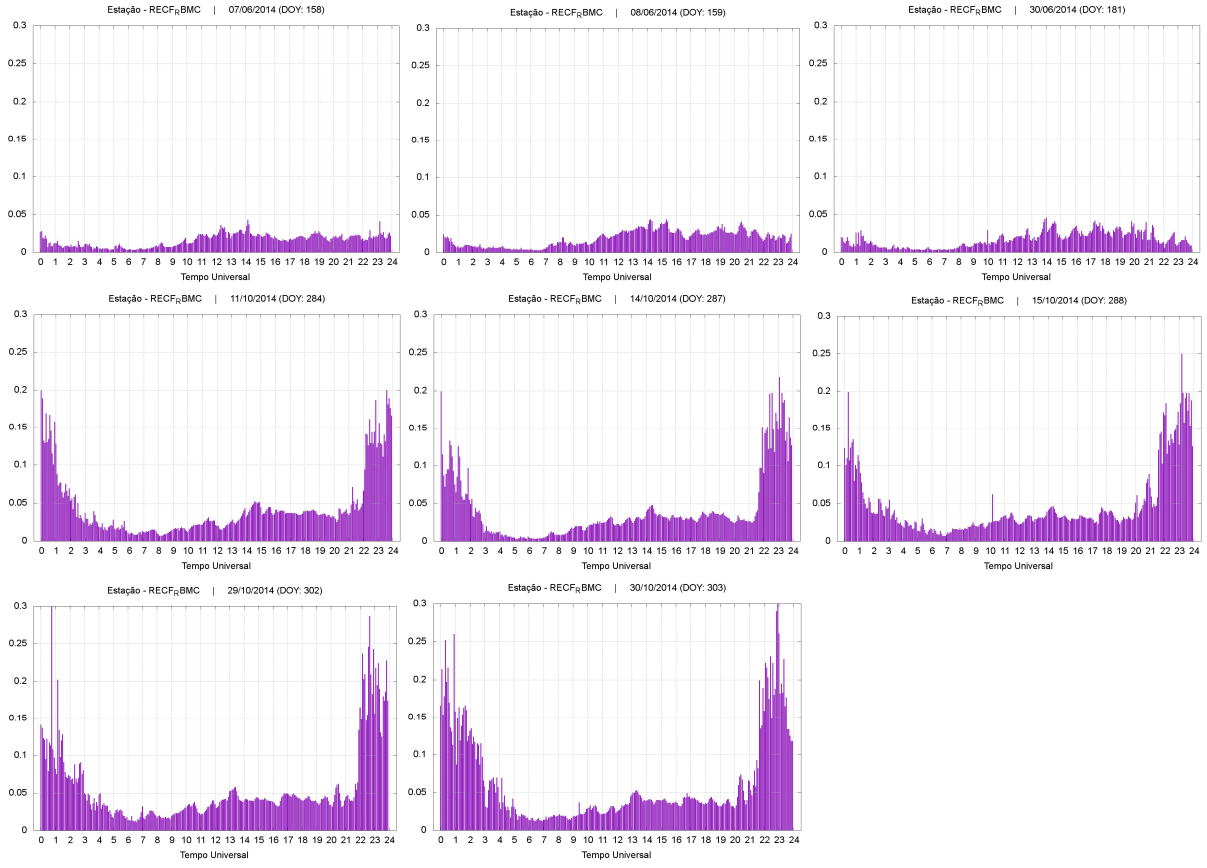


Figura B.11 – Índices ROTI, estação RNMO.

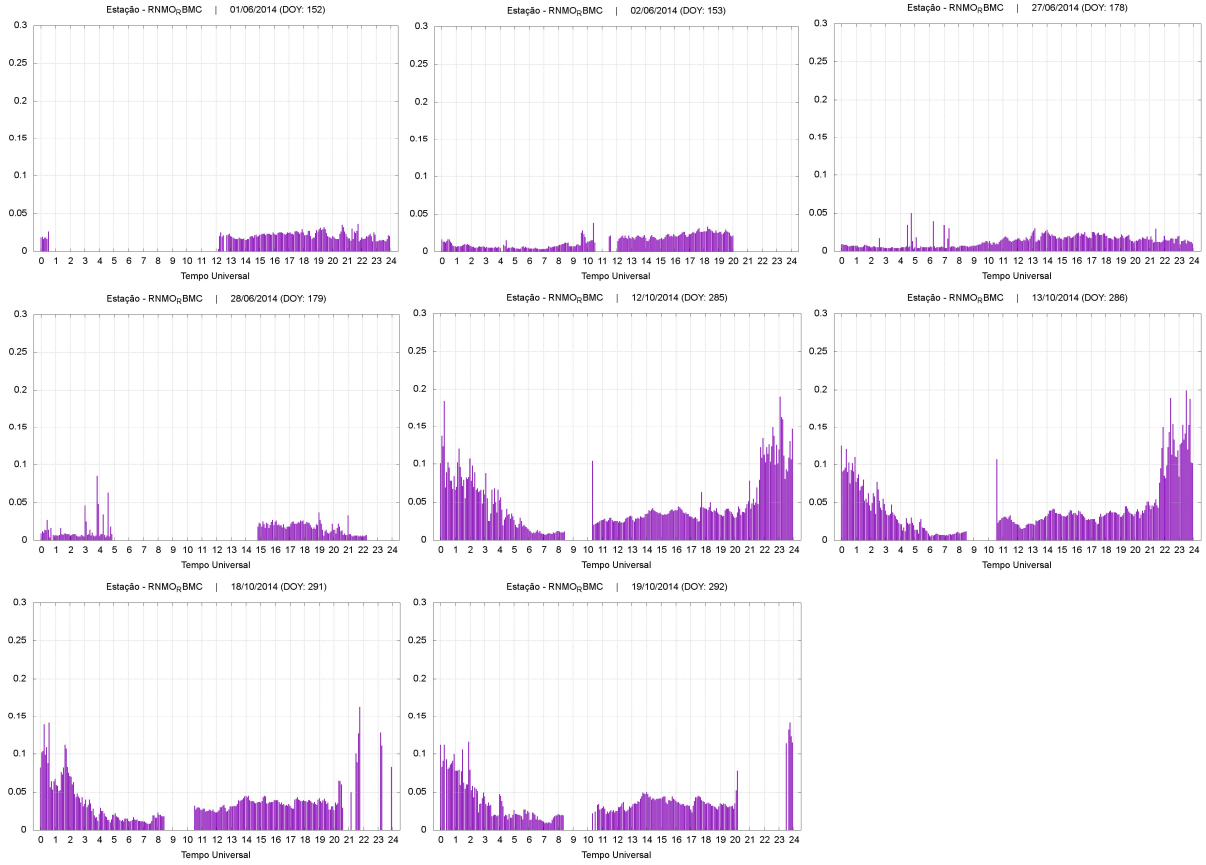


Figura B.12 – Índices ROTI, estação SCCH.

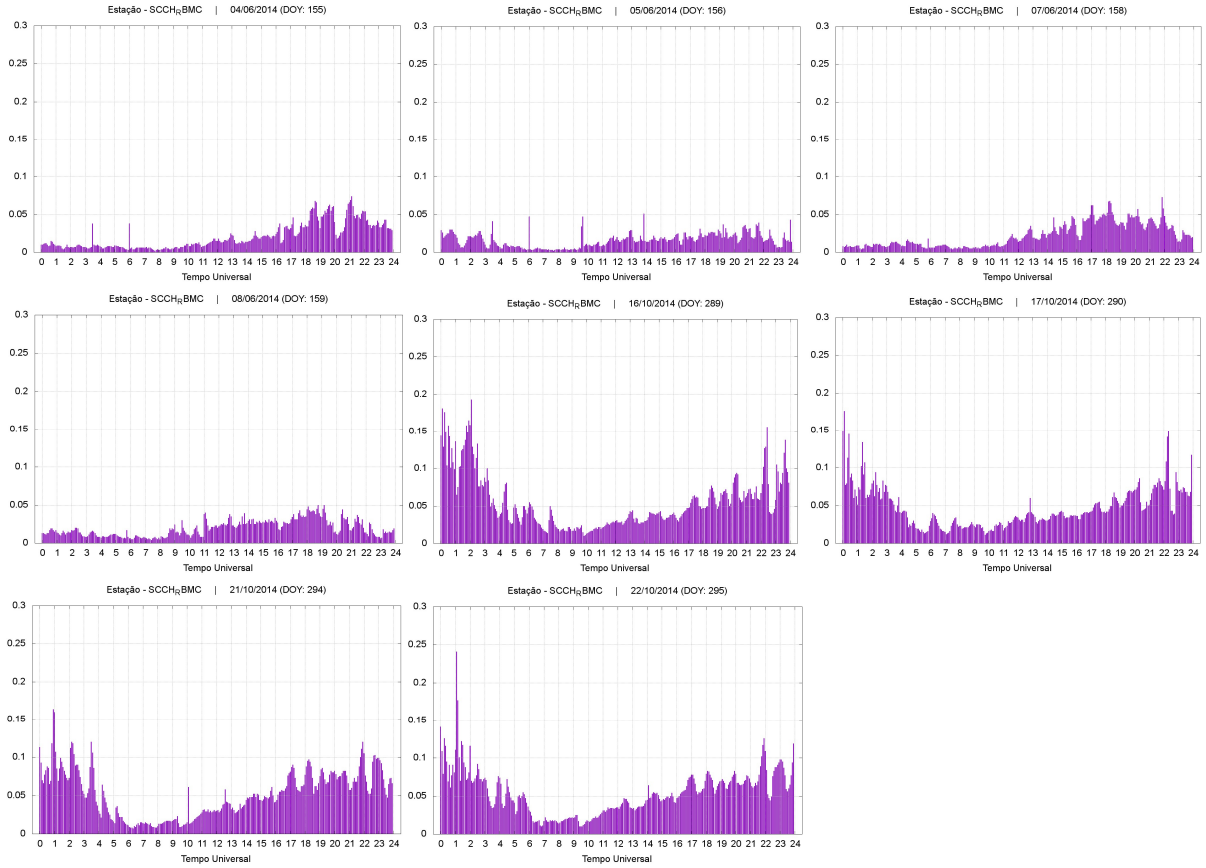


Figura B.13 – Índices ROTI, estação SCFL.

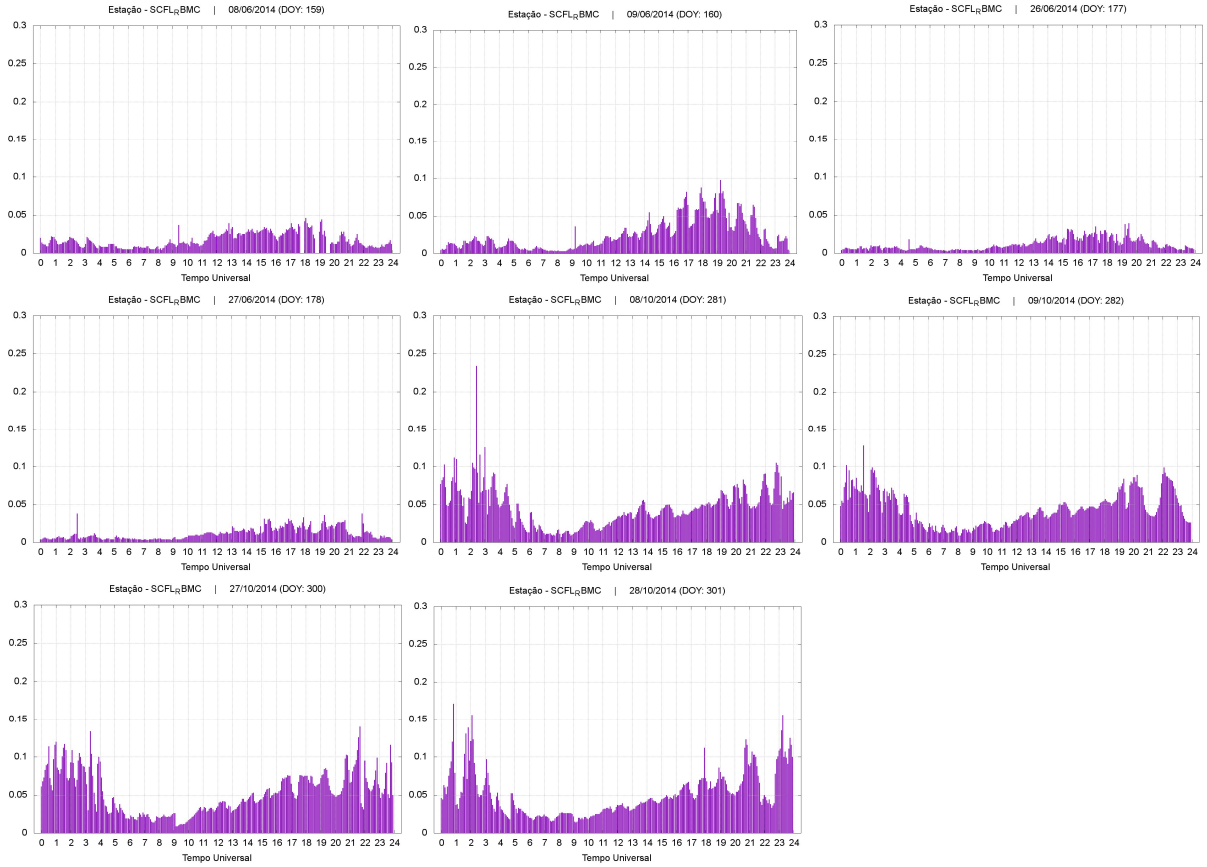
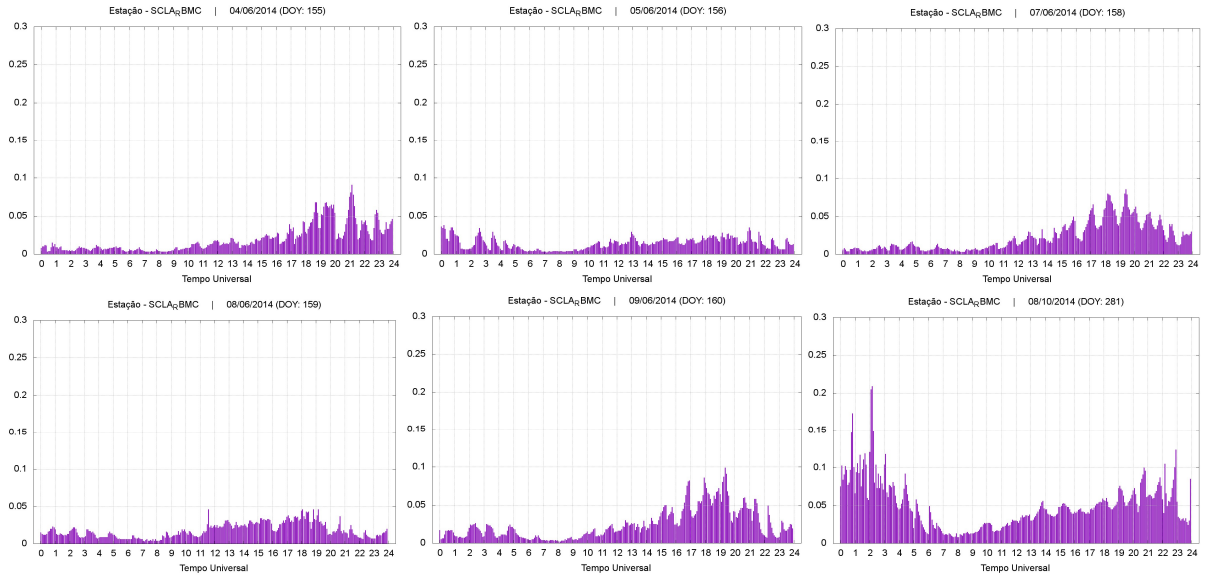


Figura B.14 – Índices ROTI, estação SCLA.



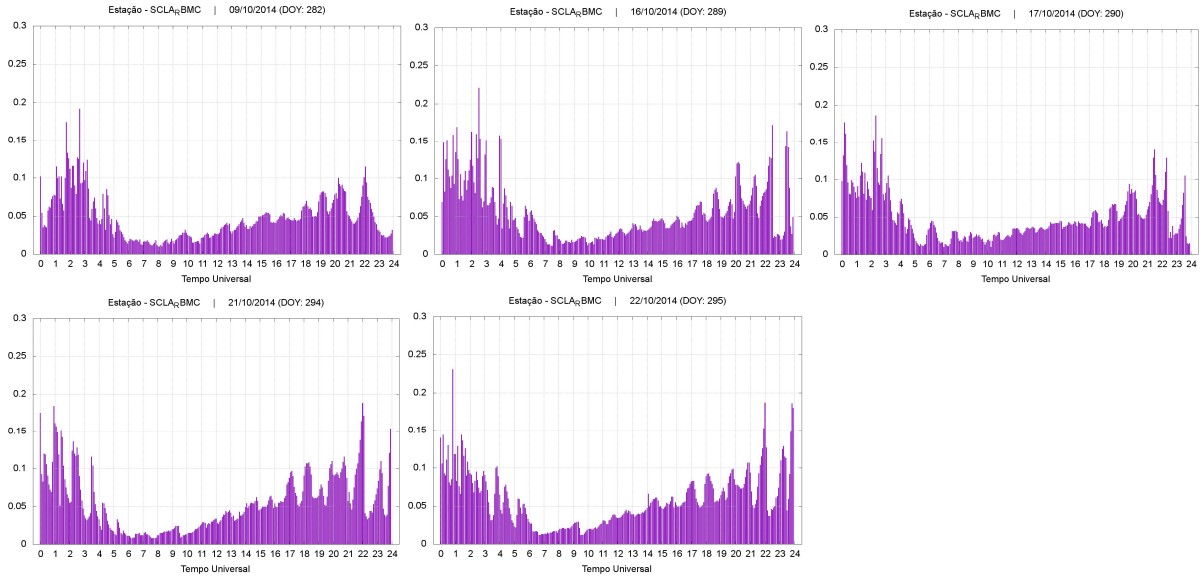


Figura B.15 – Índices ROTI, estação SJRP.

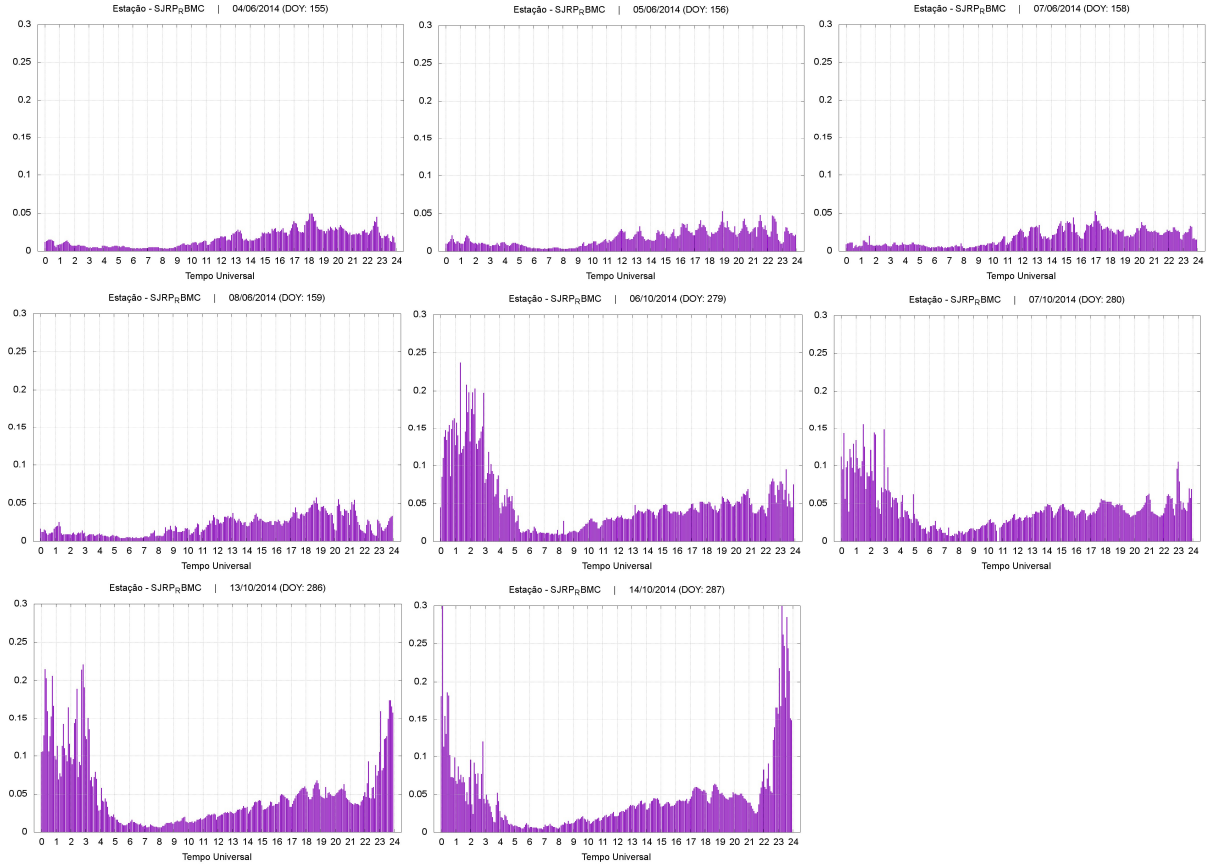


Figura B.16 – Índices ROTI, estação SPDR.

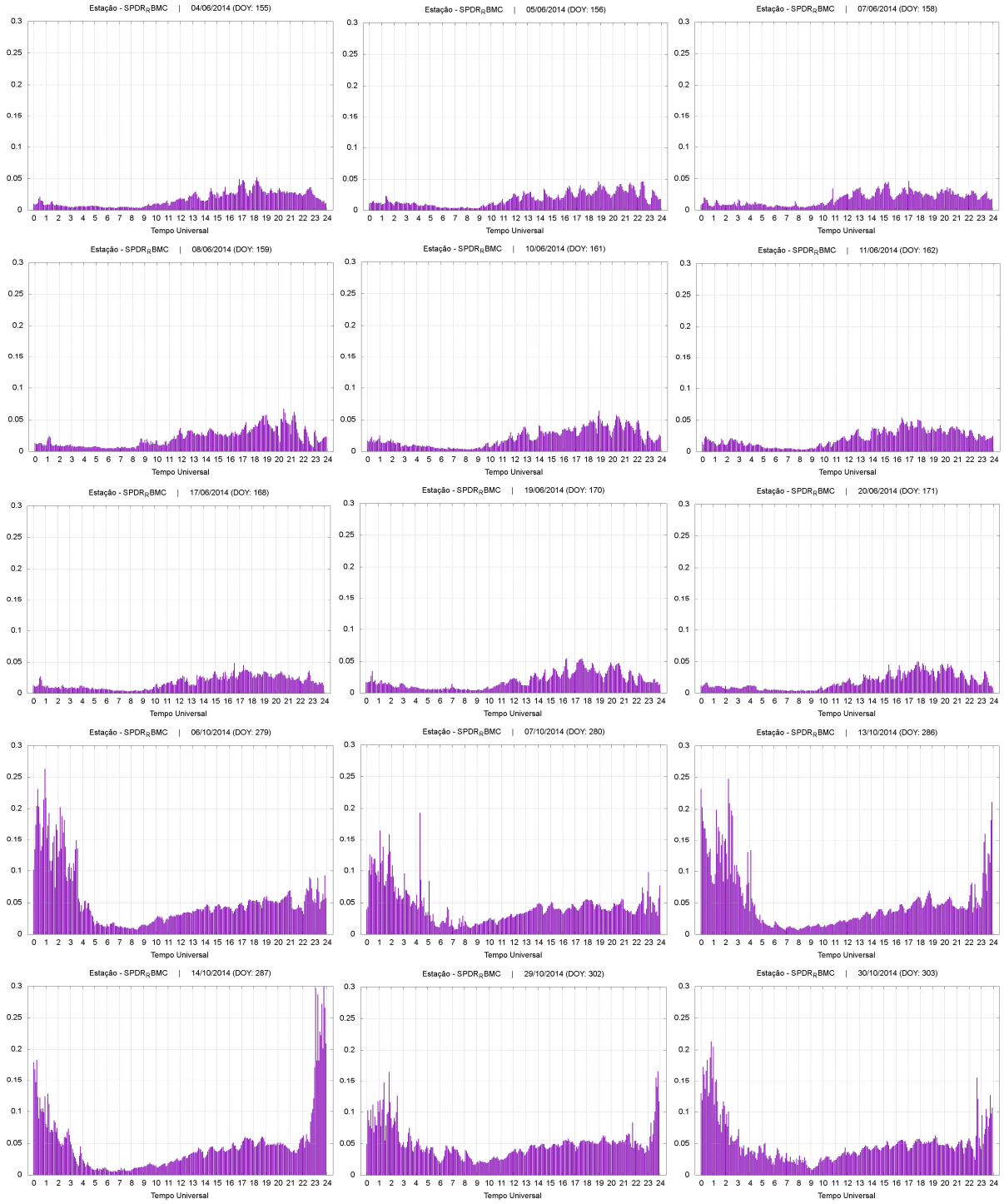
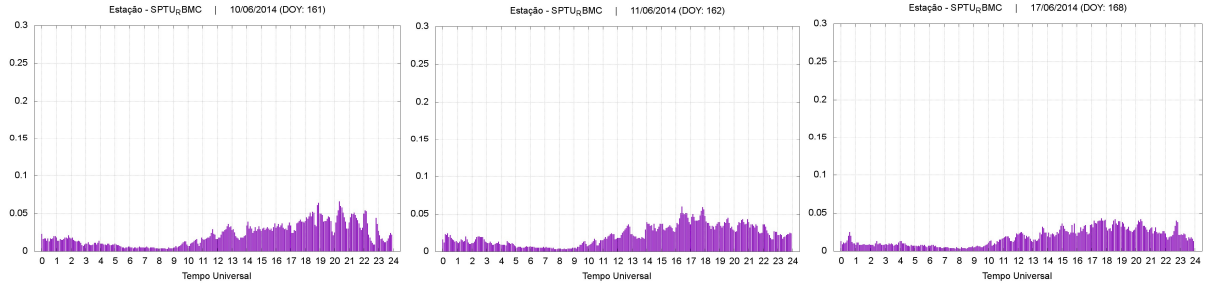
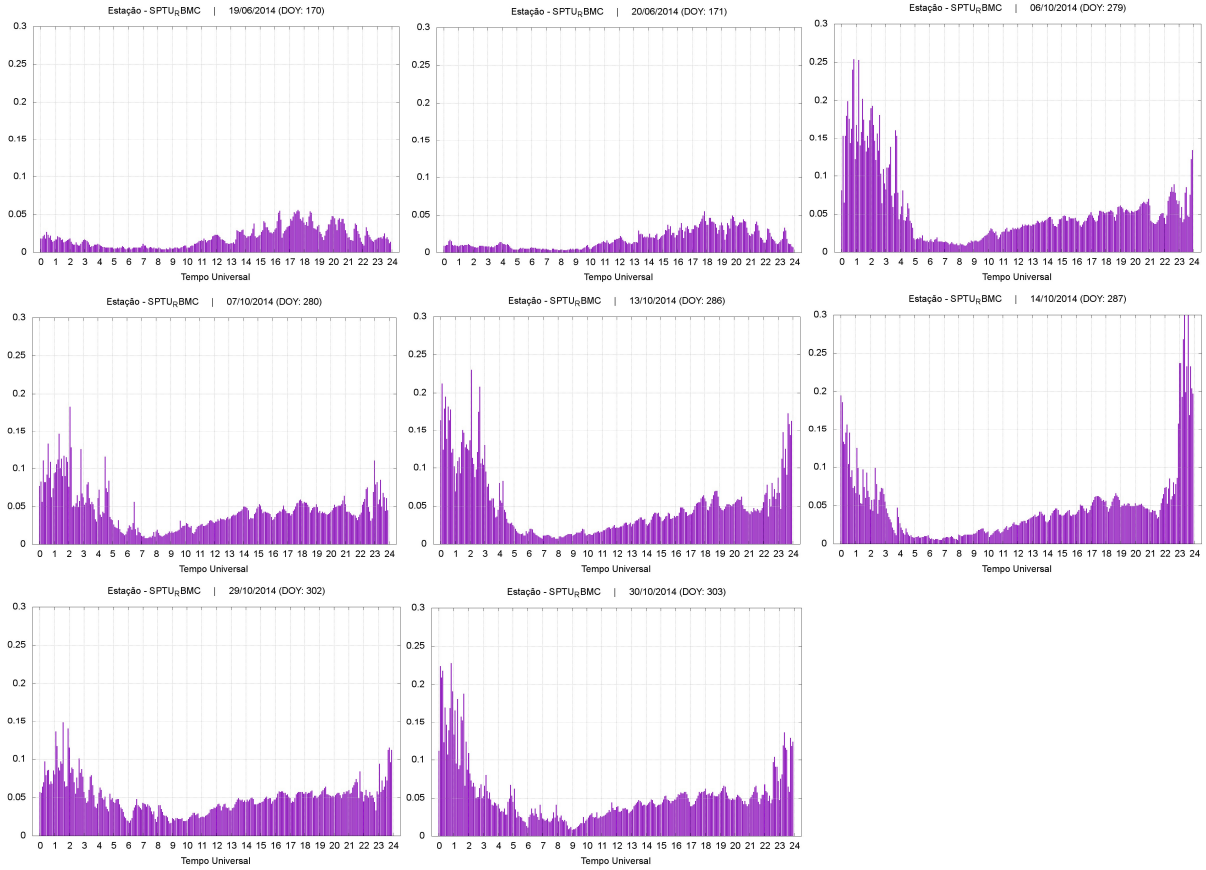


Figura B.17 – Índices ROTI, estação SPTU.




Estação - SPTU$_R$BMC | 19/06/2014 (DOY: 170)
Estação - SPTU$_R$BMC | 20/06/2014 (DOY: 171)
Estação - SPTU$_R$BMC | 06/10/2014 (DOY: 279)
Estação - SPTU$_R$BMC | 07/10/2014 (DOY: 280)
Estação - SPTU$_R$BMC | 13/10/2014 (DOY: 286)
Estação - SPTU$_R$BMC | 14/10/2014 (DOY: 287)
Estação - SPTU$_R$BMC | 29/10/2014 (DOY: 302)
Estação - SPTU$_R$BMC | 30/10/2014 (DOY: 303)
Tempo Universal

APÊNDICE C – ÍNDICES MP1 E MP2

Figura C.1 – Estação ALAR, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

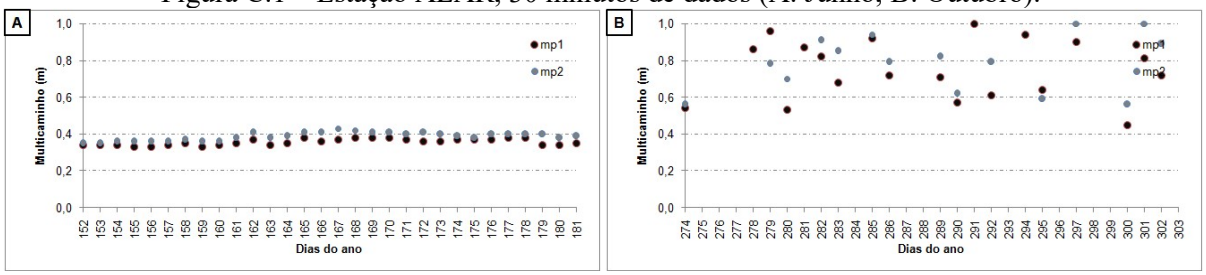


Figura C.2 – Estação CEFT, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

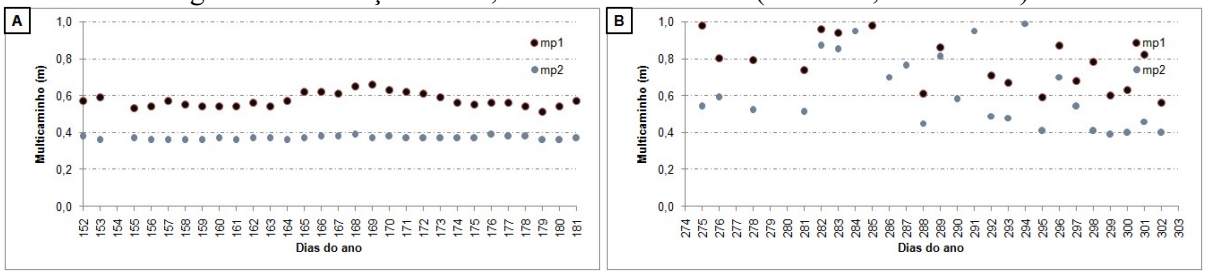


Figura C.3 – Estação ILHA, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

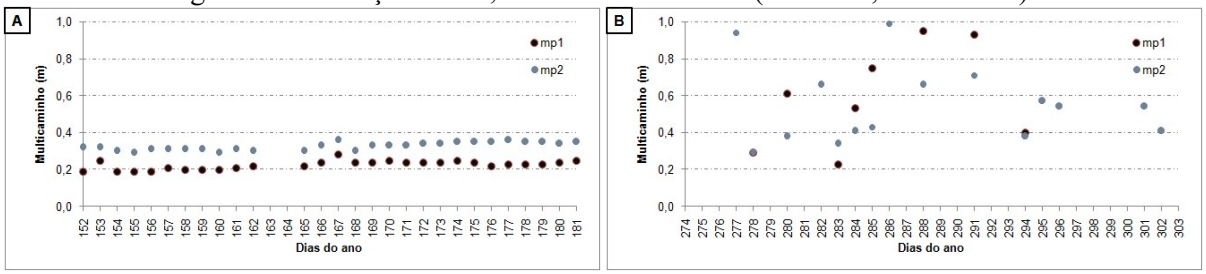


Figura C.4 – Estação IMBT, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

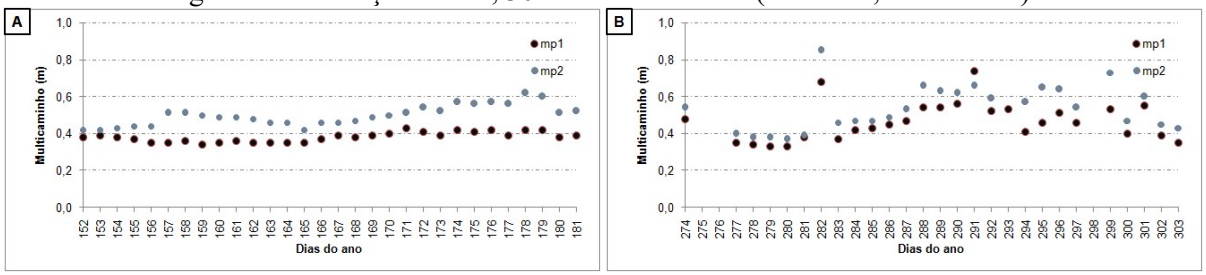


Figura C.5 – Estação OURI, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

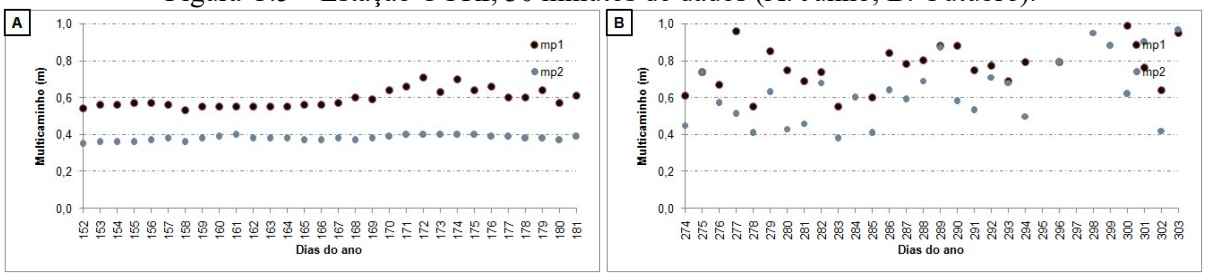


Figura C.6 – Estação PBCG, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

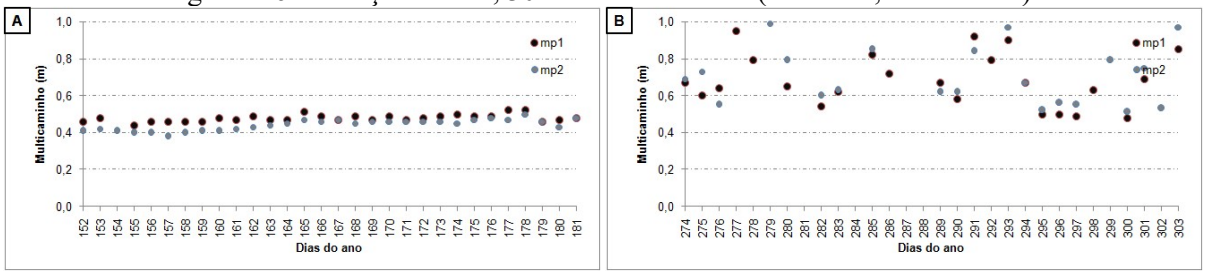


Figura C.7 – Estação PBJP, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

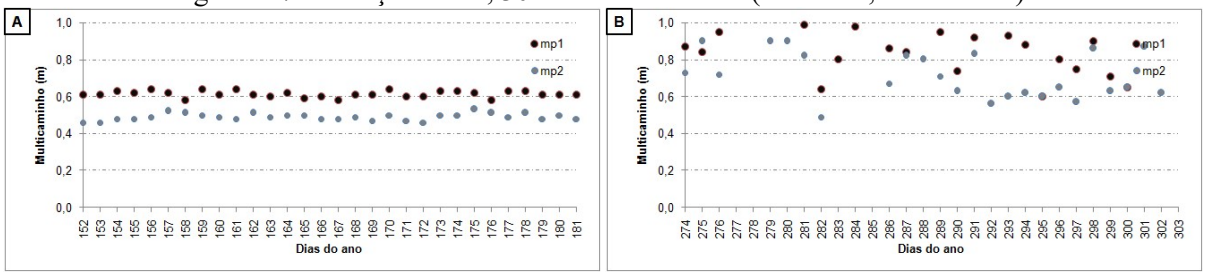


Figura C.8 – Estação POAL, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

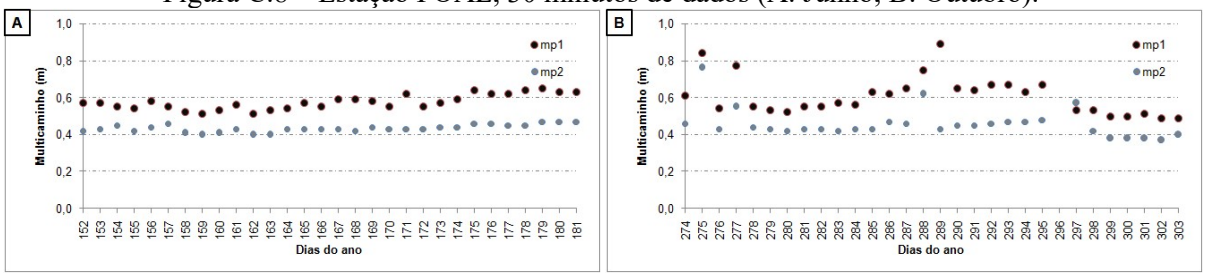


Figura C.9 – Estação PPTE, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

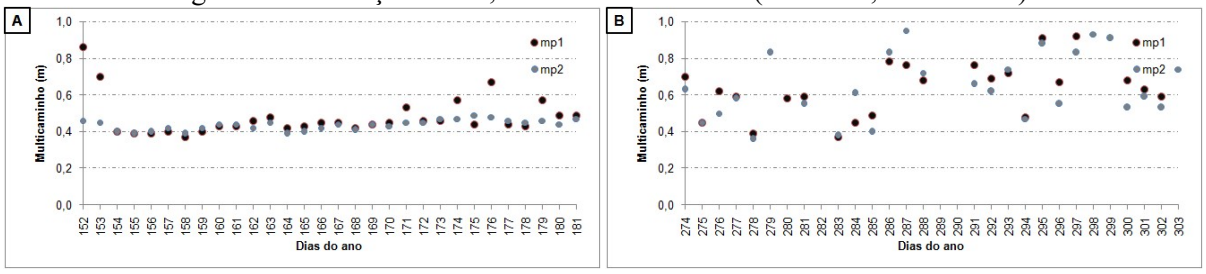


Figura C.10 – Estação RECF, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

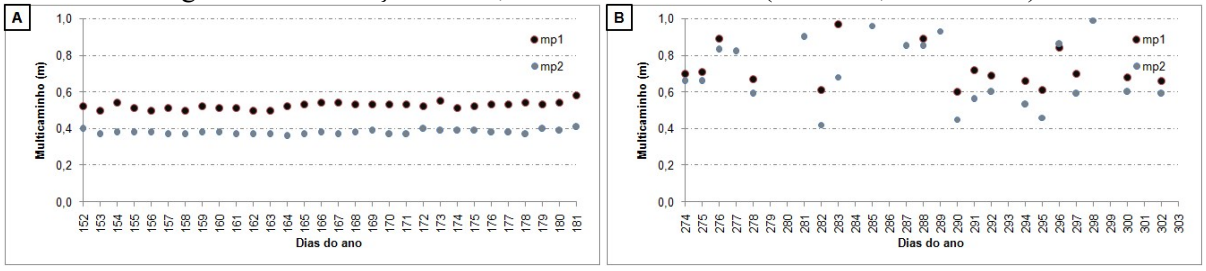


Figura C.11 – Estação RNMO, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

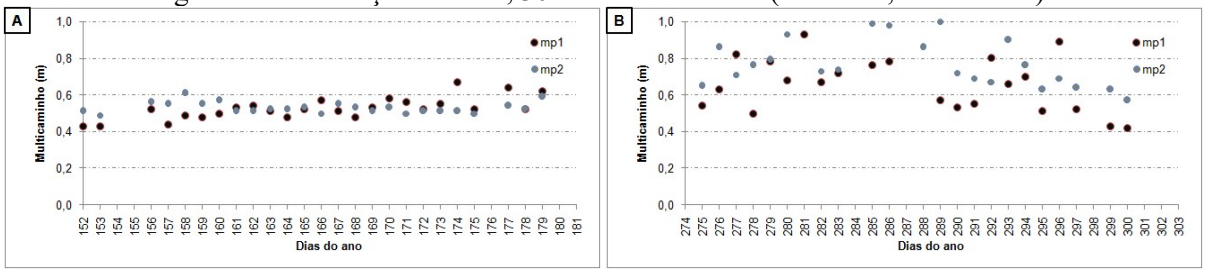


Figura C.12 – Estação SCCH, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

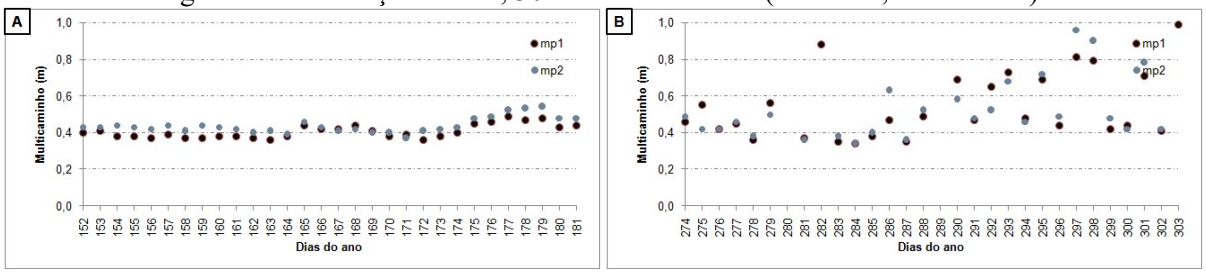


Figura C.13 – Estação SCFL, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

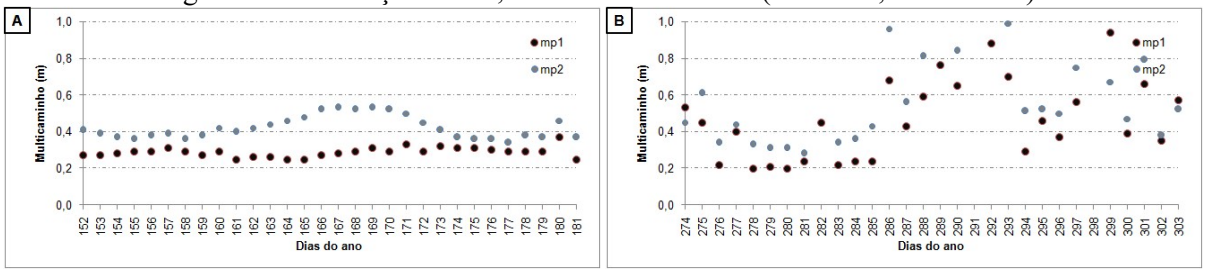


Figura C.14 – Estação SCLA, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

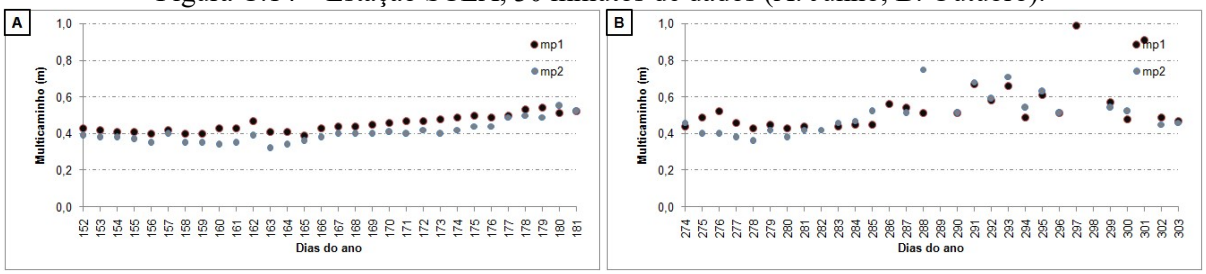


Figura C.15 – Estação SJRP, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

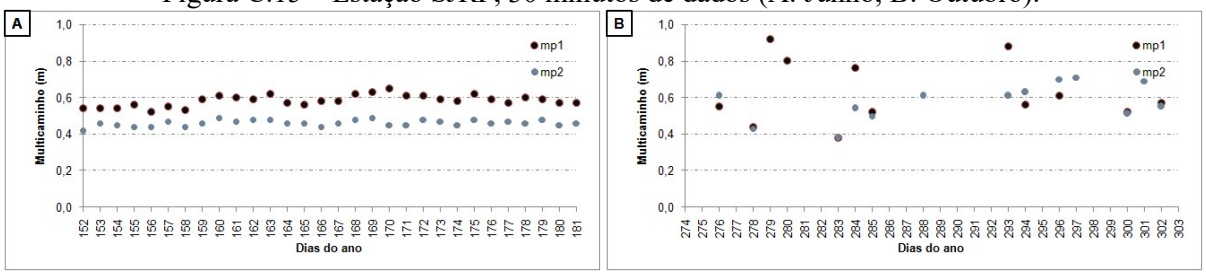


Figura C.16 – Estação SPDR, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

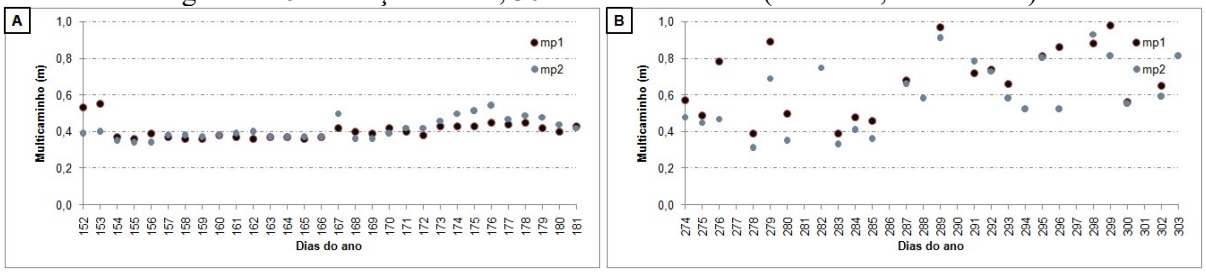


Figura C.17 – Estação SPTU, 30 minutos de dados (A: Junho; B: Outubro).

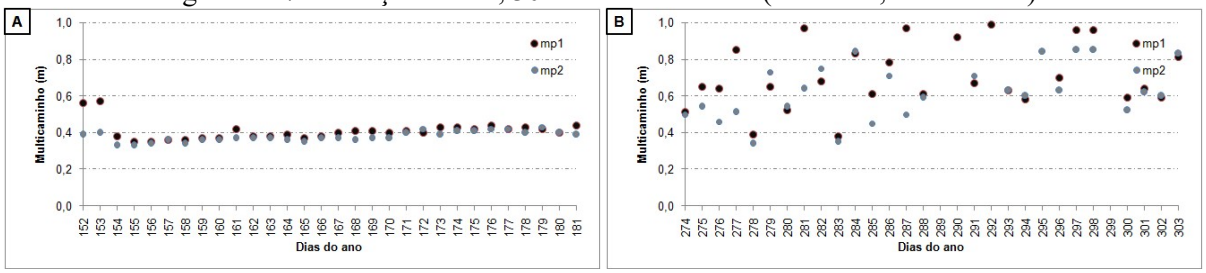


Figura C.18 – Estação ALAR, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

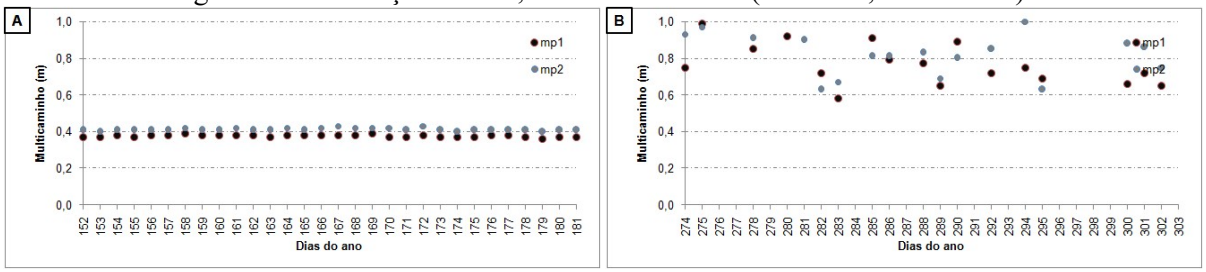


Figura C.19 – Estação CEFT, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

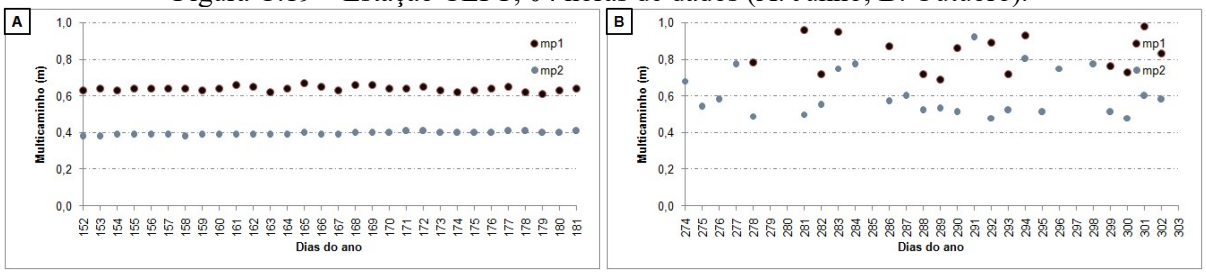


Figura C.20 – Estação ILHA, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

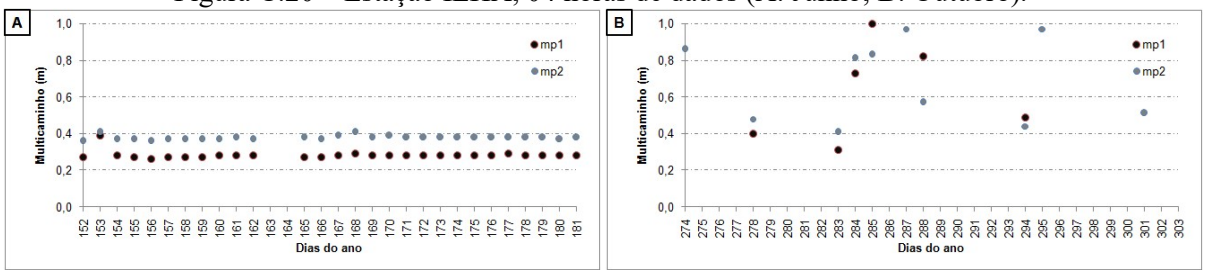


Figura C.21 – Estação IMBT, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

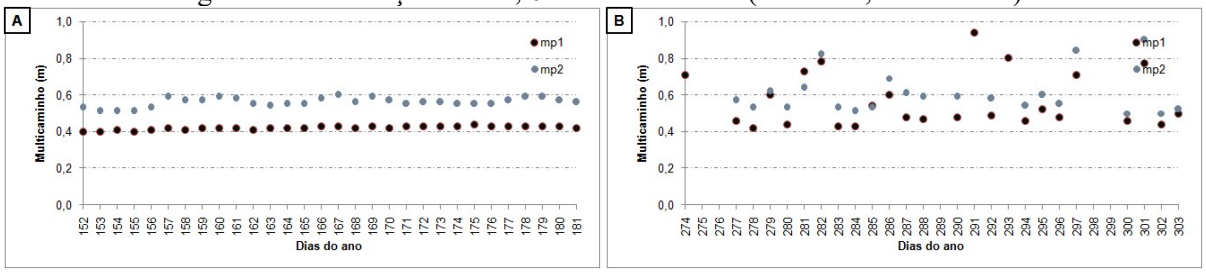


Figura C.22 – Estação OURI, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

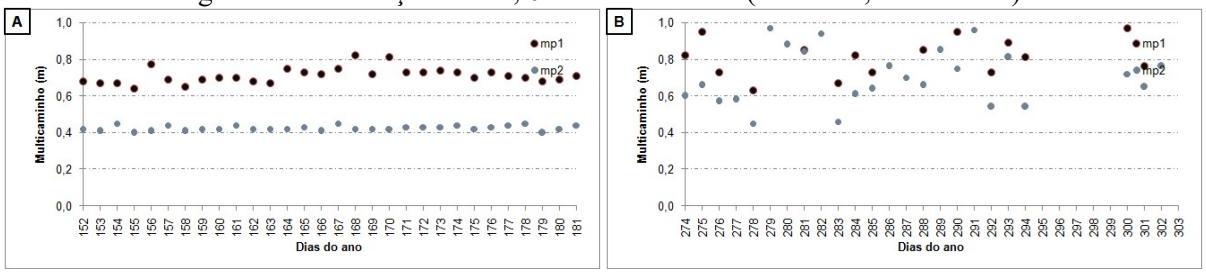


Figura C.23 – Estação PBCG, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

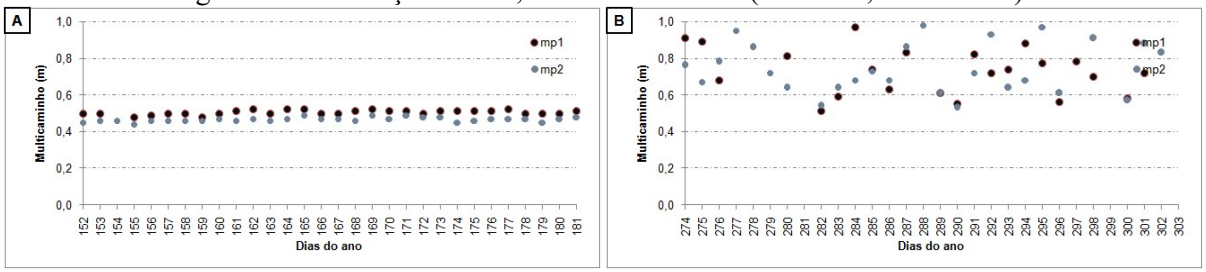


Figura C.24 – Estação PBJP, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

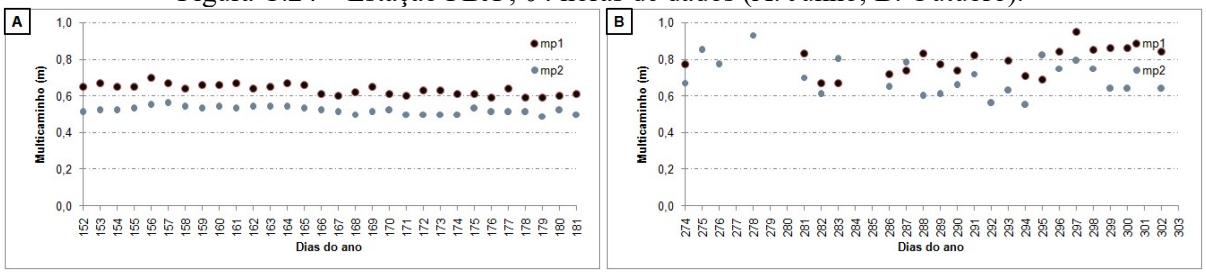


Figura C.25 – Estação POAL, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

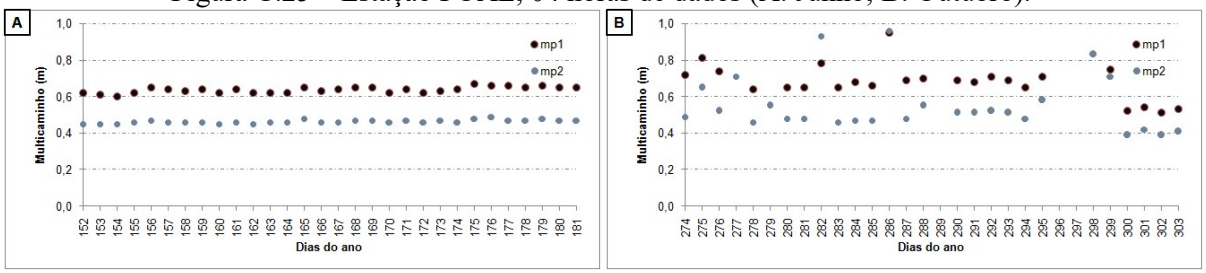


Figura C.26 – Estação PPTE, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

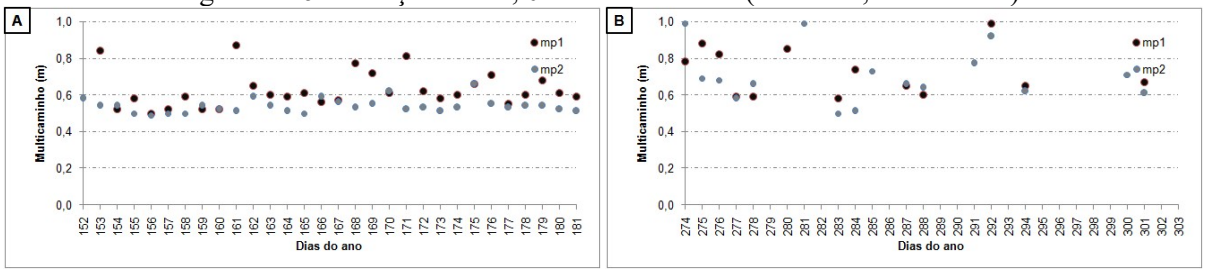


Figura C.27 – Estação RECF, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

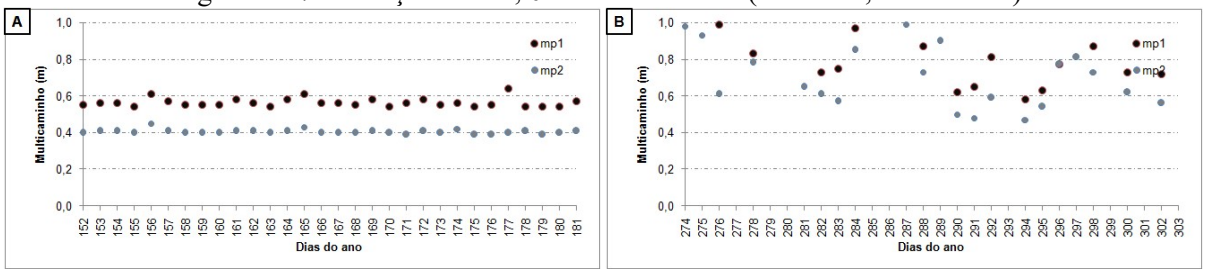


Figura C.28 – Estação RNMO, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

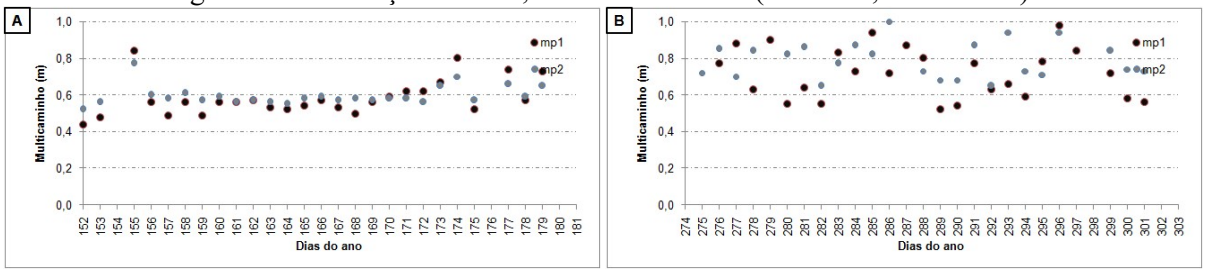


Figura C.29 – Estação SCCH, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

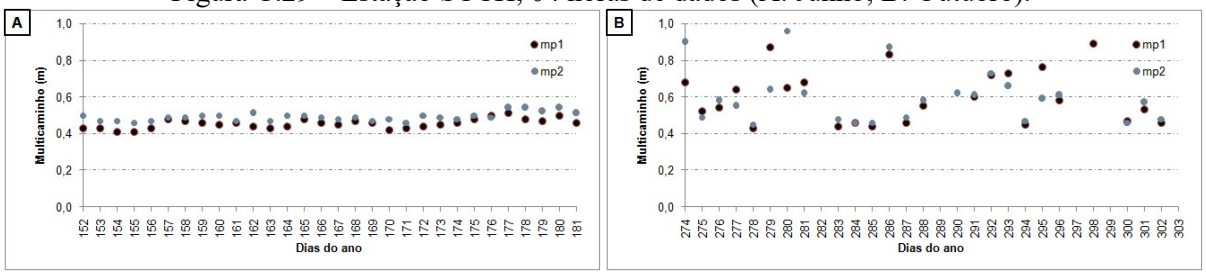


Figura C.30 – Estação SCFL, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

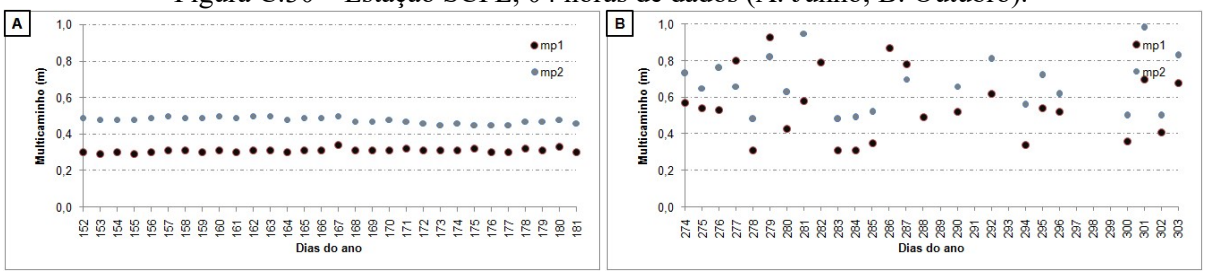


Figura C.31 – Estação SCLA, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

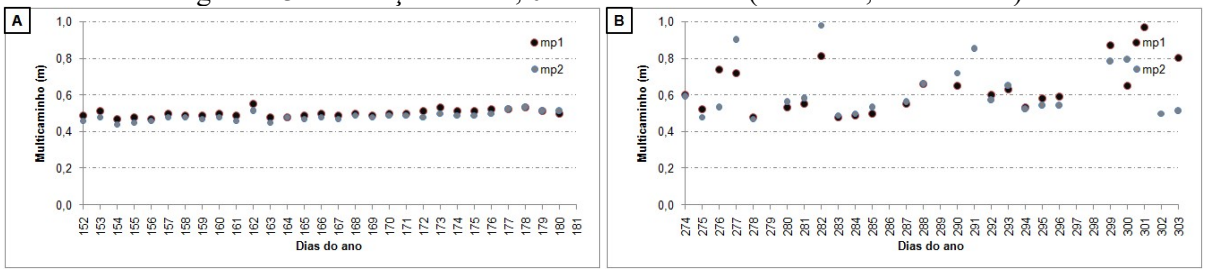


Figura C.32 – Estação SJRP, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

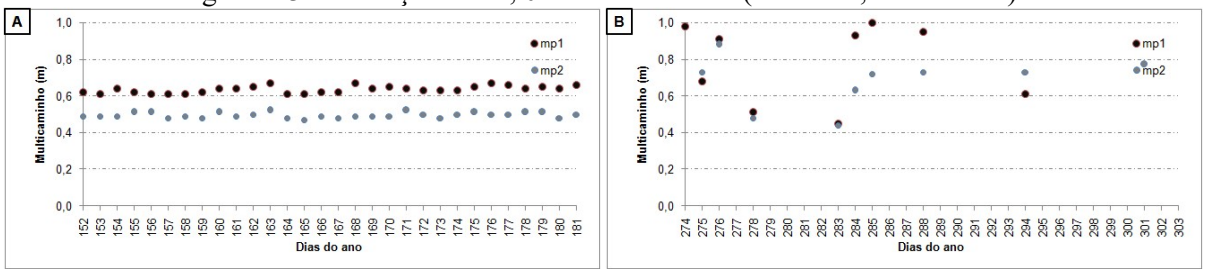


Figura C.33 – Estação SPDR, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

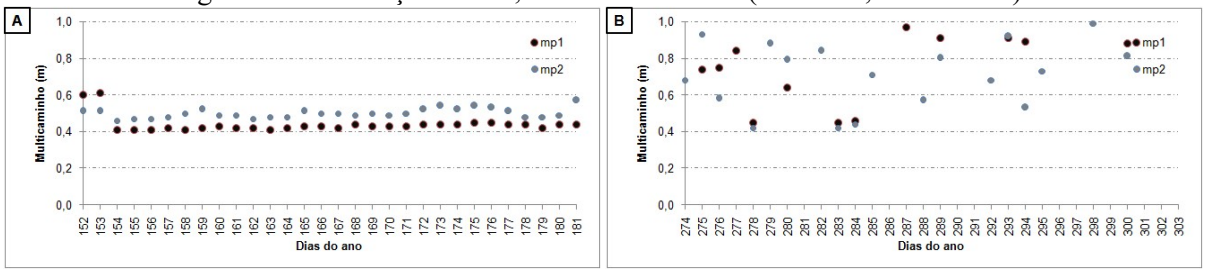


Figura C.34 – Estação SPTU, 04 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

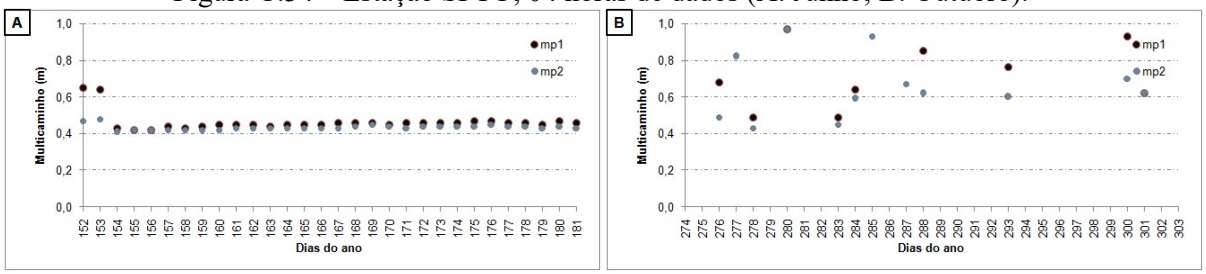


Figura C.35 – Estação ALAR, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

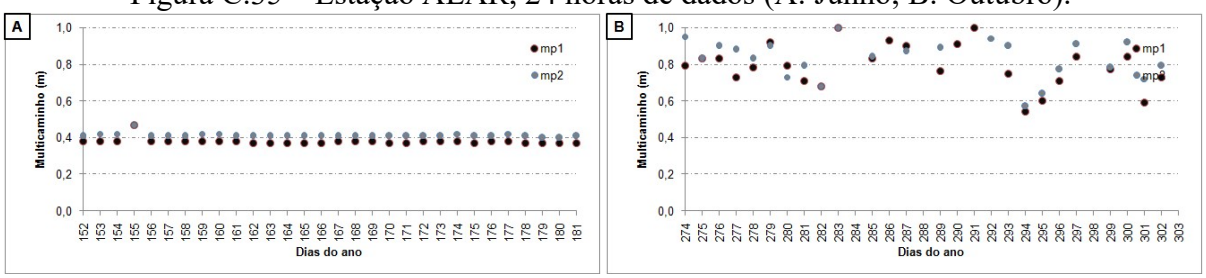


Figura C.36 – Estação CEFT, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

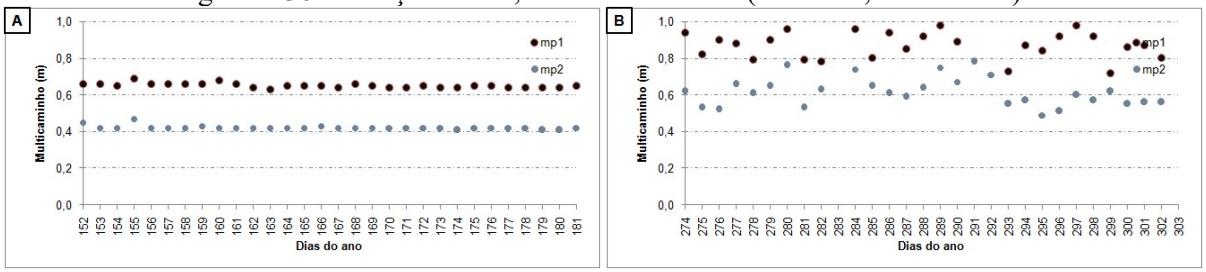


Figura C.37 – Estação ILHA, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

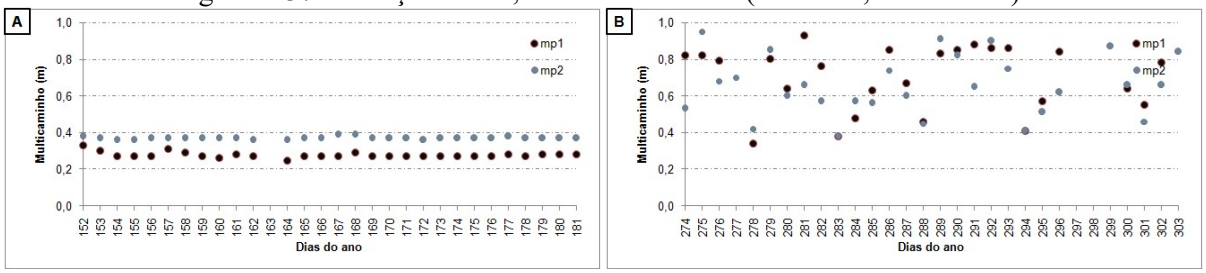


Figura C.38 – Estação IMBT, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

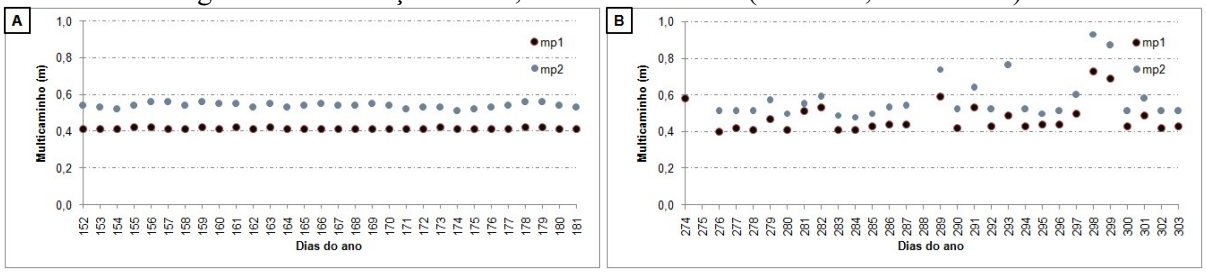


Figura C.39 – Estação OURI, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

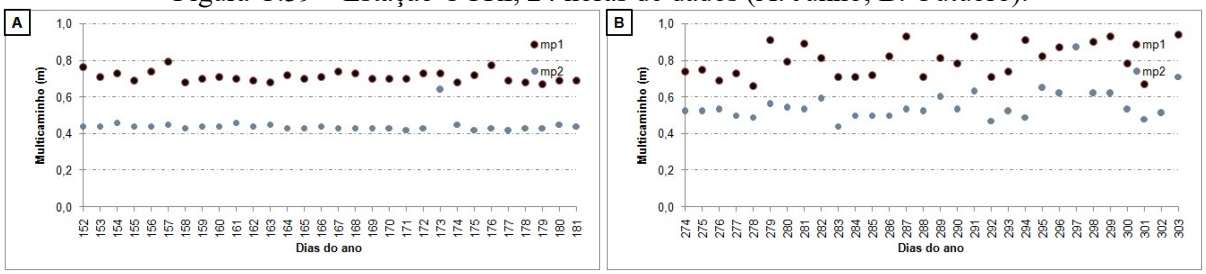


Figura C.40 – Estação PBCG, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

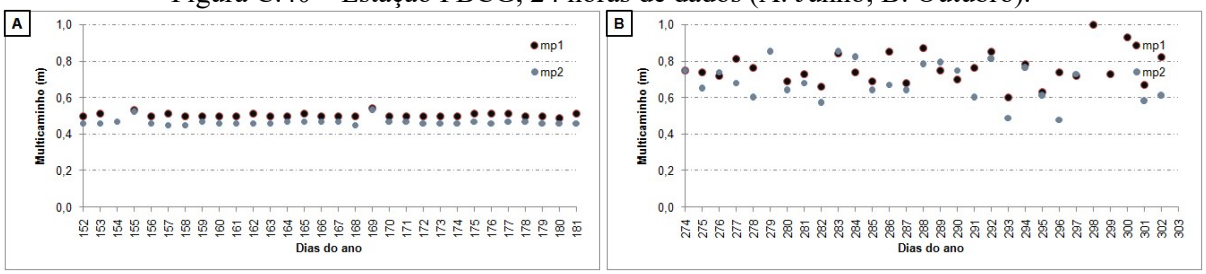


Figura C.41 – Estação PBJP, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

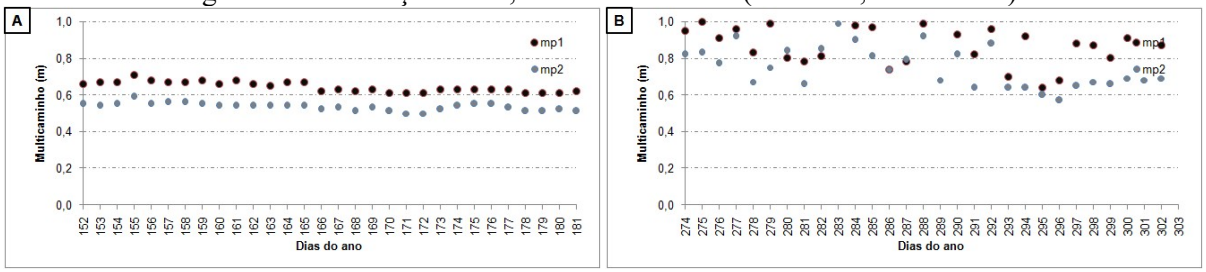


Figura C.42 – Estação POAL, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

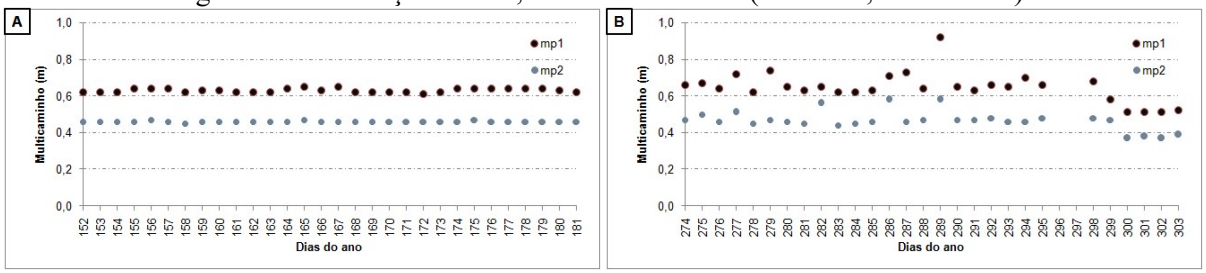


Figura C.43 – Estação PPTE, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

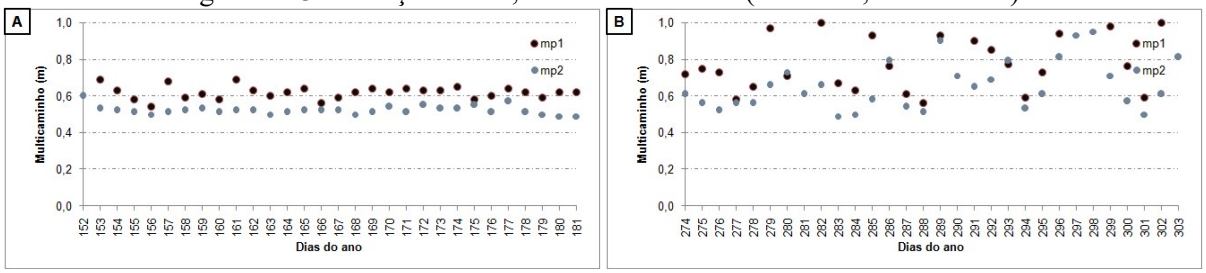


Figura C.44 – Estação RECF, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

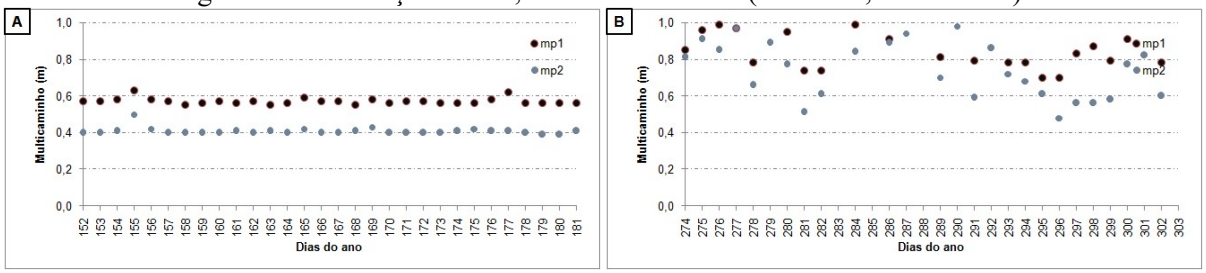


Figura C.45 – Estação RNMO, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

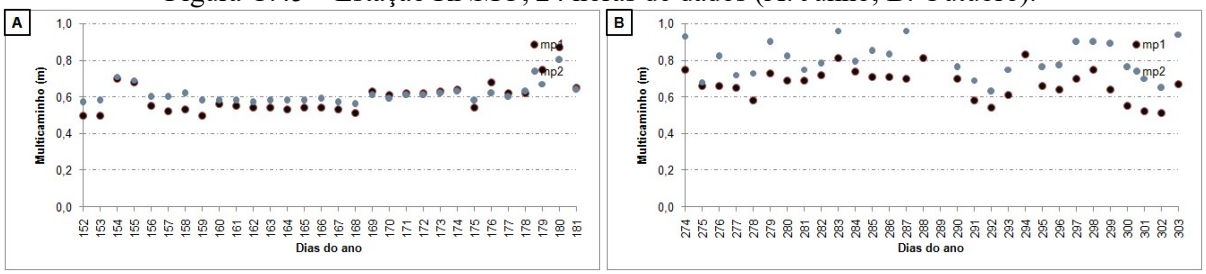


Figura C.46 – Estação SCCH, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

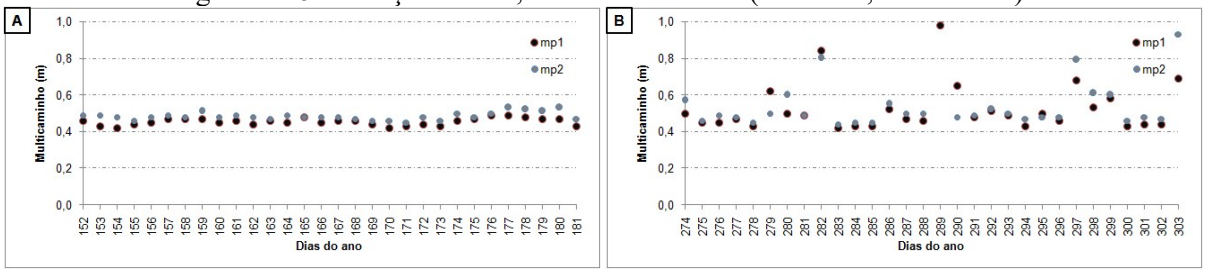


Figura C.47 – Estação SCFL, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

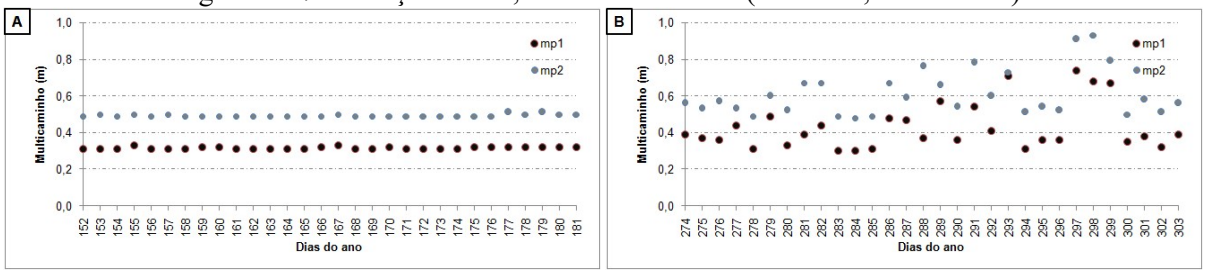


Figura C.48 – Estação SCLA, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

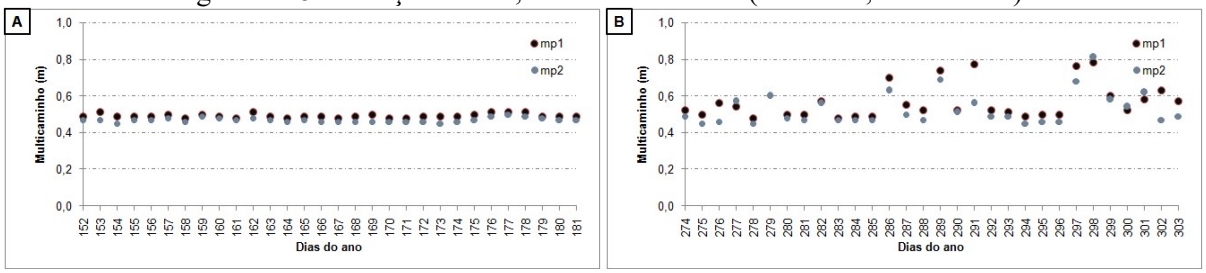


Figura C.49 – Estação SJRP, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

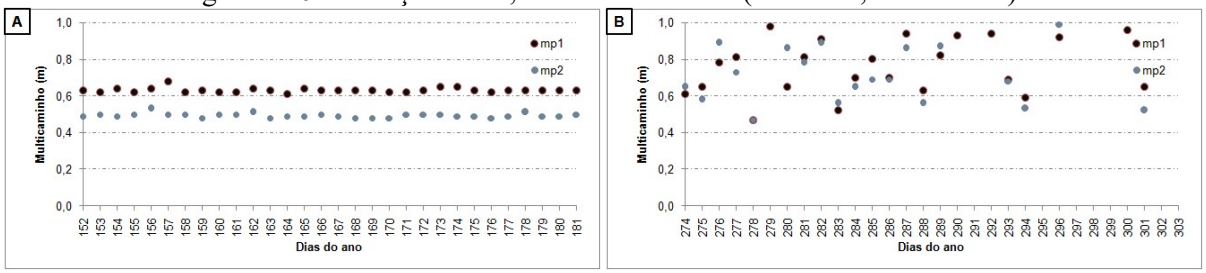


Figura C.50 – Estação SPDR, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).

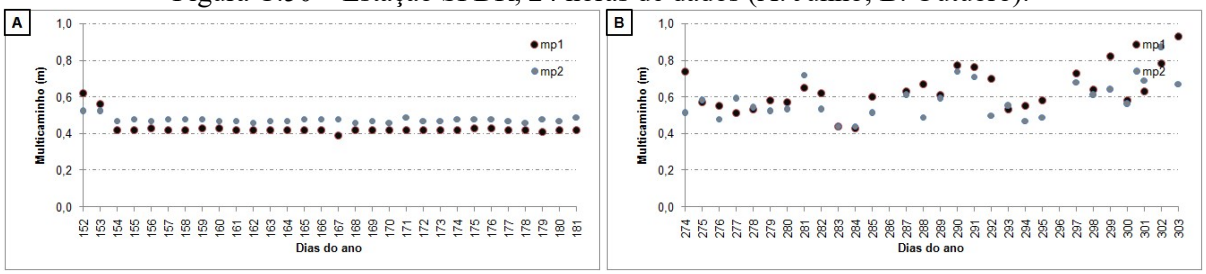
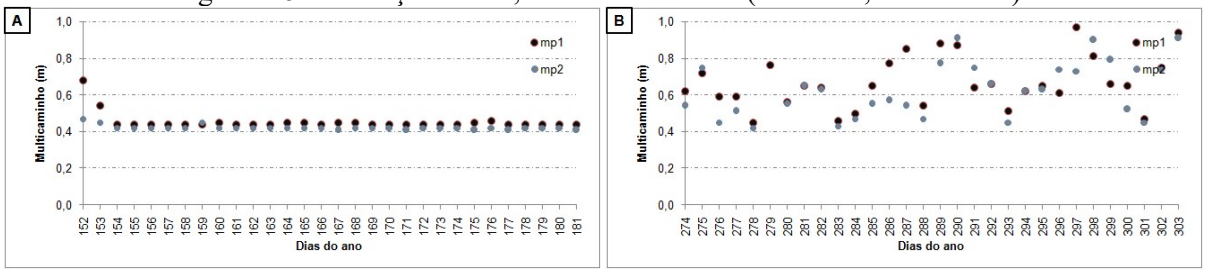


Figura C.51 – Estação SPTU, 24 horas de dados (A: Junho; B: Outubro).



APÊNDICE D – RESULTADOS DO PPP EM SGL

Figura D.1 –Estação CEFT, junho, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

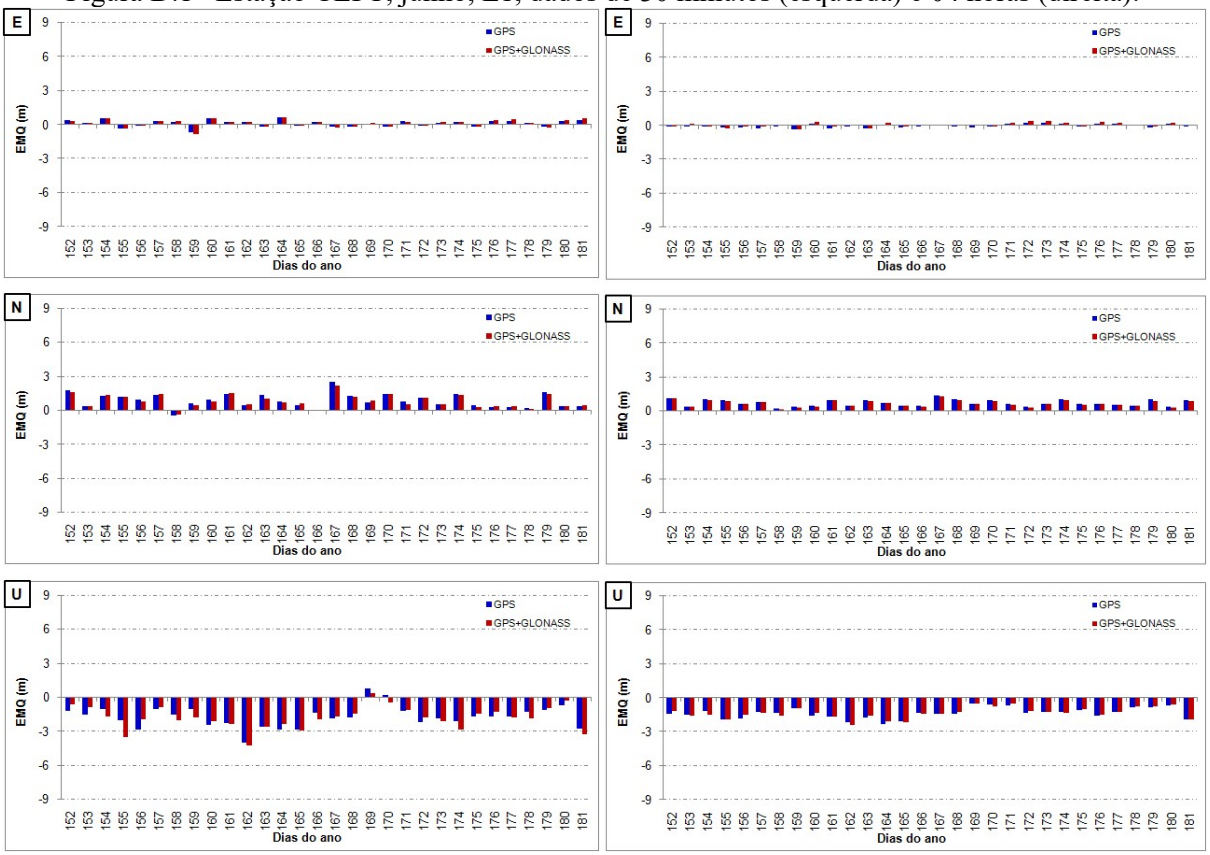


Figura D.2 – Estação CEFT, junho, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

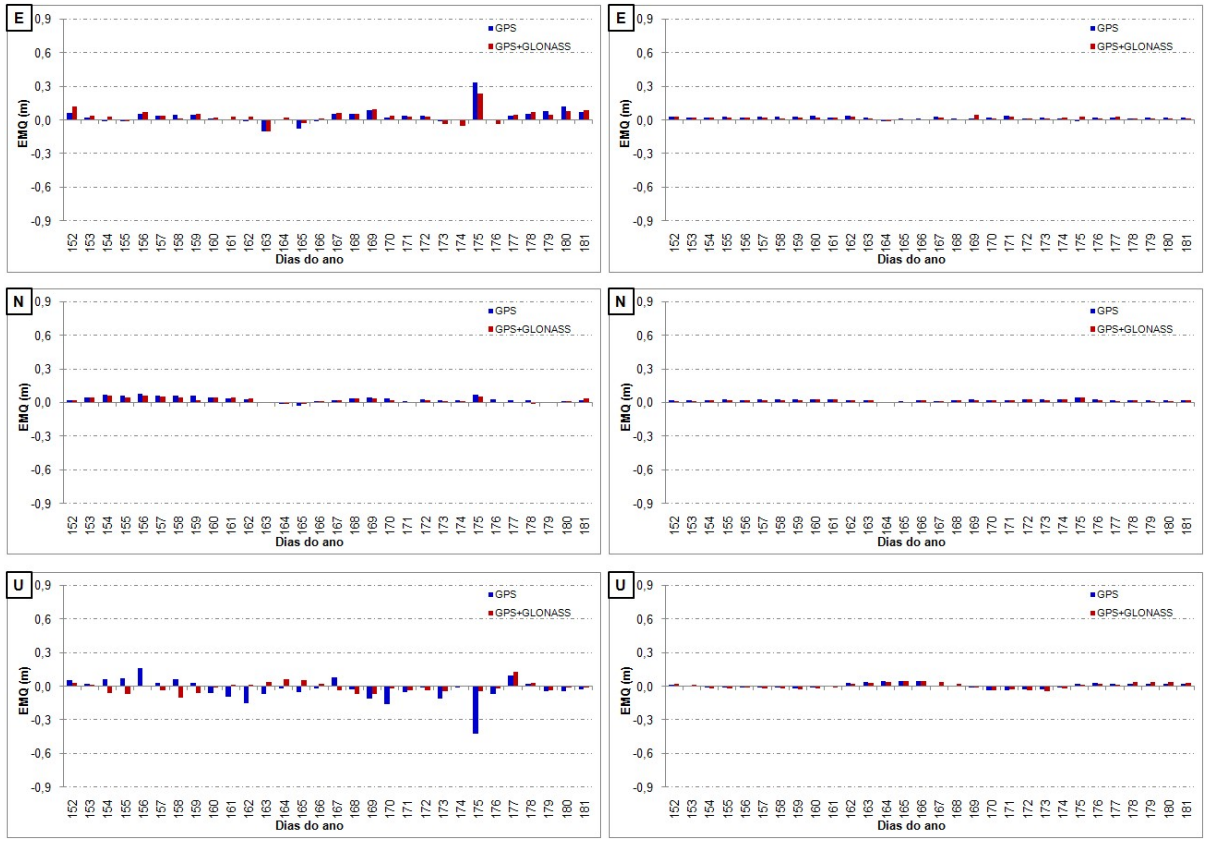


Figura D.3 – Estação CEFT, outubro, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

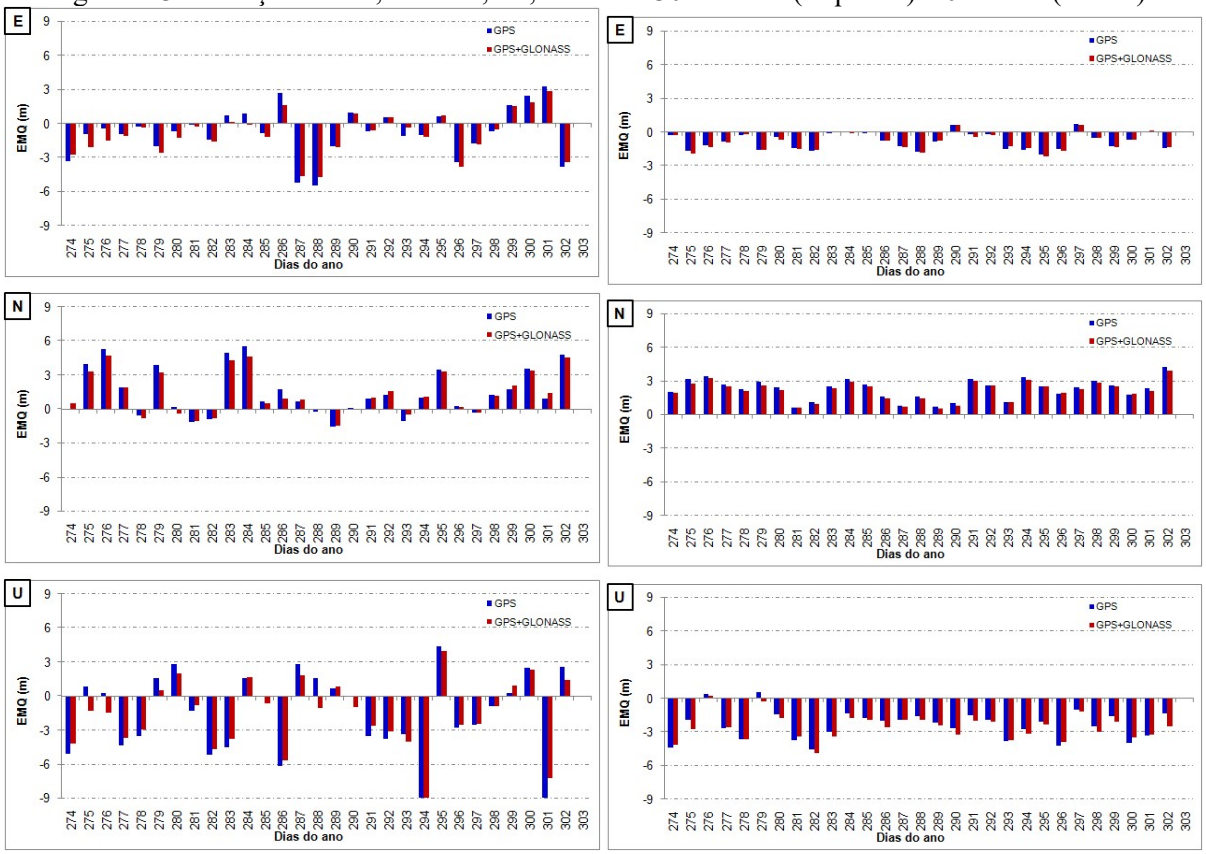


Figura D.4 – Estação CEFT, outubro, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

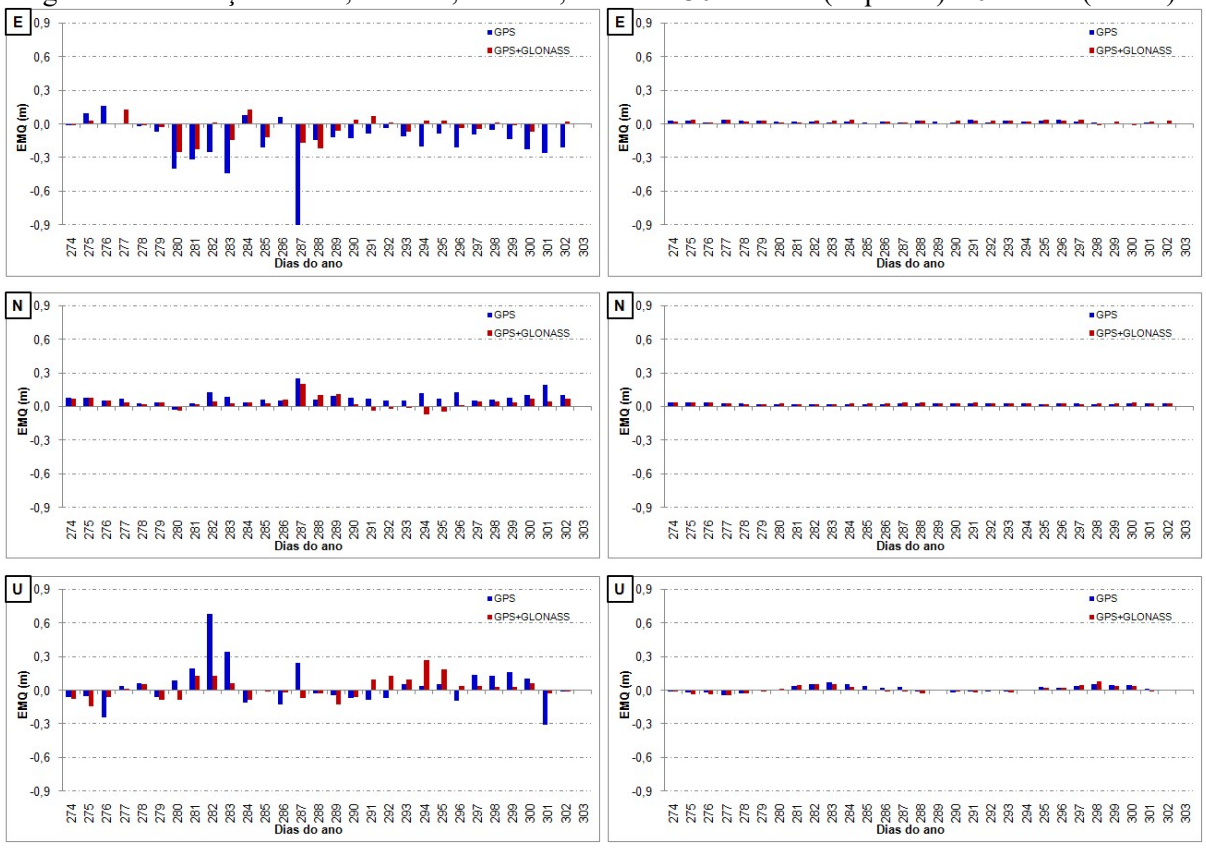


Figura D.5 – Estação PPTE, junho, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

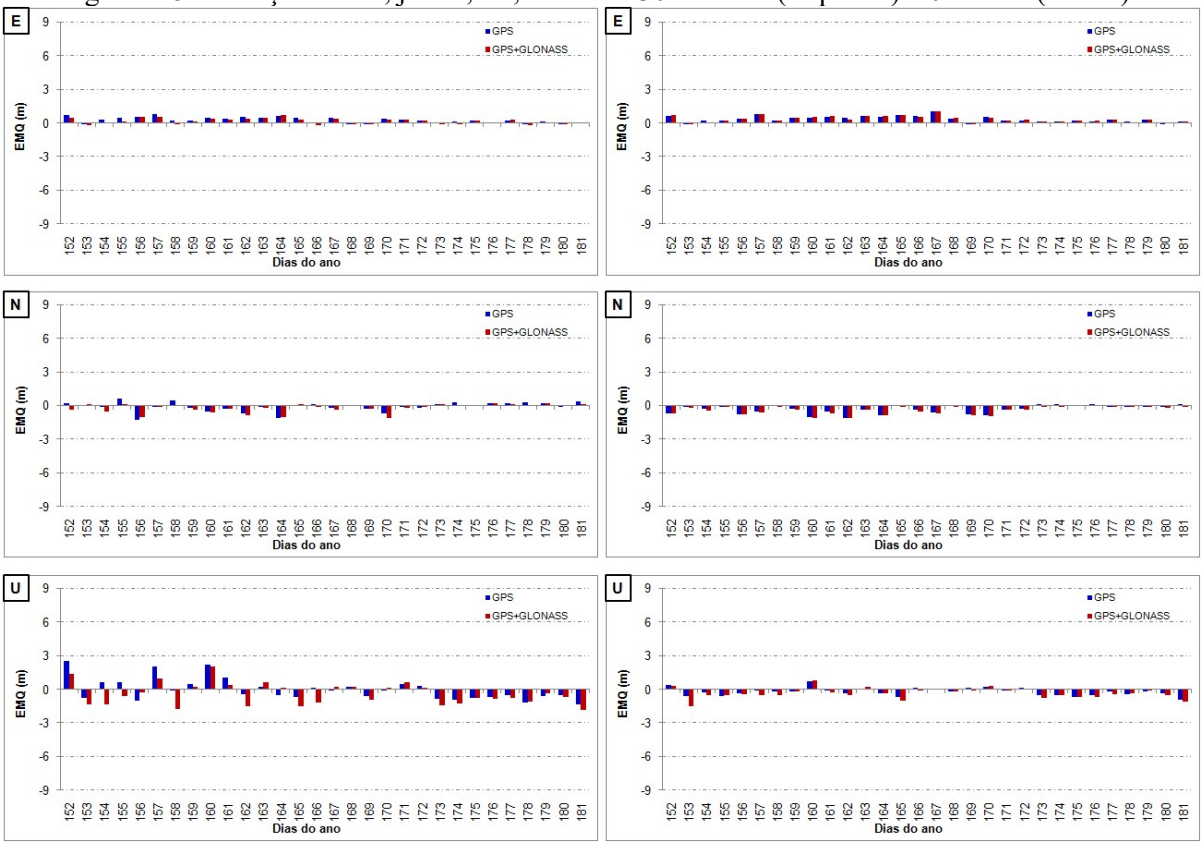


Figura D.6 – Estação PPTE, junho, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

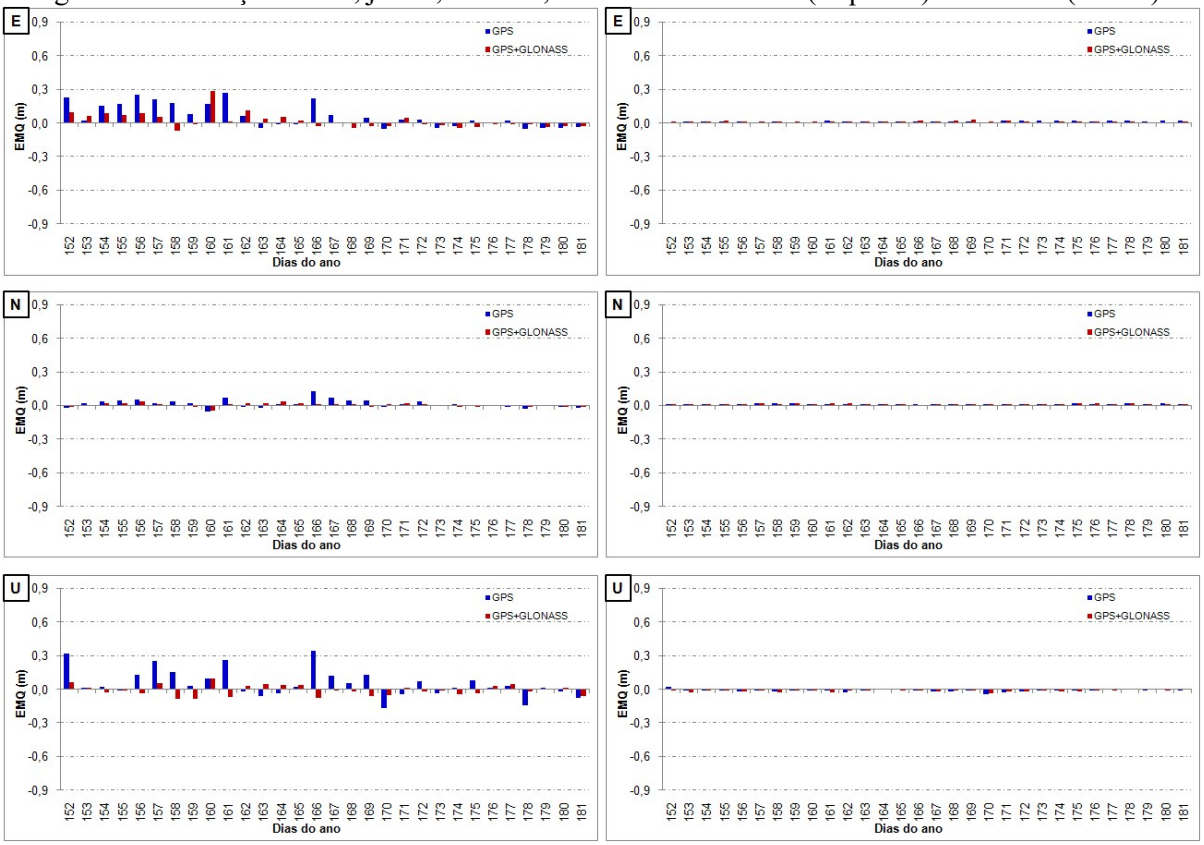


Figura D.7 – Estação PPTE, outubro, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

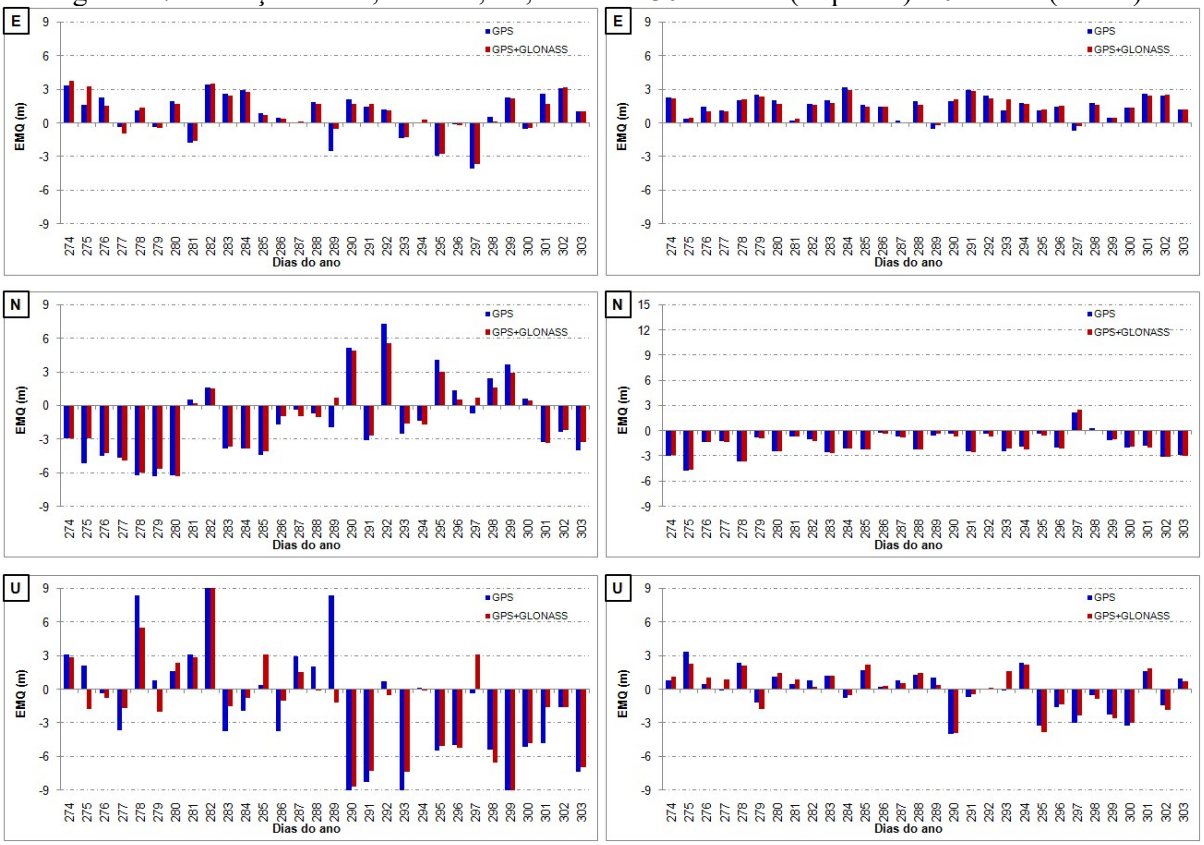


Figura D.8 – Estação PPTE, outubro, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

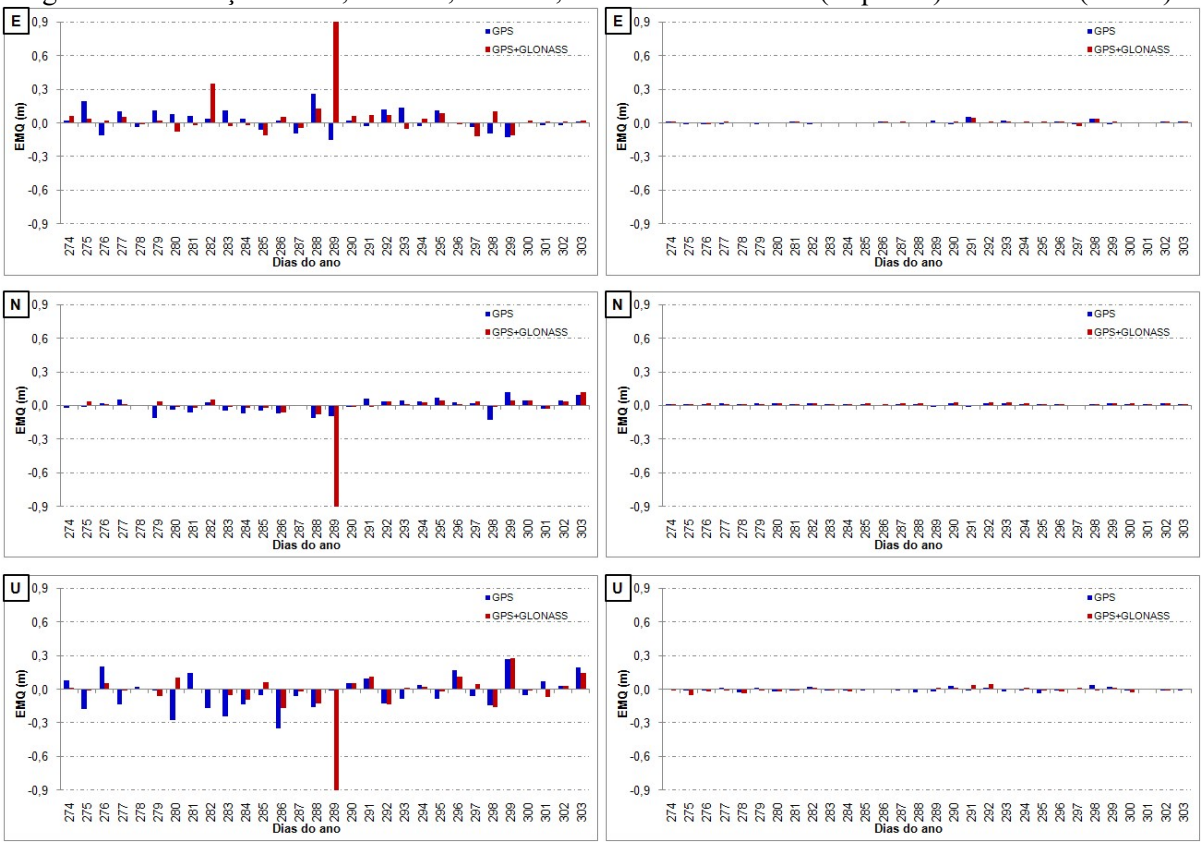


Figura D.9 – Estação POAL, junho, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

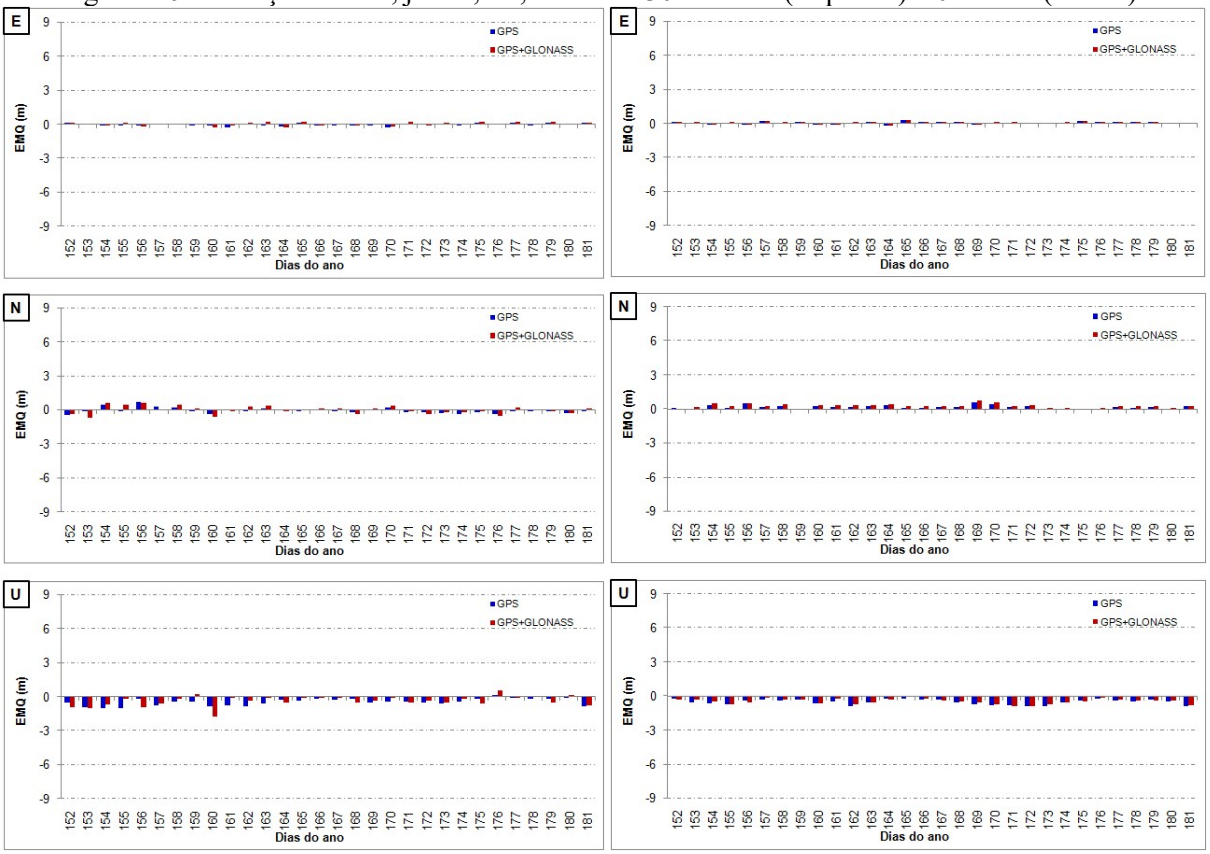


Figura D.10 – Estação POAL, junho, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

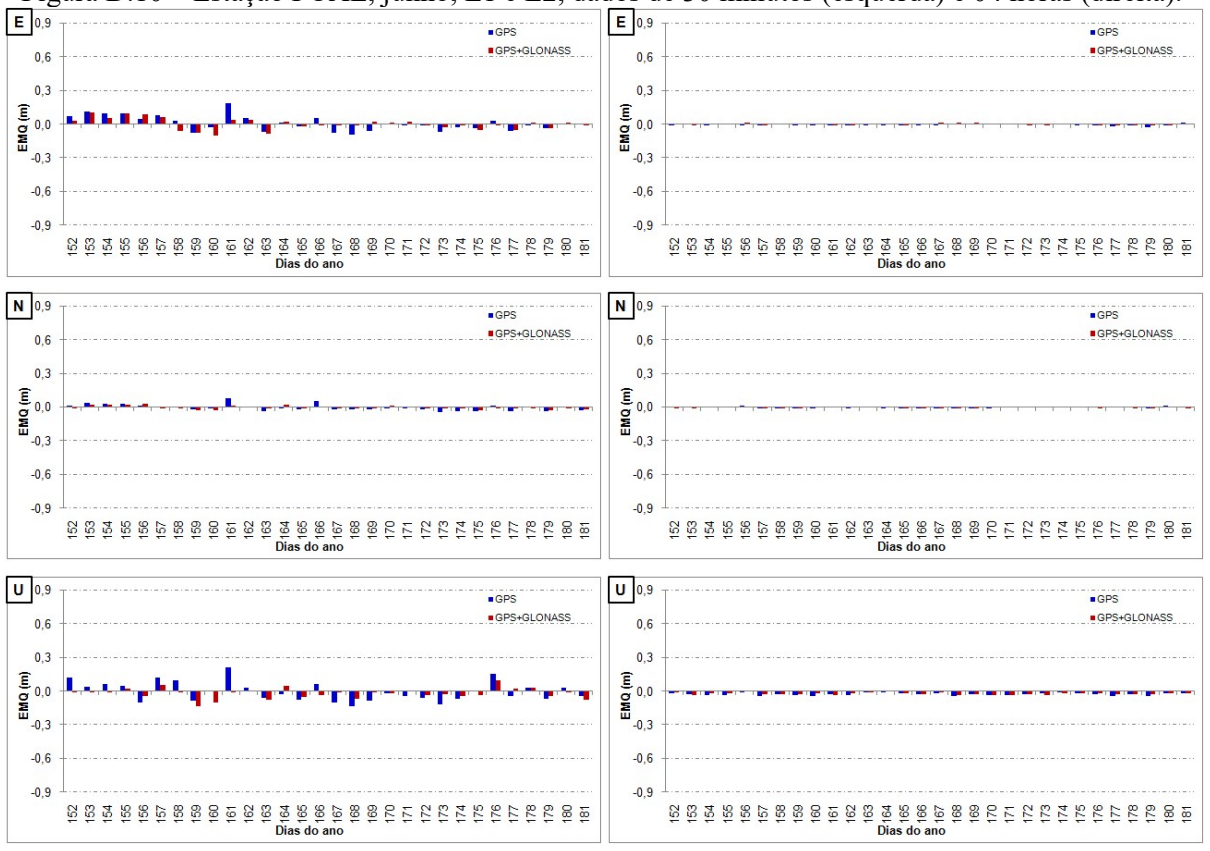


Figura D.11 – Estação POAL, outubro, L1, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

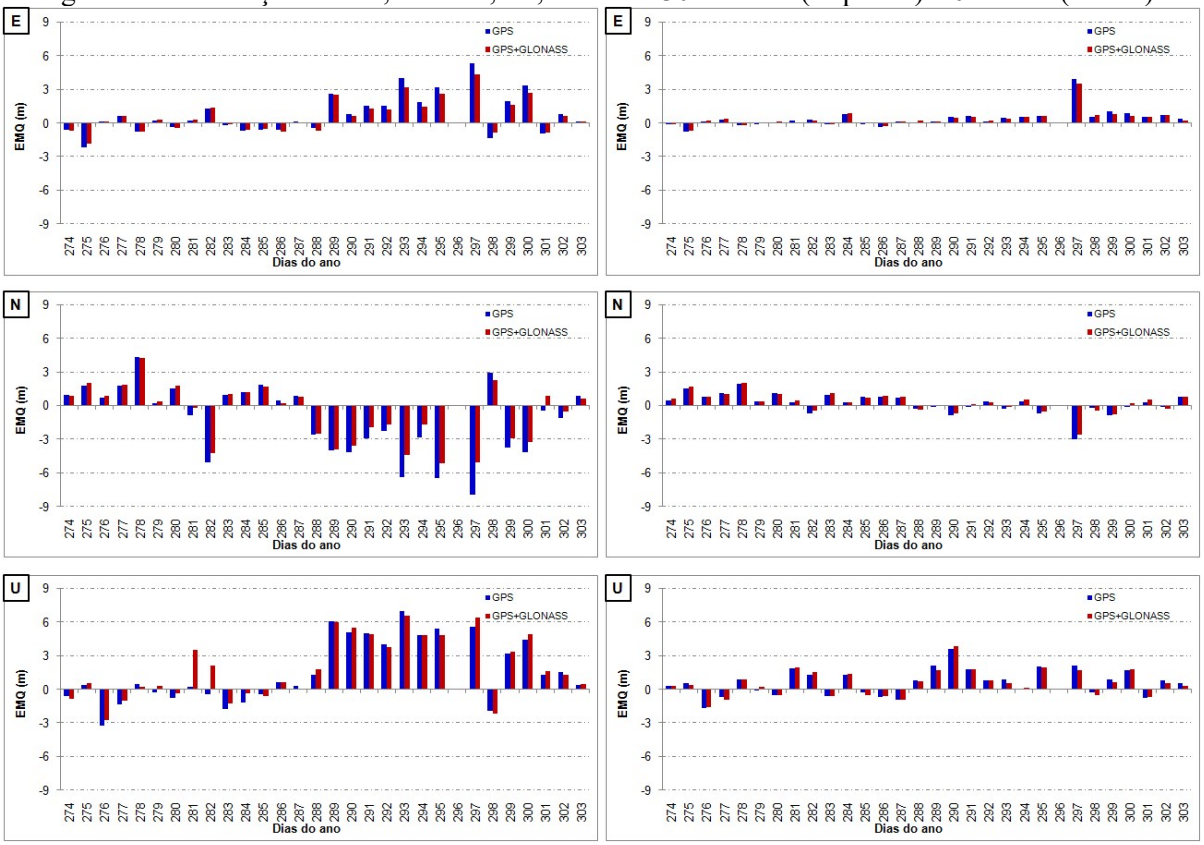
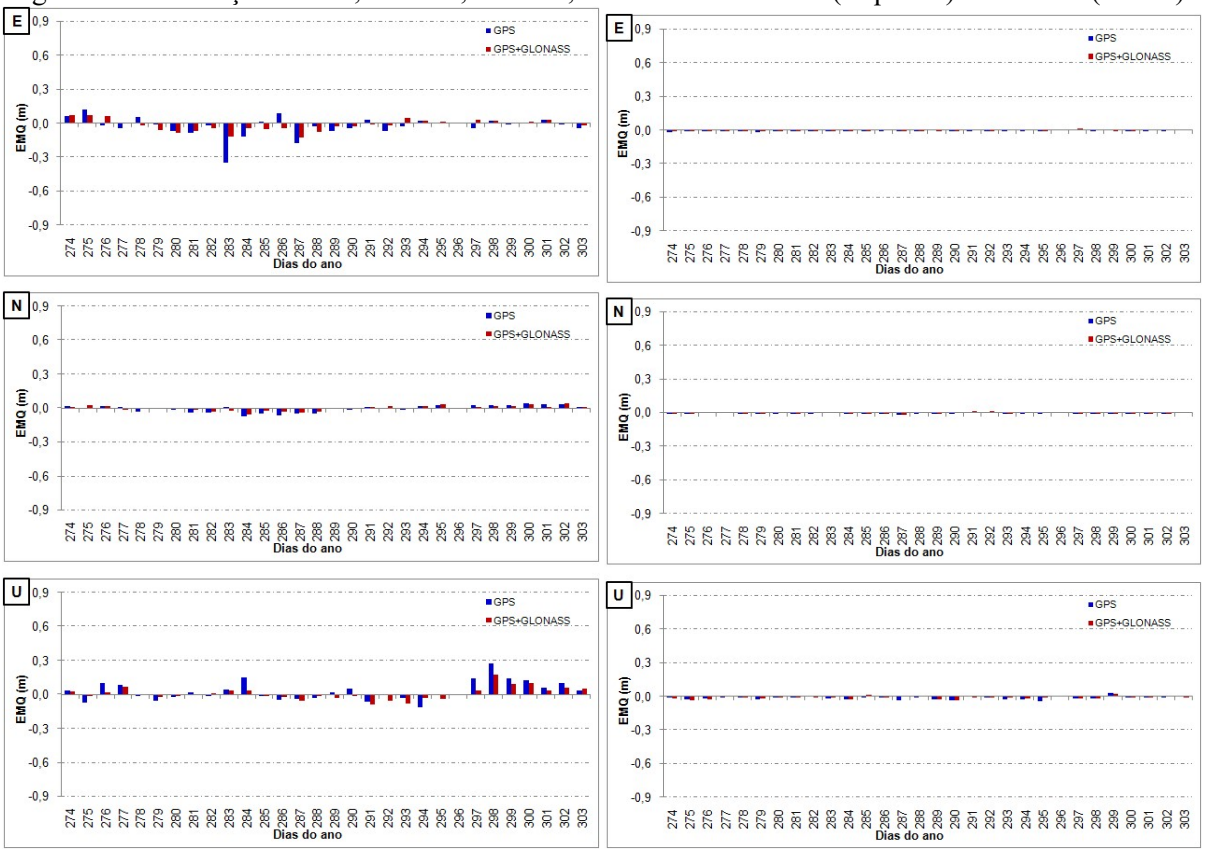


Figura D.12 – Estação POAL, outubro, L1 e L2, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).



APÊNDICE E – PROBLEMAS PROCESSAMENTO RELATIVO

Tabela E.1 – Configurações sem processamento.

Configuração			Problema
Estação	**Dia**	**Intervalo de tempo de dados**	
PBCG	154	30 minutos/04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	155	30 minutos/04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	176	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	180	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	181	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	301	30 minutos	Falha na coleta da estação RNMO
	302	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
	303	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação RNMO
SPDR	163	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação ILHA
	164	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação ILHA
	275	30 minutos	Falha na coleta da estação SJRP
	275	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação ILHA
	300	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação ILHA
SCLA	275	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação IMBT
	276	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação IMBT
	296	30 minutos / 04 horas	Falha na coleta da estação POAL

APÊNDICE F – RESULTADOS RELATIVO EM SGL

Figura F.1 – Estação PBCG, junho, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

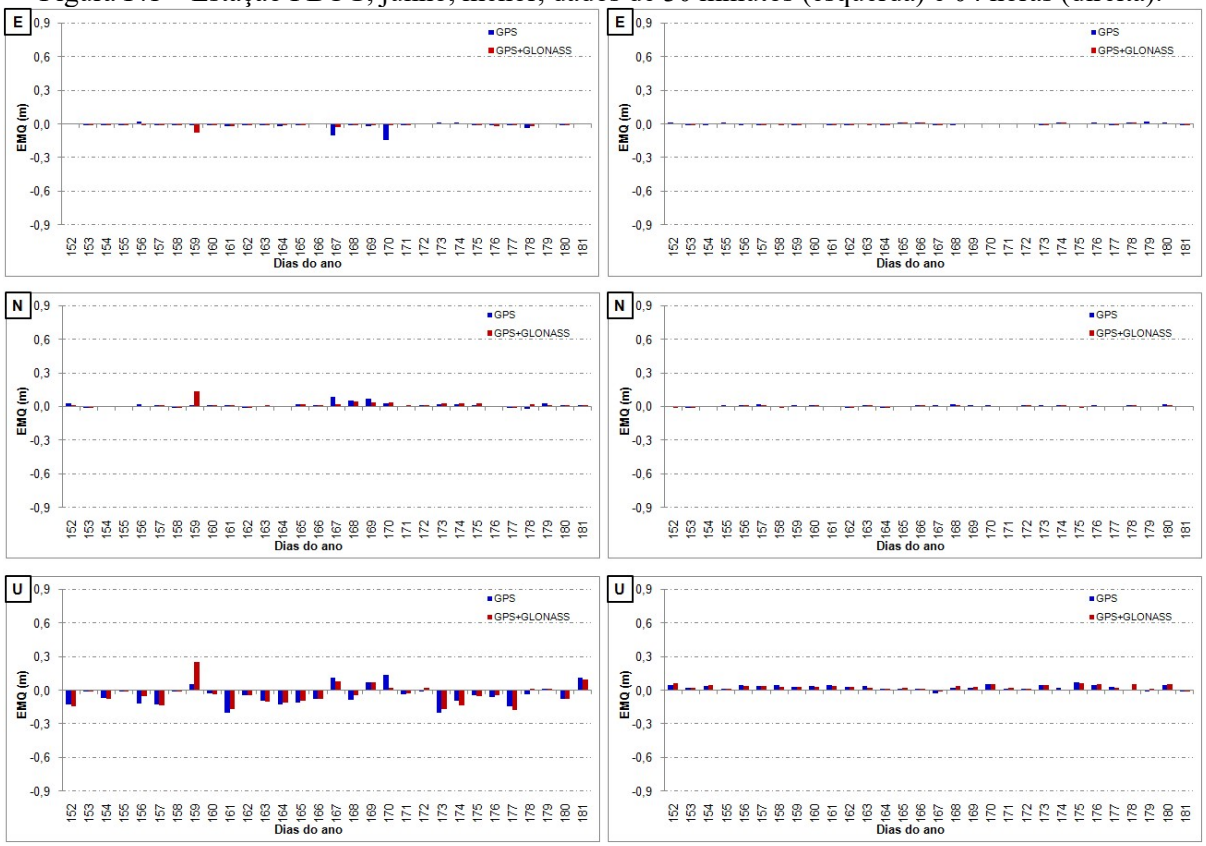


Figura F.2 – Estação PBCG, junho, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

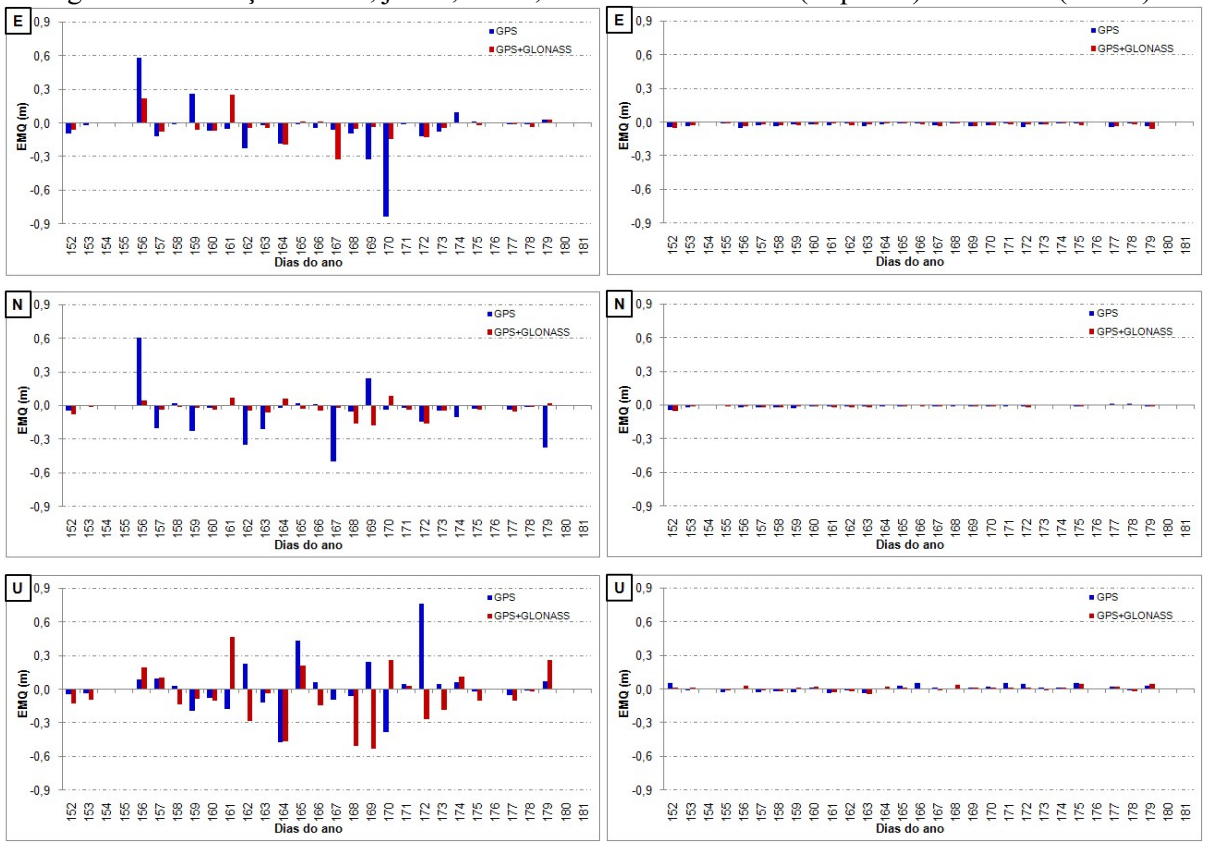


Figura F.3 – Estação PBCG, outubro, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

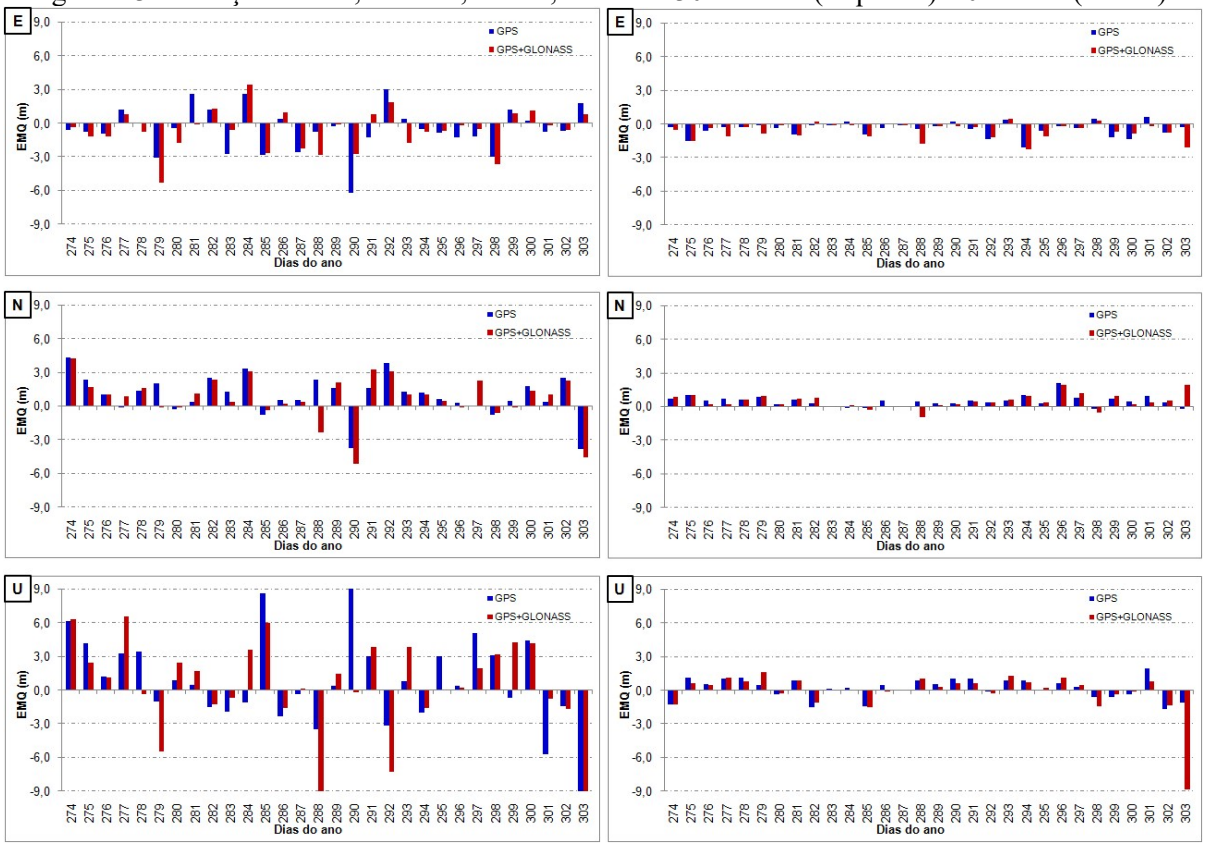


Figura F.4 – Estação PBCG, outubro, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

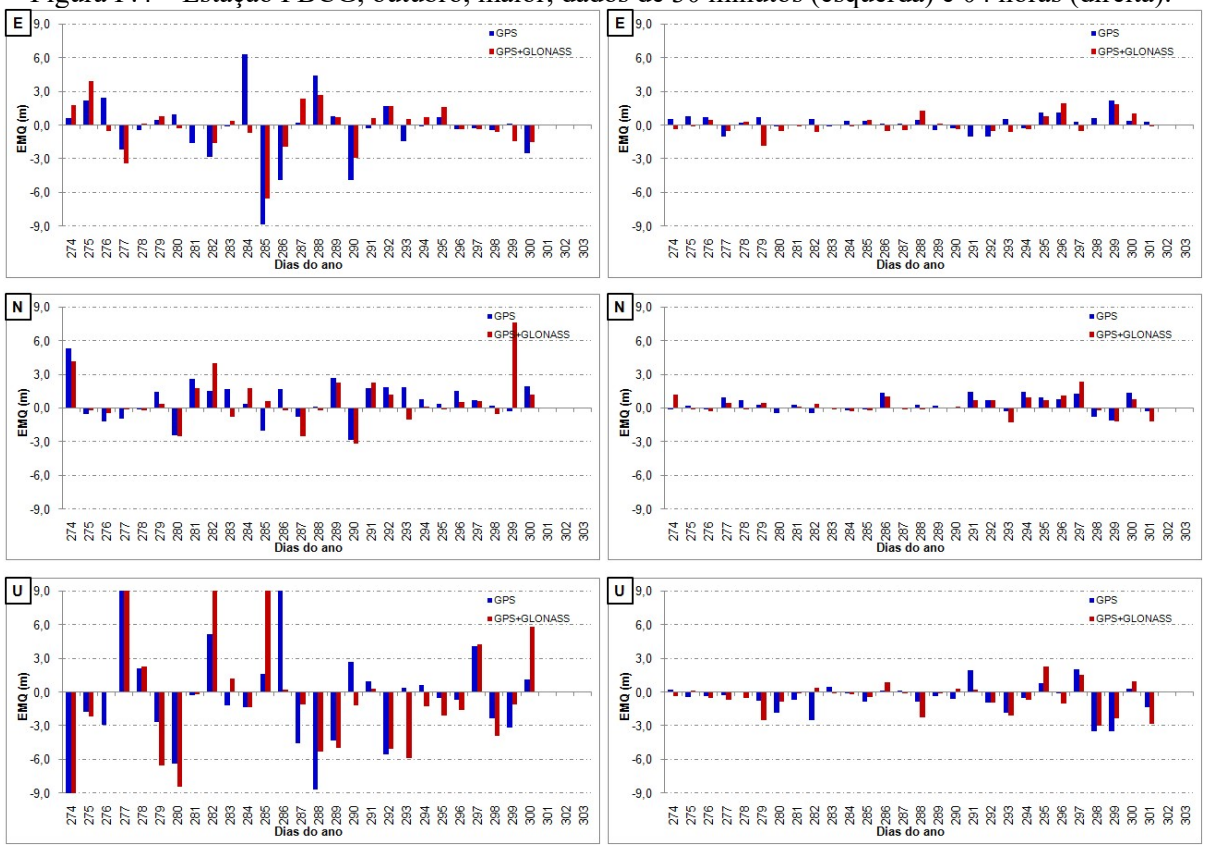


Figura F.5 – Estação SPDR, junho, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

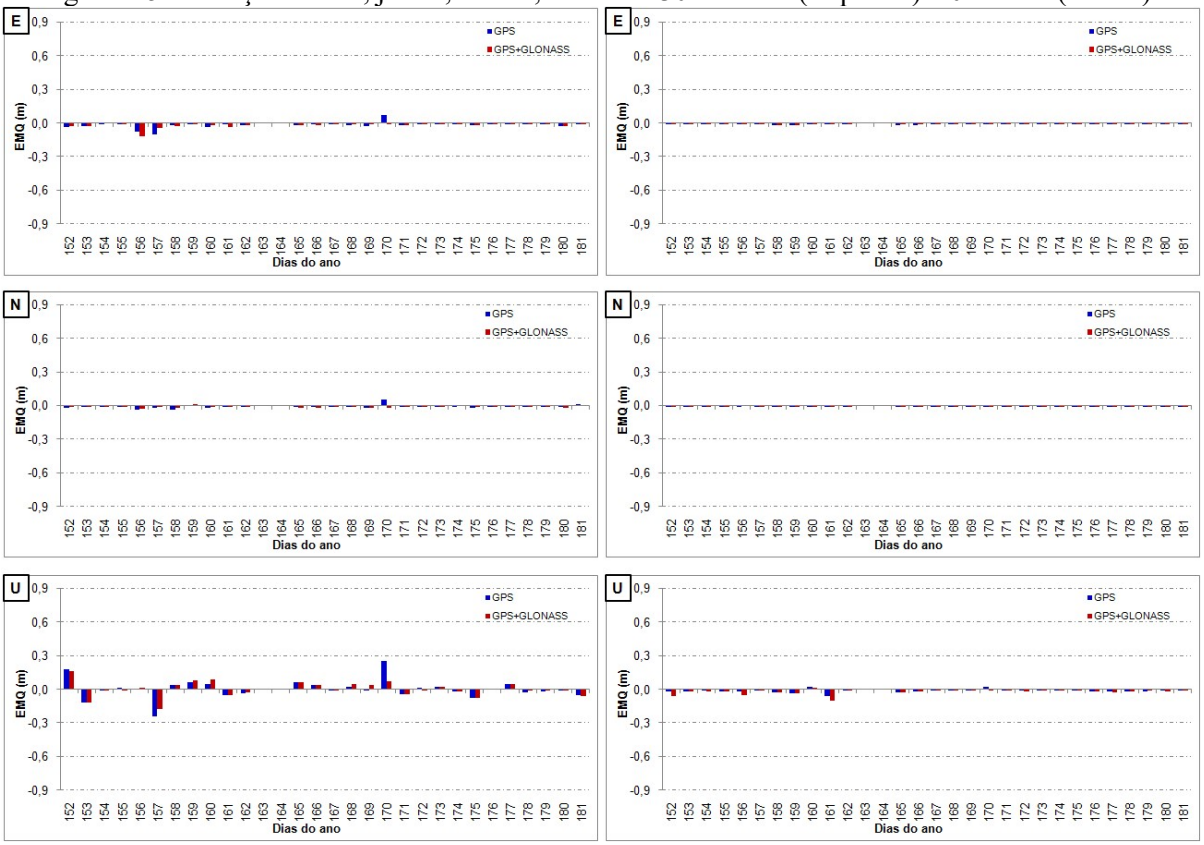


Figura F.6 – Estação SPDR, junho, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

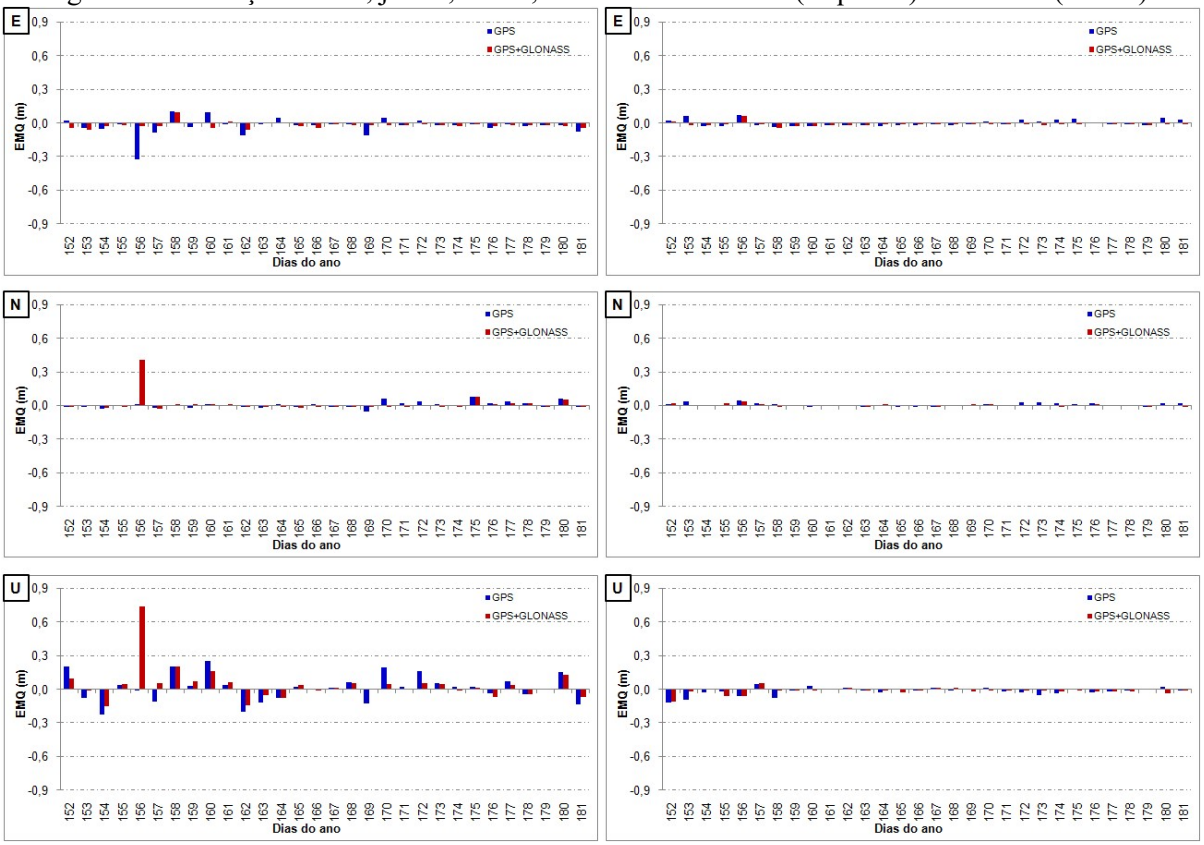


Figura F.7 – Estação SPDR, outubro, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

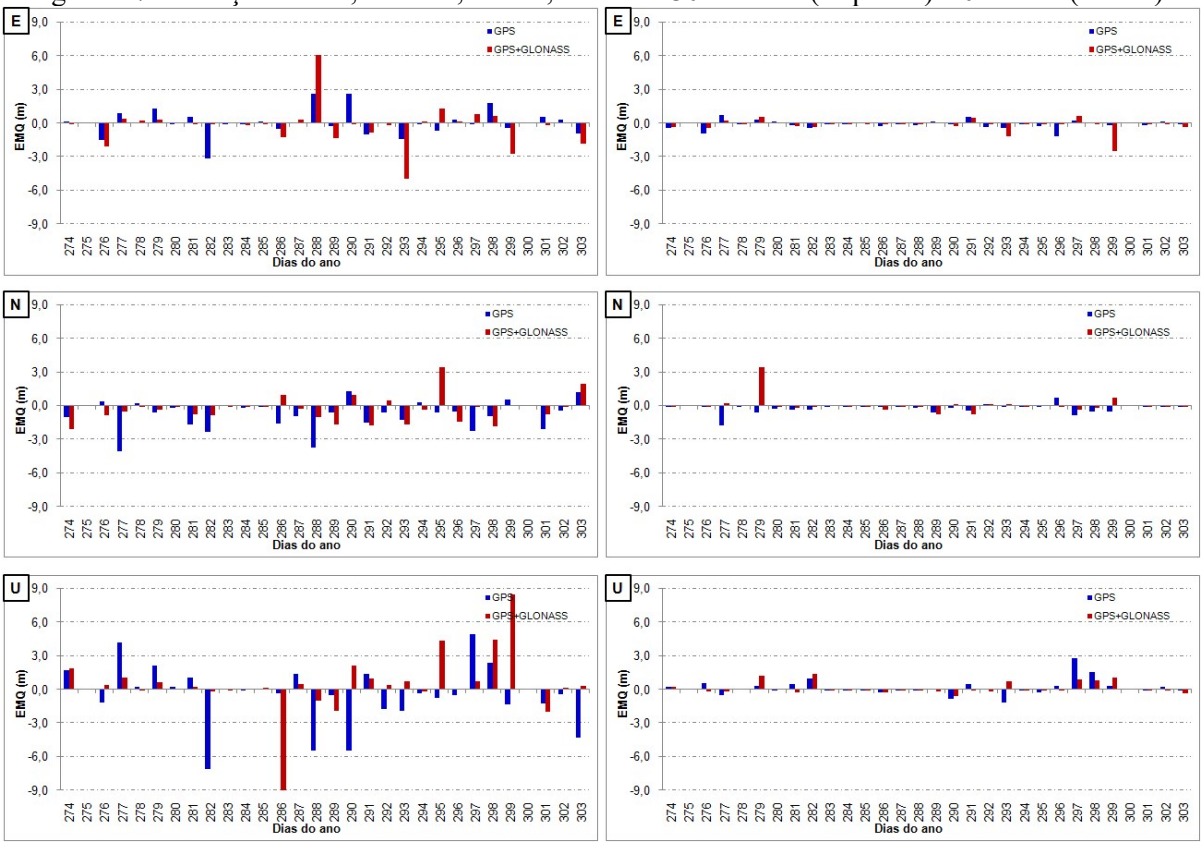


Figura F.8 – Estação SPDR, outubro, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

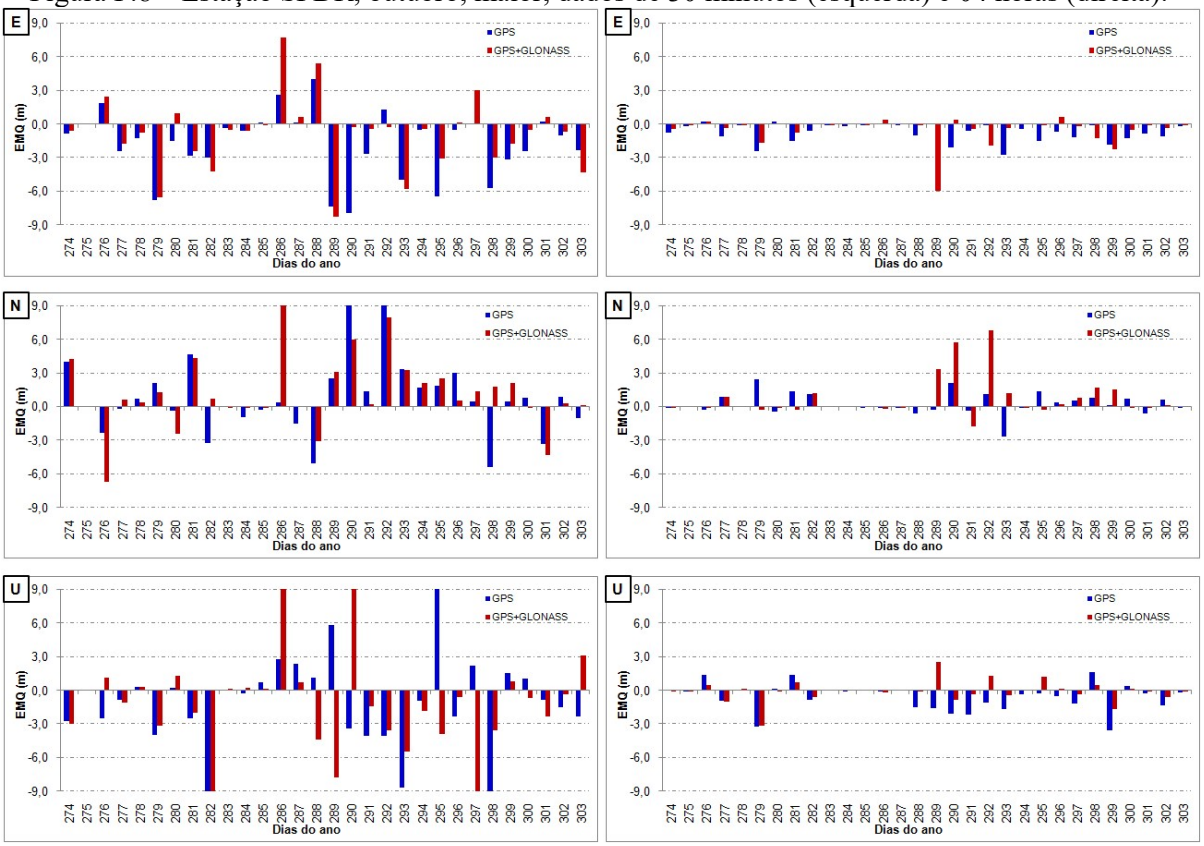


Figura F.9 – Estação SCLA, junho, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

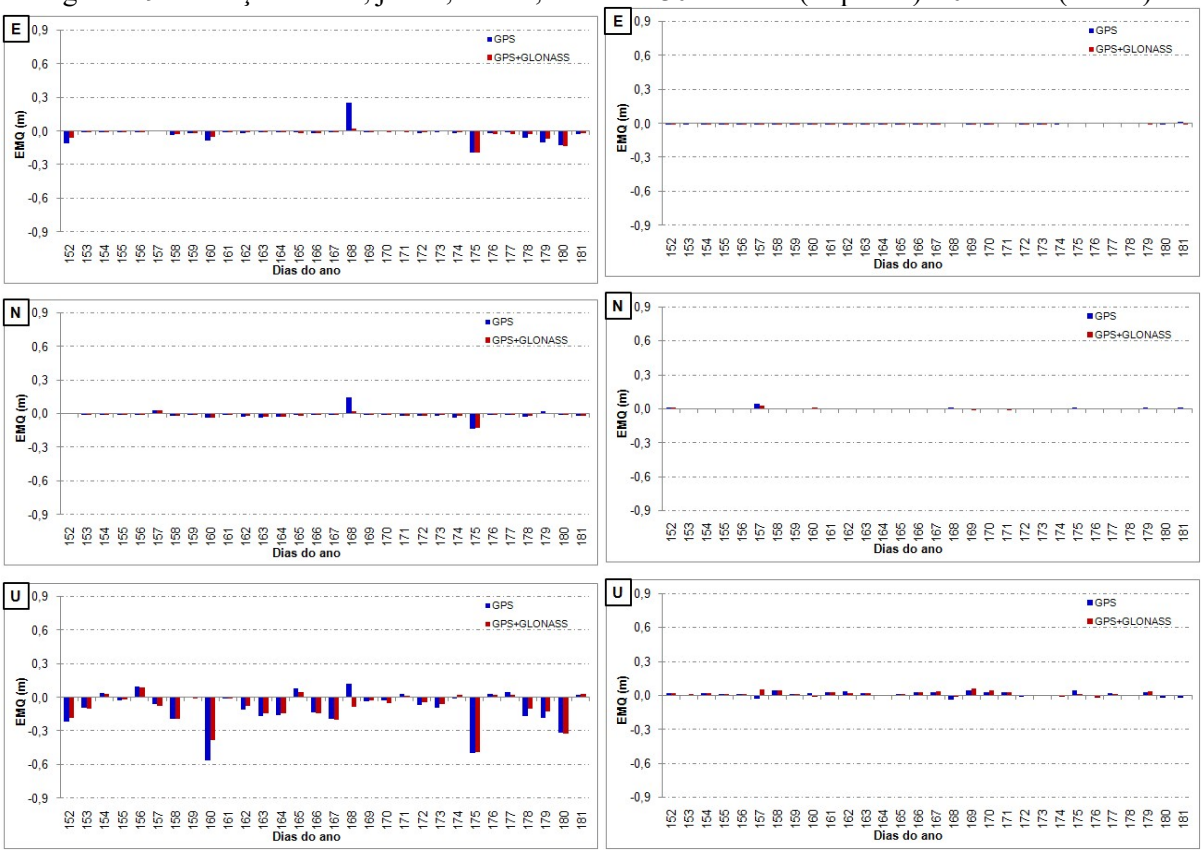


Figura F.10 – Estação SCLA, junho, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

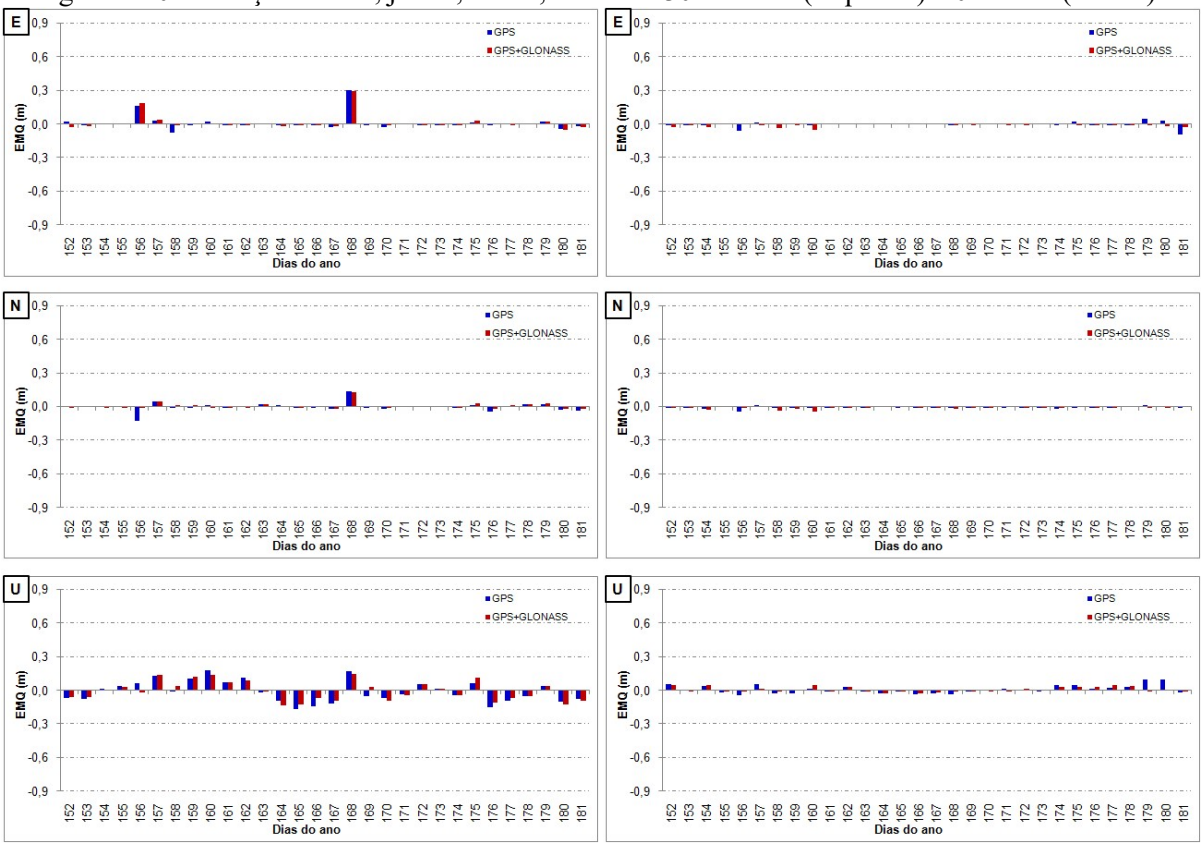


Figura F.11 – Estação SCLA, outubro, menor, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).

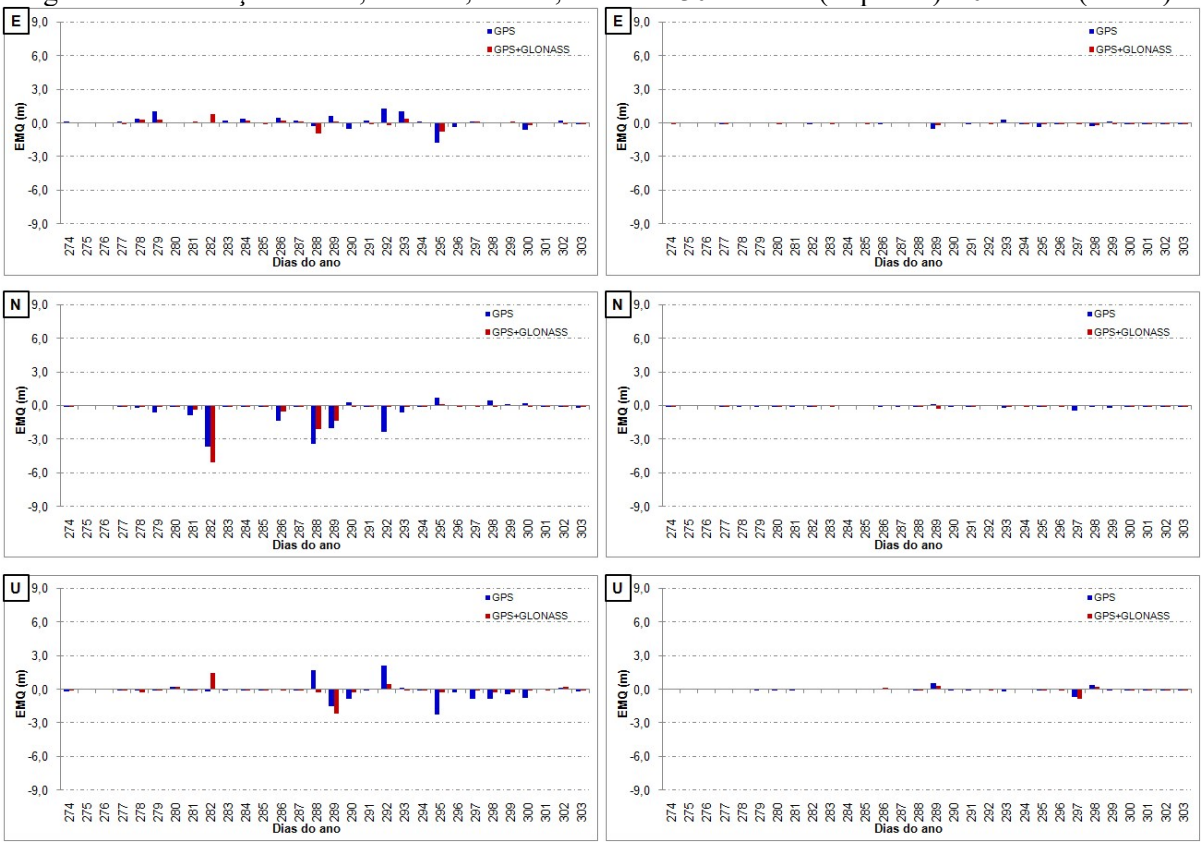
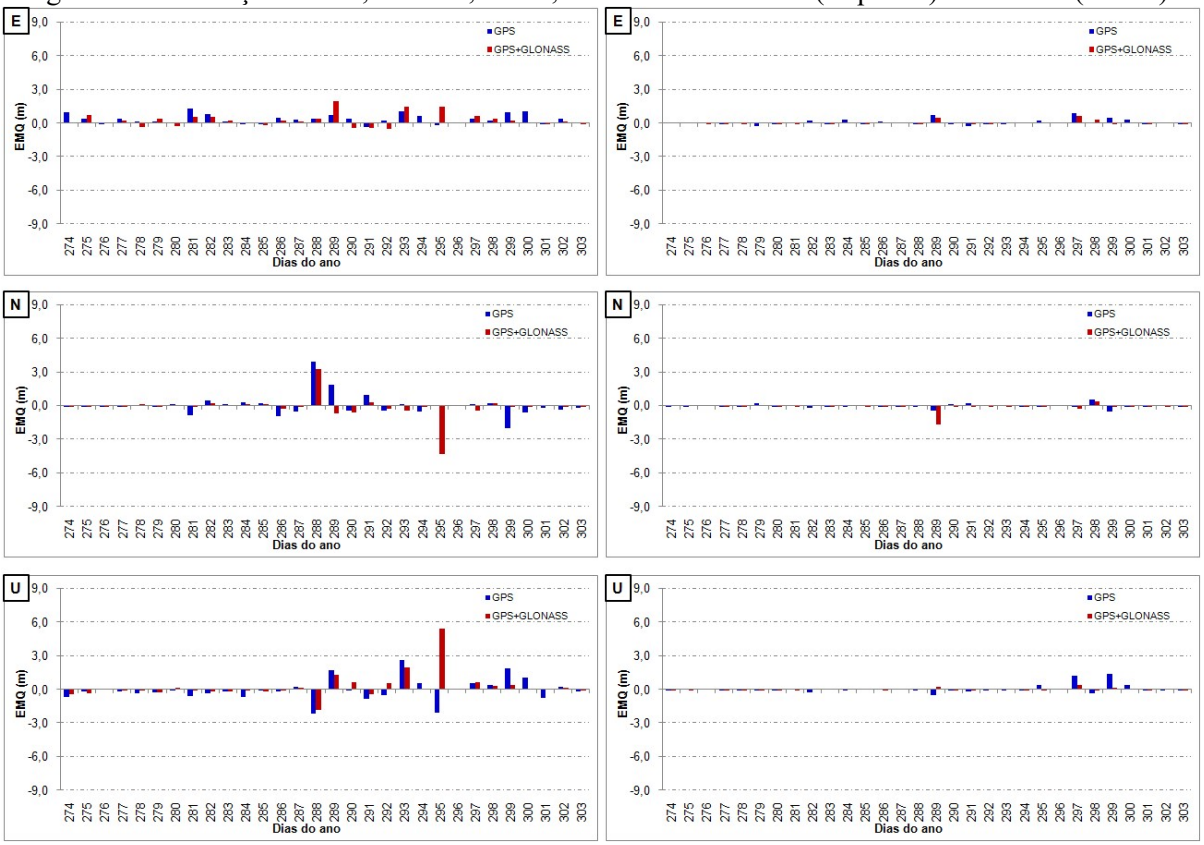


Figura F.12 – Estação SCLA, outubro, maior, dados de 30 minutos (esquerda) e 04 horas (direita).



APÊNDICE G – ADAPTAÇÃO DO SISTEMA VRS-UNESP

Na versão original do programa os arquivos RINEX das estações base precisavam ser editados para possuírem apenas dados GPS. Na Figura G.1 é apresentado o trecho de um arquivo de saída da versão original da VRS-UNESP, gerada a partir de um arquivo editado para conter apenas dados GPS.

Figura G.1 – Dados gerados com a versão original e dados entrada editados.

```
     2.10           OBSERVATION DATA    G (GPS)             RINEX VERSION / TYPE
REDESGPS 1.00 001   FCT/UNESP            1JUN2015  0: 0: 0  PGM / RUN BY / DATE
Virtual Reference Station                                   MARKER NAME
Dani&Luiz           FCT/UNESP                               OBSERVER / AGENCY
4906K34395          TRIMBLE NETR8       4.87                REC # / TYPE / VERS
4938353436          TRM59800.00     NONE                    ANT # / TYPE
  3902211.6165 -4400160.6438 -2461983.4713                  APPROX POSITION XYZ
        0.0000         0.0000         0.0000                ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     4    L1    C1    L2    P2                             # / TYPES OF OBSERV
        15                                                  INTERVAL
  2015     6     1     0     0    0.0000000     GPS         TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER
 15  6  1  0  0  0.0000000  0 10  3  5  6  7  9 10 19 23 28 30
 132028712.056    25124210.486   102879706.098    25124220.549
 128522312.049    24456991.442   100147300.062    24456997.305
 131177259.180    24962230.394   102216189.002    24962240.629
 111581890.564    21233269.358    86946938.353    21233274.600
 111171673.508    21155230.081    86627419.983    21155237.260
 109599779.043    20856145.873    85402488.701    20856151.495
 130417419.674    24817627.567   101624068.986    24817630.348
 122005144.321    23216778.260    95069077.315    23216781.334
 114011078.729    21695562.385    88839865.506    21695567.318
 111921312.723    21297893.597    87211536.293    21297901.207
```

Caso um arquivo completo fosse utilizado como entrada para o programa, o mesmo não identificaria qual informação era GPS, utilizando todos os dados da mesma maneira. Isso geraria um arquivo de saída como o apresentado na Figura G.2, nela é possível ver valores de PRN repetidos, que correspondem a satélites de constelações diferentes.

Figura G.2 – Dados gerados com a versão original e dados de entrada completos.

```
     2.10           OBSERVATION DATA    G (GPS)             RINEX VERSION / TYPE
REDESGPS 1.00 001   FCT/UNESP            1JUN2015  0: 0: 0  PGM / RUN BY / DATE
Virtual Reference Station                                   MARKER NAME
Dani&Luiz           FCT/UNESP                               OBSERVER / AGENCY
4906K34395          TRIMBLE NETR8       4.87                REC # / TYPE / VERS
4938353436          TRM59800.00     NONE                    ANT # / TYPE
  3902211.6165 -4400160.6438 -2461983.4713                  APPROX POSITION XYZ
        0.0000         0.0000         0.0000                ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     4    L1    C1    L2    P2                             # / TYPES OF OBSERV
        15                                                  INTERVAL
  2015     6     1     0     0    0.0000000     GPS         TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER
 15  6  1  0  0  0.0000000  0 13  3  5  6  7  7  9  9 10 10 19 23 28
                                 30
 132028712.074    25124210.490   102879706.112    25124220.553
 128522312.023    24456991.437   100147300.041    24456997.300
 131177259.283    24962230.413   102216189.082    24962240.648
 112141523.952    20948904.050    87221249.938    20948907.987
 111581890.709    21233269.386    86946938.465    21233274.628
 111171673.612    21155230.101    86627420.064    21155237.280
 130528666.988    24444491.812   101522494.671    24444495.269
 111883311.608    20988380.749    87020155.342    20988386.991
 109599779.086    20856145.881    85402488.734    20856151.503
 130417419.612    24817627.555   101624068.937    24817630.336
 122005144.353    23216778.266    95069077.340    23216781.340
 114011078.699    21695562.380    88839865.483    21695567.313
 111921312.821    21297893.616    87211536.369    21297901.226
```

Com as modificações realizadas no programa os arquivos de entrada não precisam mais ser editados, independente do tipo de dados selecionados para a geração da VRS. A seguir são apresentados exemplos de arquivos de saída das três opções de dados de

origem disponíveis, GPS (Figura G.3), GLONASS (Figura G.4) e GPS/GLONASS (Figura G.5).

Figura G.3 – VRS com dados GPS gerada na nova versão da VRS-UNESP.

```
     2.10           OBSERVATION DATA    G (GPS)             RINEX VERSION / TYPE
REDESGPS 1.00 001   FCT/UNESP            1JUN2015  0: 0: 0  PGM / RUN BY / DATE
Virtual Reference Station                                    MARKER NAME
Dani&Luiz           FCT/UNESP                                OBSERVER / AGENCY
4906K34395          TRIMBLE NETR8       4.87                 REC # / TYPE / VERS
4938353436          TRM59800.00     NONE                     ANT # / TYPE
  3902211.6165 -4400160.6438 -2461983.4713                   APPROX POSITION XYZ
        0.0000        0.0000        0.0000                   ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                 WAVELENGTH FACT L1/2
     4    L1    C1    L2    P2                               # / TYPES OF OBSERV
    15                                                       INTERVAL
  2015     6     1     0     0    0.0000000     GPS          TIME OF FIRST OBS
                                                             END OF HEADER
 15  6  1  0  0  0.0000000  0 10G03G05G06G07G09G10G19G23G28G30
 132028712.056    25124210.486   102879706.098    25124220.549
 128522312.049    24456991.442   100147300.062    24456997.305
 131177259.180    24962230.394   102216189.002    24962240.629
 111581890.564    21233269.358    86946938.353    21233274.600
 111171673.508    21155230.081    86627419.983    21155237.260
 109599779.043    20856145.873    85402488.701    20856151.495
 130417419.674    24817627.567   101624068.986    24817630.348
 122005144.321    23216778.260    95069077.315    23216781.334
 114011078.729    21695562.385    88839865.506    21695567.318
 111921312.723    21297893.597    87211536.293    21297901.207
```

Figura G.4 – VRS com dados GLONASS gerada na nova versão da VRS-UNESP.

```
     2.10           OBSERVATION DATA    R (GLONASS)         RINEX VERSION / TYPE
REDESGPS 1.00 001   FCT/UNESP            1JUN2015  0: 0: 0  PGM / RUN BY / DATE
Virtual Reference Station                                    MARKER NAME
Dani&Luiz           FCT/UNESP                                OBSERVER / AGENCY
4906K34395          TRIMBLE NETR8       4.87                 REC # / TYPE / VERS
4938353436          TRM59800.00     NONE                     ANT # / TYPE
  3902211.6165 -4400160.6438 -2461983.4713                   APPROX POSITION XYZ
        0.0000        0.0000        0.0000                   ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                 WAVELENGTH FACT L1/2
     4    L1    C1    L2    P2                               # / TYPES OF OBSERV
    15                                                       INTERVAL
  2015     6     1     0     0    0.0000000     GPS          TIME OF FIRST OBS
                                                             END OF HEADER
 15  6  1  0  0  0.0000000  0  6R01R07R08R10R11R12
 117508129.668    21982372.706    91395438.546    21982378.394
 112353609.245    20988576.647    87386227.227    20988580.584
 102554779.468    19151383.458    79764875.374    19151387.021
 112074720.422    21024900.885    87169356.580    21024907.127
 109919478.124    20569908.027    85493038.893    20569912.667
 126402779.468    23662858.354    98313345.629    23662865.170
```

Figura G.5 – VRS com dados GPS e GLONASS gerada na nova versão da VRS-UNESP.

```
     2.10           OBSERVATION DATA    M (MIXED)           RINEX VERSION / TYPE
REDESGPS 1.00 001   FCT/UNESP            1JUN2015  0: 0: 0  PGM / RUN BY / DATE
Virtual Reference Station                                    MARKER NAME
Dani&Luiz           FCT/UNESP                                OBSERVER / AGENCY
4906K34395          TRIMBLE NETR8       4.87                 REC # / TYPE / VERS
4938353436          TRM59800.00     NONE                     ANT # / TYPE
  3902211.6165 -4400160.6438 -2461983.4713                   APPROX POSITION XYZ
        0.0000        0.0000        0.0000                   ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                 WAVELENGTH FACT L1/2
     4    L1    C1    L2    P2                               # / TYPES OF OBSERV
    15                                                       INTERVAL
  2015     6     1     0     0    0.0000000     GPS          TIME OF FIRST OBS
                                                             END OF HEADER
 15  6  1  0  0  0.0000000  0 16G03G05G06G07G09G10G19G23G28G30R01R07
                             R08R10R11R12
 132028712.056    25124210.486   102879706.098    25124220.549
 128522312.049    24456991.442   100147300.062    24456997.305
 131177259.180    24962230.394   102216189.002    24962240.629
 111581890.564    21233269.358    86946938.353    21233274.600
 111171673.508    21155230.081    86627419.983    21155237.260
 109599779.043    20856145.873    85402488.701    20856151.495
 130417419.674    24817627.567   101624068.986    24817630.348
 122005144.321    23216778.260    95069077.315    23216781.334
 114011078.729    21695562.385    88839865.506    21695567.318
 111921312.723    21297893.597    87211536.293    21297901.207
 117508129.668    21982372.706    91395438.546    21982378.394
 112353609.245    20988576.647    87386227.227    20988580.584
 102554779.468    19151383.458    79764875.374    19151387.021
 112074720.422    21024900.885    87169356.580    21024907.127
 109919478.124    20569908.027    85493038.893    20569912.667
 126402779.468    23662858.354    98313345.629    23662865.170
```

APÊNDICE H – RESULTADOS PPP COM VRS E RBMC EM SGL

Figura H.01 – Estação PBJP, mês de junho, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).

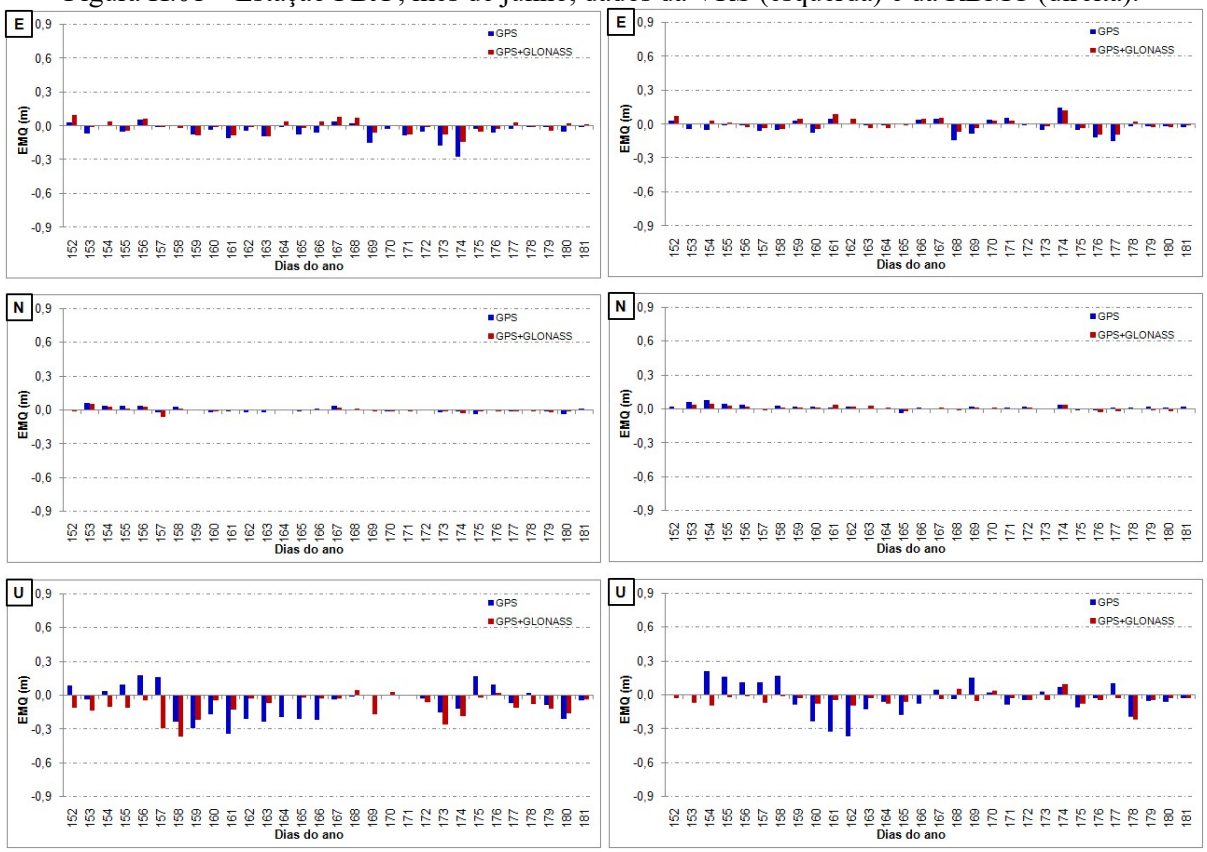


Figura H.02 – Estação PBJP, mês de outubro, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).

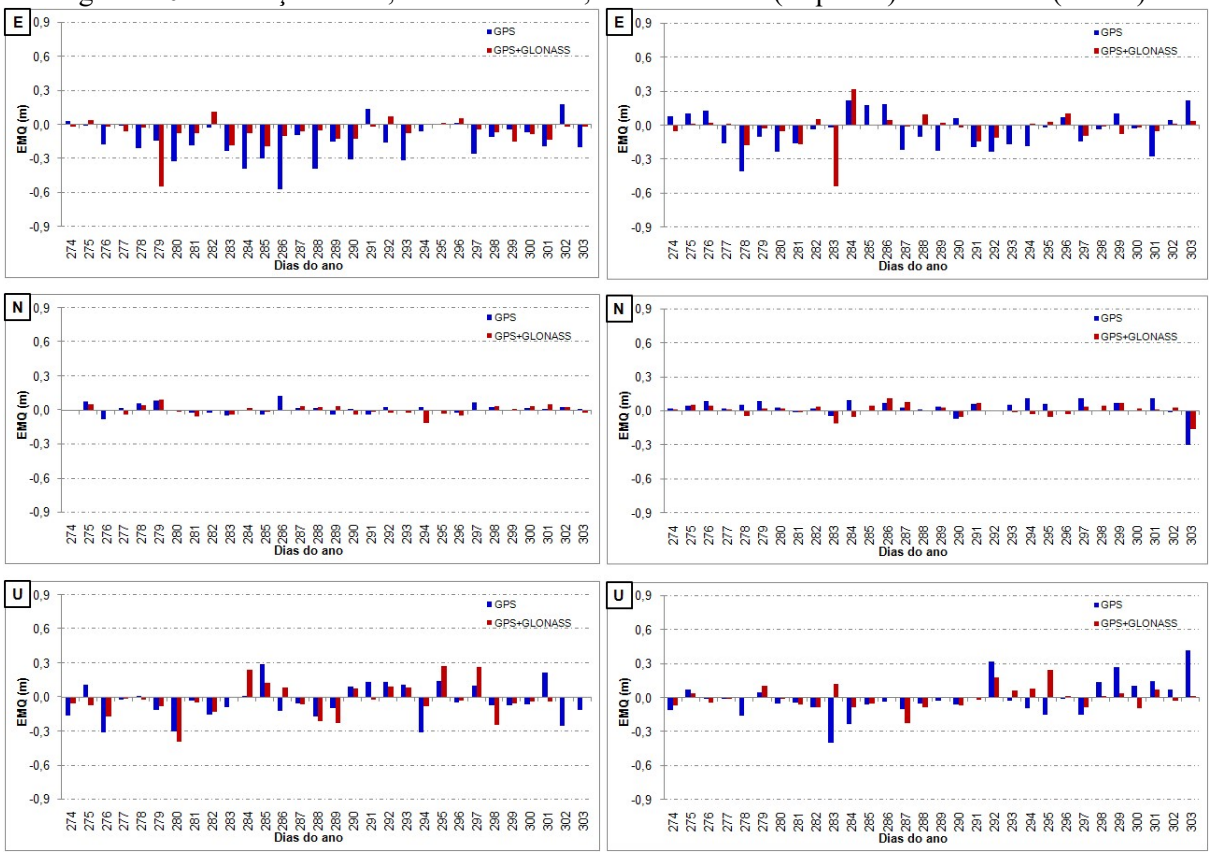


Figura H.03 – Estação SPDR, mês de junho, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).

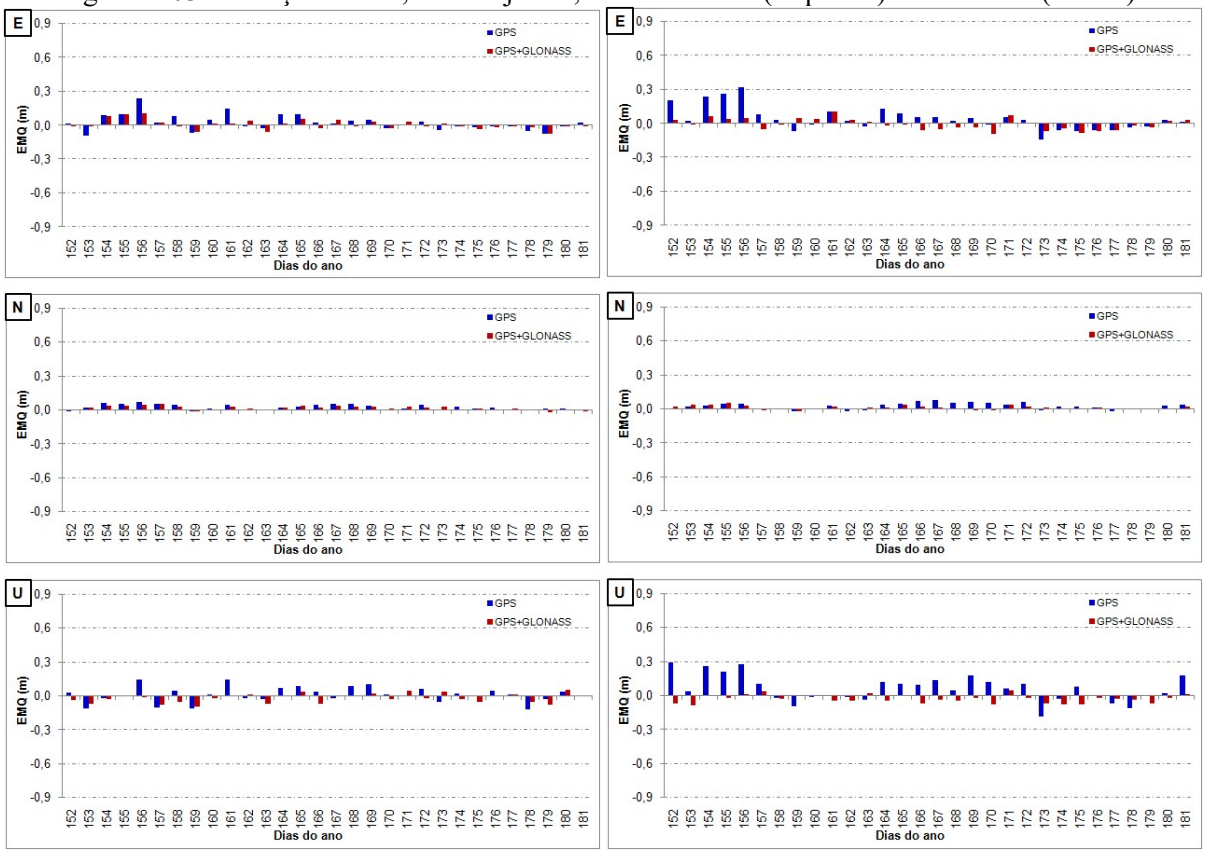


Figura H.04 – Estação SPDR, mês de outubro, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).

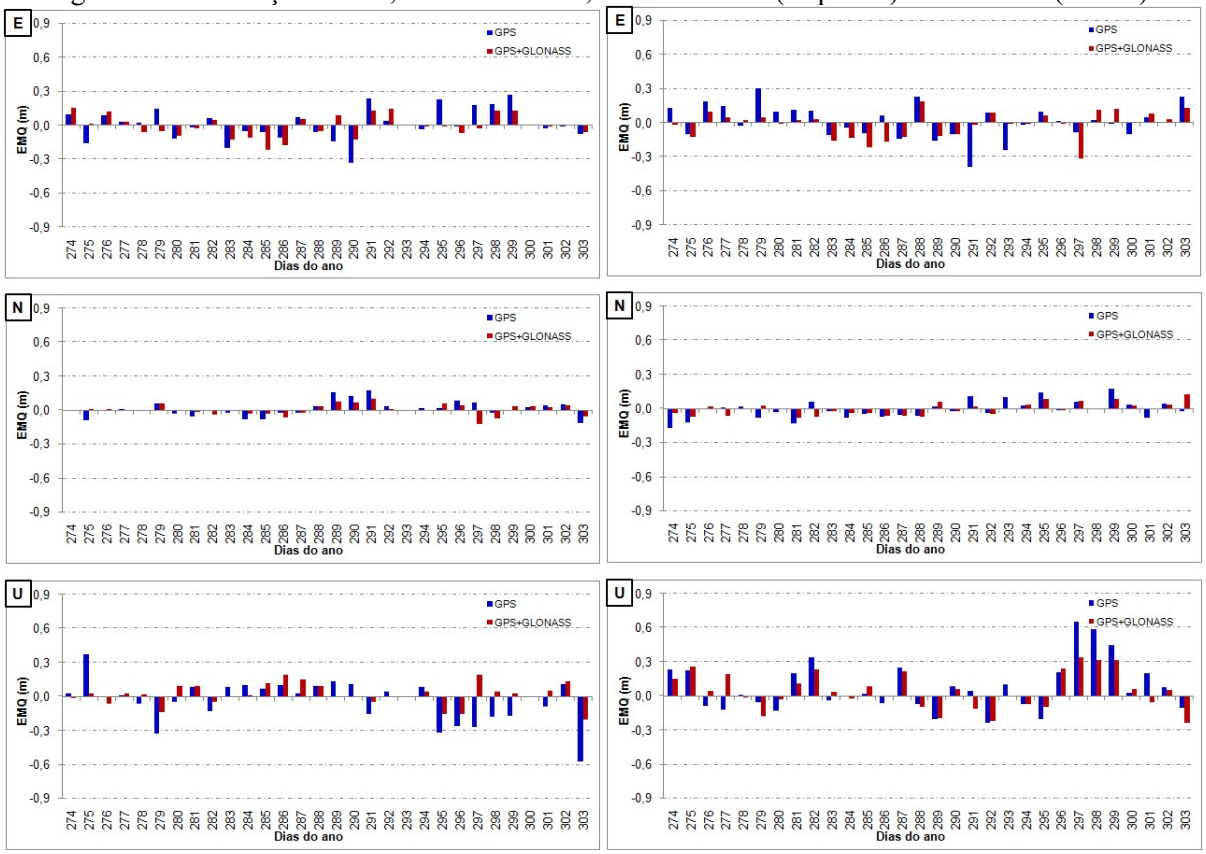


Figura H.05 – Estação SCFL, mês de junho, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).

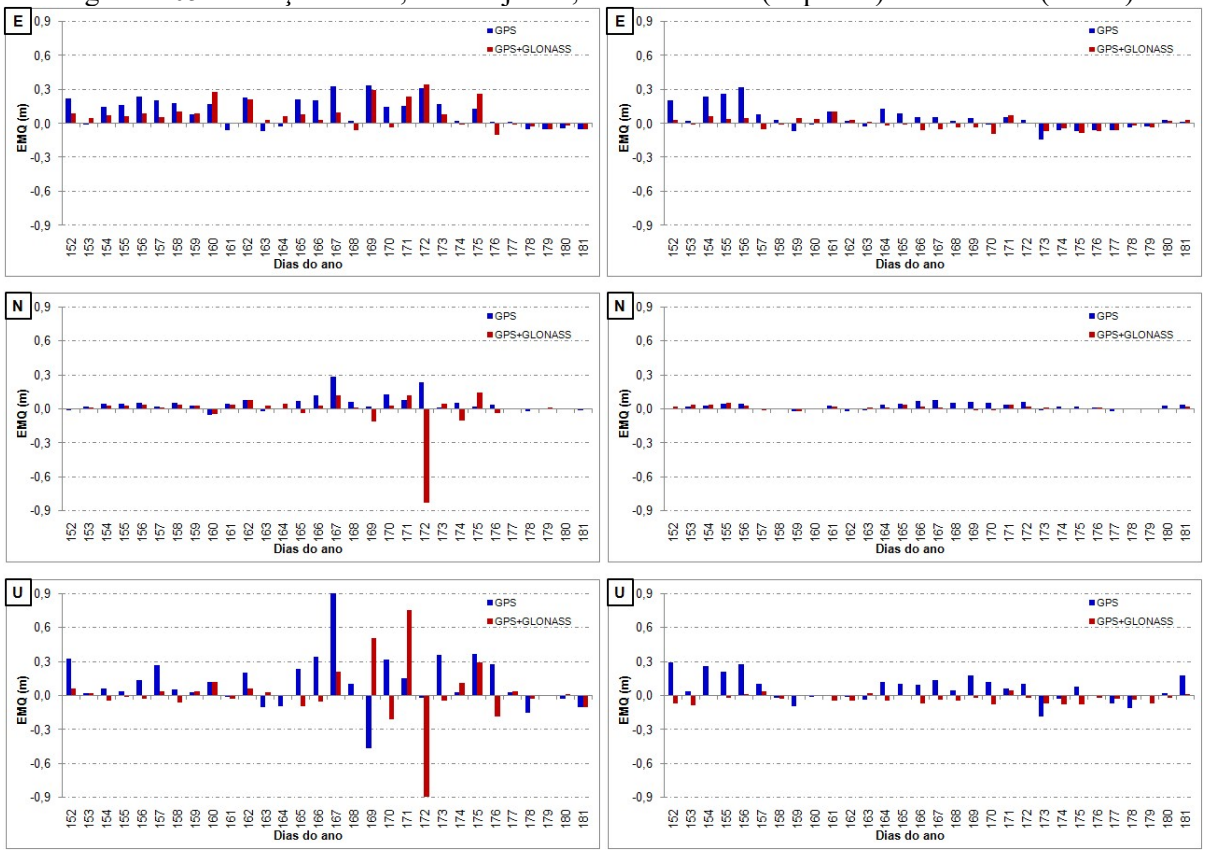


Figura H.06 – Estação SCFL, mês de outubro, dados da VRS (esquerda) e da RBMC (direita).