

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/1 201-214
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DO USO COMBINADO GPS/GLONASS NO POSICIONAMENTO SOB EFEITO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

*Analysis of GPS/GLONASS Combined use in the Positioning under Ionospheric
Scintillation Effect*

**Gabriel Oliveira Jerez, Daniele Barroca Marra Alves &
Jessica Saldanha Souza**

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, SP - Brasil
gabrielojerez@gmail.com; danibarroca@fct.unesp.br;
jessicasaldanha.souza@gmail.com

Recebido em 03 de Outubro, 2014/ Aceito em 13 de Novembro, 2014
Received on October 03, 2014/ Accepted on November 13, 2014

RESUMO

A partir da década de setenta teve início o desenvolvimento dos sistemas globais de navegação por satélite. Os pioneiros, GLONASS (Global Navigation Satellite System) e GPS (Global Positioning System) são atualmente os principais sistemas disponíveis. A utilização combinada de dados GPS e GLONASS teve uma grande queda no final da década de noventa devido à rápida degradação do sistema GLONASS, causada pela falta de lançamentos para substituição de satélites mais antigos ou com problemas. Porém, a partir de 2011 o GLONASS voltou a contar com constelação completa de 24 satélites e cobertura global. No presente trabalho busca-se analisar as melhorias apresentadas no processamento de dados GPS e GPS/GLONASS no posicionamento por ponto preciso (PPP) e no posicionamento relativo em diferentes intervalos de coleta e sob efeito de cintilação ionosférica. Primeiramente é apresentada uma revisão das características dos dois sistemas e em seguida são realizados testes de processamento de dados, de forma independente e combinada. Além disso, é feita uma comparação entre os resultados obtidos e os dados de variação da cintilação ionosférica nos mesmos períodos. Para os testes foram utilizados dados de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Considerando-se todos os intervalos de coleta os resultados mostraram uma melhoria em mais de 60% dos processamentos para Posicionamento Relativo e em mais de 75% dos processamentos com PPP quando os dados combinados são empregados.

Palavras chaves: Posicionamento, GPS/GLONASS, Cintilação Ionosférica.

ABSTRACT

From the seventies began the development of Global Navigation Satellite Systems. The pioneers, GLONASS (Global Navigation Satellite System) and GPS (Global Positioning System) are currently the main available systems. The combined use of GPS/GLONASS data had a great fall in the late nineties because of the fast degradation of GLONASS system, caused by the non-launch of new satellites to replace the old and damaged ones. However, since 2011, GLONASS have full constellation of 24 satellites and full global coverage. In this paper it is intended to analyze the improvement in of GPS and GPS/GLONASS data processing using precise point positioning (PPP) and relative positioning in different collection intervals under ionospheric scintillation effect. First of all it is presented a review from

both systems particularities and after this it is realized tests of data processing, in independent and combined ways. Furthermore, the processing results are compared to the ionospheric scintillation variation data at the same periods. For the tests were used data from from RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) stations. Considering all collection intervals, the results showed an improvement greater than 60% for Relative Positioning and 75% for PPP when combined data are used.

Keywords: Positioning, GPS/GLONASS, Ionospheric Scintillation.

1. INTRODUÇÃO

Posicionamento consiste na determinação da posição de um objeto em relação a um referencial específico (MONICO, 2008). As atividades que envolvem posicionamento tiveram uma grande evolução desde o desenvolvimento dos sistemas de navegação global por satélite, ou GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Desenvolvidos simultaneamente e de forma independente, a partir da década de setenta, o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) e o GPS (*Global Positioning System*) são, atualmente, os principais sistemas de navegação por satélite e os únicos com constelação completa.

A utilização de dados combinados gerou grande interesse devido ao número de satélites disponíveis que os dois sistemas podem oferecer. Porém, depois de um período de degradação sofrido pelo GLONASS, a utilização de dados combinados se tornou inviável. Com poucos satélites GLONASS disponíveis, a utilização de seus dados oferecia resultados variáveis devido à instabilidade do número de satélites visíveis durante o período de coleta.

No ano 2001 teve início um plano de metas na Rússia buscando restabelecer e modernizar o sistema, garantindo primeiramente a cobertura do território russo e, posteriormente, cobertura global (NIS GLONASS, 2014). Em 2011 o GLONASS voltou a contar com constelação completa, com 24 satélites operacionais.

Levando em consideração essa nova realidade do sistema, o presente trabalho busca avaliar a utilização de dados combinados GPS/GLONASS para o posicionamento por ponto preciso (PPP) e para o posicionamento relativo, utilizando diferentes intervalos de coleta. Além disso, também é avaliado o efeito que a cintilação ionosférica pode causar no posicionamento GPS ou no posicionamento combinado GPS/GLONASS.

Nas seguintes seções são apresentados

revisão teórica, dando ênfase para o status atual da constelação GLONASS, materiais e métodos empregados nos experimentos, além dos resultados e análises.

2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

Os sistemas de navegação global por satélite compreendem, atualmente, dois sistemas completos, GPS e GLONASS, e dois em desenvolvimento, GALILEO e BEIDOU. Além desses existem ainda sistemas regionais, em desenvolvimento em países como a Índia e o Japão (VAZ, et al., 2013). A seguir são apresentados mais detalhes dos sistemas GPS e GLONASS, que foram utilizados no presente estudo.

2.1 GPS

Inicialmente denominado de NAVSTAR GPS (*NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*), é um sistema de navegação por satélite desenvolvido pelos 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, conseguindo se estabilizar no mercado.

O GPS em sua concepção original consiste em uma constelação de no mínimo 24 satélites, distribuídos em seis planos orbitais inclinados 55° em relação ao equador. A altitude média é de 20.200 km e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Em relação às frequências, é utilizada a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem na mesma frequência e a identificação é dada por um código atribuído a cada satélite, o PRN (*Pseudo Random Noise*). O sistema de referência utilizado é o WGS-84 (*World Geodetic System*).

A Figura 1 ilustra a disposição dos satélites

GPS em órbita.

Atualmente o GPS conta com uma constelação de 32 satélites, dos quais 31 estão em operação, conforme Tabela 1.

O GPS passou, ao longo dos anos, por diversos projetos de modernização para se manter na liderança do setor e conseguir atender às necessidades do mercado.

Entre as mudanças ocorridas, uma das principais foi a extinção, a partir do dia 02 de maio de 2000, do uso da SA (*Selective Availability*) que degradava os sinais transmitidos para uso civil como forma de segurança.

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 (MONICO, 2008).

Como resultado de um dos projetos de modernização (Bloco IIR-M) a portadora L2 passou a transmitir o sinal civil L2C. Entre outras mudanças uma nova portadora, L5, foi desenvolvida na geração do bloco IIF, com o sinal civil L5C. Hoje (setembro/2014) existem 14 satélites transmitindo L2C e 7 transmitindo L5C (GPS, 2014).

A mais nova geração, GPSIII, prevista para lançamentos a partir de 2016, tem em

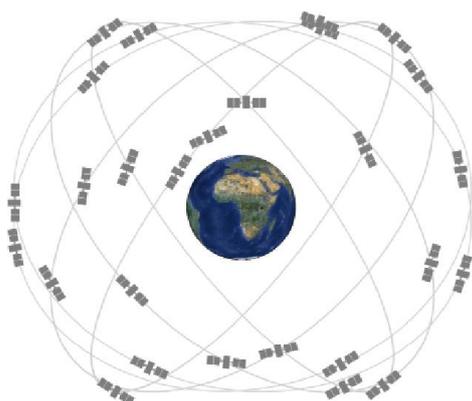


Fig. 1 - Ilustração da constelação GPS.

Tabela 1: Status Constelação GPS em 25/09/14

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

seu desenvolvimento a adição de um quarto código civil, L1C, além de aumento da vida útil dos satélites (GPS, 2014). Vale lembrar que os códigos civis obtidos ao longo das modernizações foram mantidos, além dos novos implementados.

A Figura 2 mostra o projeto com as gerações dos satélites GPS operacional ao longo dos anos, desde 2005 até projeções para 2025.

2.2 GLONASS

O GLONASS é o sistema que foi desenvolvido pela antiga União Soviética, em contrapartida ao GPS americano, e, atualmente, é mantido pela Rússia.

Similar ao seu concorrente, foi desenvolvido para fornecer coordenadas 3-D, velocidade e informações de tempo, independente da posição no globo e das condições climáticas. Inicialmente com finalidade militar, também teve sua utilização expandida para uso civil, conforme diversas declarações posteriores do governo russo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

O GLONASS é constituído de 24 satélites operacionais e 03 de reserva, distribuídos em três planos orbitais inclinados aproximadamente 64,8° em relação ao equador (Figura 3). A altitude média é de 19.100 km e o período orbital é de 11h15min (Tempo Sideral).

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. O sistema de referência utilizado é o PZ-90 (*Parametry Zemli - 90*).

Em 1995 o GLONASS foi declarado operacional, com 24 satélites. Porém, passou por um grande período de degradação, chegando



Fig. 2 – Gerações de satélites GPS operacionais por ano.

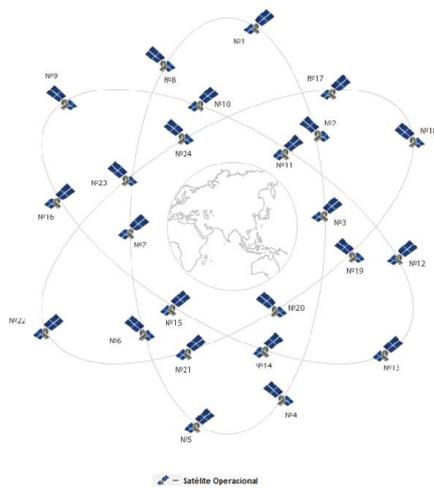


Fig. 3 - Constelação GLONASS.

a contar com dez satélites operacionais. A partir de 2001, teve início o processo para restabelecer a cobertura global e modernizar o sistema. Com isso novas gerações de satélites foram desenvolvidas, sendo a primeira delas a dos satélites GLONASS-M, com melhorias na acurácia do posicionamento e vida útil estendida para sete anos (os primeiros tinham vida útil de quatro anos). Posteriormente, foi desenvolvida a geração de satélites GLONASS-K, que transmite além dos sinais FDMA, uma nova portadora, L3, com sinal CDMA. É importante ressaltar que apesar da nova portadora com CDMA, a ideia inicial é manter a transmissão dos sinais com tecnologia FDMA (URLICHICH et al., 2011a).

O primeiro satélite GLONASS-K foi lançado em 2011 e encontra-se em fase de testes. Foi planejado o lançamento de um segundo satélite GLONASS-K entre o final de 2011 e início de 2012, porém, o lançamento foi adiado diversas vezes. O lançamento ocorreu no dia 01 de Dezembro de 2014 (VOZ DA RUSSIA, 2014). A Figura 4 mostra, da esquerda para a direita, os primeiros satélites GLONASS, em seguida a geração GLONASS-M e, por último, a mais recente geração GLONASS-K (INTERNATIONAL LASER RANGING SERVICE, 2014).

Além do satélite GLONASS-K em órbita, que já transmite sinal CDMA, no dia 14 de junho de 2014 foi lançado um novo satélite GLONASS-M experimental com uma nova portadora L3 (1202,025 MHz) que também transmite sinal CDMA. Desde o dia 03 de agosto ele encontra-se operacional e testes de validação de sua acurácia estão em andamento

(GPS WORLD, 2014). A transmissão de sinais CDMA pelo GLONASS é de grande importância devido à facilidade permitida para integração com os outros sistemas GNSS. Nesse artigo, o sinal transmitido pela nova portadora L3 não teve influência, uma vez que os dados em questão não foram utilizados nos processamentos.

Além dos projetos de modernização dos satélites, com o intuito de melhorar a qualidade do posicionamento, novas estações terrestres de controle estão sendo implantadas. Inicialmente existiam estações apenas no território da antiga União Soviética. A primeira estação fora dessa região e primeira no Hemisfério Sul foi a implantada no Brasil, em Brasília, em fevereiro de 2013. A Figura 5 mostra uma imagem da primeira estação brasileira. Projetos de instalação de outras estações no Brasil estão em andamento, além de estudos para instalação de estações em Cuba e na Nicarágua (GAZETA RUSSA, 2014).

Atualmente o GLONASS conta com 28 satélites em órbita, garantindo cobertura global com 24 satélites operacionais, conforme Tabela 2.

A Figura 6 mostra a evolução do número de satélites da constelação GLONASS desde o seu primeiro lançamento. Desde o ano 2011 o número de satélites operacionais para cobertura global, 24 satélites, se estabilizou, com exceção de dias em que ocorre manutenção de satélites.

3. CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

Os sinais GNSS podem sofrer alterações ao longo do percurso entre o satélite e o receptor, podendo causar variações na direção de propagação, velocidade e potência (CAMARGO, 1999). A atmosfera tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, sendo a Ionosfera uma das principais fontes de degradações e erros (ALVES, 2004; MONICO, 2008).

A Ionosfera é uma região carregada

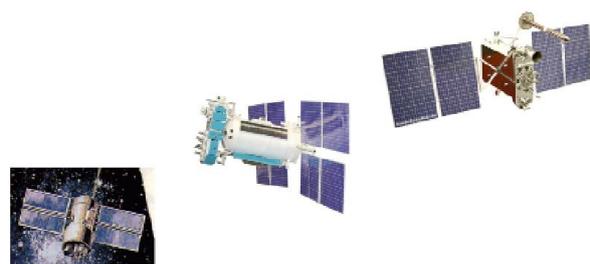


Fig. 4 – Gerações de satélites, GLONASS, GLONASS-M e GLONASS-K.



Fig. 5 – Primeira estação brasileira do GLONASS.

Tabela 2: Status Constelação GLONASS em 25/09/14

| | |
|--|-----------|
| Total de satélites na Constelação | 28 |
| Operacional | 24 |
| Em fase de comissionamento | - |
| Em manutenção | - |
| Sob verificação pelo <i>Satellite Prime Contractor</i> | 01 |
| Reservas | 02 |
| Em fase de vôo de testes | 01 |

com elétrons livres em quantidade suficiente para afetar o sinal GNSS. As irregularidades na densidade desses 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 essa anomalia é dado o nome de cintilação ionosférica (CONKER et al., 2003).

Os efeitos causados pela cintilação ionosférica são mais intensos nas regiões equatoriais (onde se situa grande parte do território brasileiro) e de altas latitudes (MONICO, 2008). Nas regiões equatoriais os efeitos da cintilação são relacionados à anomalia equatorial com intensidade maior no pico local da anomalia. Isso faz com que o Brasil se encontre em uma região privilegiada para estudos desse tema, já que grande parte de seu território encontra-se na região equatorial, fortemente afetada por esses efeitos (SOUZA et al., 2014).

A magnitude e a frequência das cintilações são correlacionadas com os ciclos solares (SILVA et al. 2012). Os ciclos solares ocorrem em intervalos de 11 anos, o último pico ocorreu no final de 2013 e início de 2014.

Uma das formas de classificação da

potência da cintilação é a utilização dos índices S, sendo o S4 um dos mais utilizados (MENDONÇA, 2013). A Tabela 3 apresenta a classificação do índice S4 em fraco, moderado e forte.

4. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

Para o presente estudo foram realizados dois tipos de experimentos, um para PPP e outro para Posicionamento Relativo.

Em ambos os casos foram utilizados dados com os mesmos tempos de coleta, havendo dois períodos por dia de análise com o mesmo tempo, um período com o tempo contado a partir das 00h e outro a partir das 12h (UTC). Os intervalos utilizados foram de 20 minutos, 40 minutos, 60 minutos, 120 minutos e 240 minutos. Para os períodos contados a partir das 00h foi utilizado também o tempo de coleta de 24 horas. A Figura 7 exemplifica os intervalos para o dia 061 (02 de março de 2014).

A utilização de dados obtidos a partir de dois horários diferentes foi realizada para que também fossem processados dados coletados durante picos de cintilação ionosférica. Esses picos ocorrem, principalmente, a partir das 00h TU nos dias de grande efeito ionosférico, como poderá ser visto a seguir (Figura 9) nos gráficos de índice S4.

A estação escolhida para a determinação das coordenadas com PPP foi a PPTE, localizada em Presidente Prudente e pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Como coordenadas verdadeiras foram consideradas as coordenadas oficiais da estação, em SIRGAS 2000, época 2000,4, atualizadas para a época do levantamento.

Para o experimento envolvendo o PPP foi utilizada a ferramenta *online* do IBGE (IBGE-PPP, 2014). Com este produto foi possível a obtenção das coordenadas para o processamento com dados GPS e GPS/GLONASS.

Para o experimento com Posicionamento Relativo a estação a ter coordenadas determinadas também foi a PPTE. Como estações de referência foram utilizadas as estações OURI e SPAR, de Ourinhos e Araçatuba, respectivamente, também pertencentes à RBMC. A Figura 8 representa as linhas base formadas entre a estação PPTE e as estações de referência, OURI e SPAR. A linha

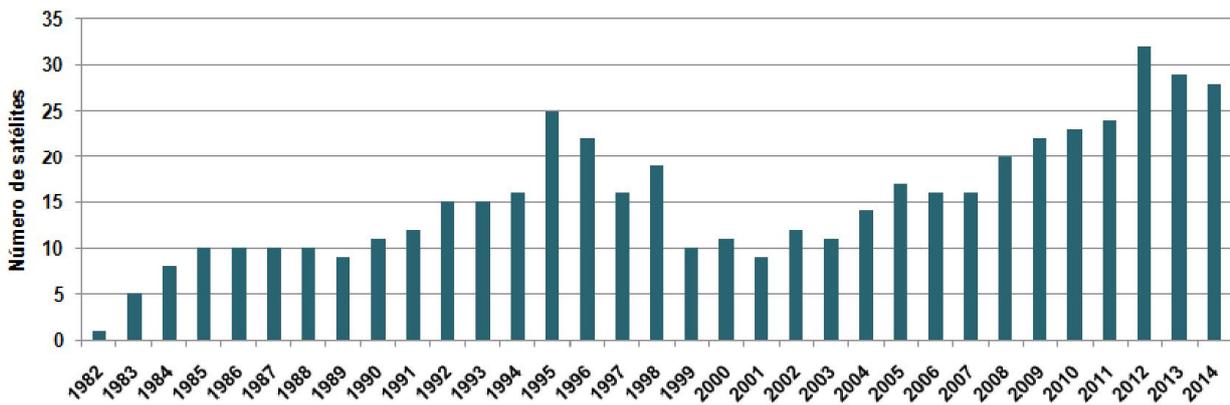


Fig. 6 – Evolução do número de satélites da constelação GLONASS ao longo dos anos.

Tabela 3: Classificação do índice S4

| S4 | CLASSES |
|----------------|----------|
| $S4 > 1$ | FORTE |
| $0,5 < S4 < 1$ | MODERADA |
| $0 < S4 < 0,5$ | FRACA |

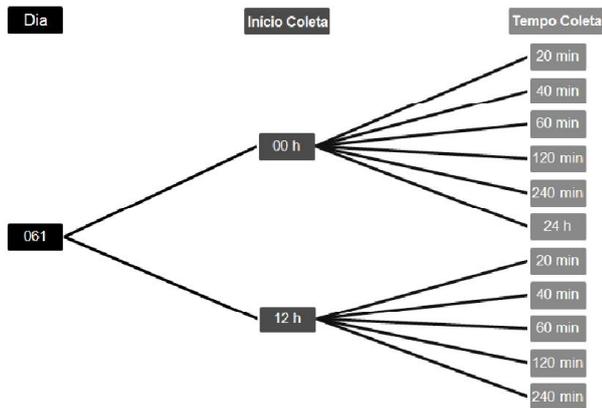


Fig. 7 – Tempos de coleta analisados por dia.

PPTE-SPAR possui aproximadamente 144 km, enquanto a linha PPTE-OURI tem em torno de 181 km.

Para o processamento foi utilizado o software TBC (*Trimble Business Centre*) que possibilitou a obtenção de coordenadas a partir de dados GPS e GPS/GLONASS.

A escolha da estação PPTE como estação de interesse, para os dois tipos de processamento, ocorreu devido à disponibilidade de uma estação de monitoramento de cintilação ionosférica nas proximidades da PPTE (menos de 300 metros), a denominada PRU2. Com isso foi possível obter os dados de cintilação para os dias analisados.

Para a escolha dos dias analisados, foram utilizados os dados da estação PRU2, pertencente à FCT-UNESP. Como a estação se encontra próxima à estação PPTE, os efeitos ionosféricos

podem ser considerados semelhantes. A partir dos gráficos de índice S4, gerados com a ferramenta *ISMR Query Tool* (VANI et al, 2013), foram selecionados dias com intensa e fraca cintilação ionosférica. A partir dessas análises foram escolhidos três dias do mês de março (dias 02, 03 e 04) e três dias do mês de junho (02, 03 e 04) de 2014, ou seja, três dos dias com maior e menor efeito da cintilação ionosférica, respectivamente, conforme Figura 9.

Os gráficos A, B e C correspondem, respectivamente, aos dias 02, 03 e 04 de março, dias 061, 062 e 063 de 2014. Enquanto os gráficos D, E e F correspondem aos dias 02, 03 e 04 de junho, dias 153, 154 e 155 de 2014. Nota-se no dia 062, gráfico B, que a cintilação foi intensa e obteve valores altos nas primeiras horas do dia, chegando a 1,5 e se mantendo por mais de 3 horas com valores de até 1,2, além de um segundo pico por volta das 5h. Comparando com os gráficos dos outros dias de alta cintilação, é possível notar que o dia 062 se destacou. Mas os dias 061 e 063 também apresentaram um efeito muito intenso. Nos resultados dos processamentos o mesmo dia apresentou resultados com grande diferença em relação aos demais dados.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos foram analisados de acordo com o tipo posicionamento utilizado. Nas próximas sessões são apresentados, respectivamente, os resultados para posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo.

5.1 Posicionamento por Ponto Preciso

A seguir são apresentados os resultados dos processamentos com o PPP. Para todos os

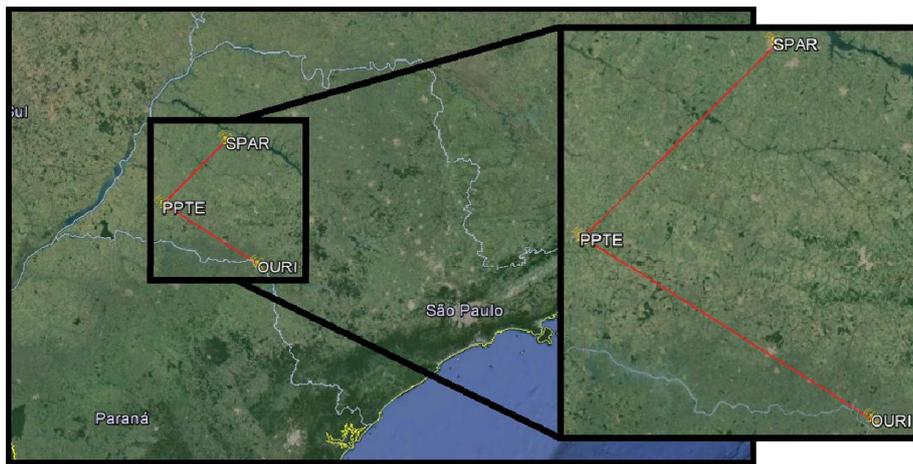


Fig. 8 – Linhas de base formadas entre as estações PPTE, OURI e SPAR.

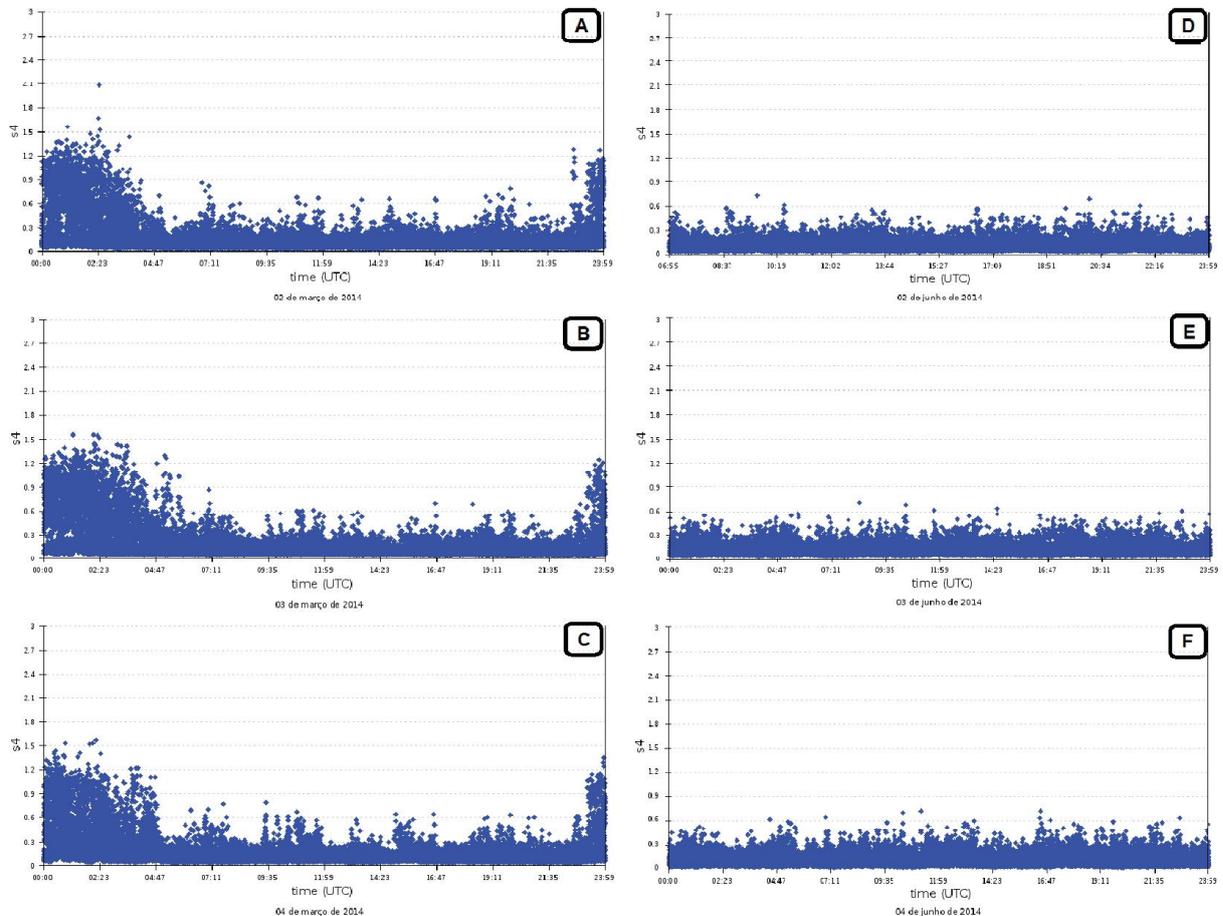


Fig. 9 – Índices S4 de cintilação ionosférica para os dias 02, 03 e 04 de março e 02, 03 e 04 junho de 2014.

processamentos foram analisados os valores de Erro Médio Quadrático (EMQ). A Figura 10 apresenta os resultados para o PPP com os intervalos de coleta com início às 00h. Os gráficos A, B e C correspondem, respectivamente, aos dias 061, 062 e 063, dias de alta cintilação ionosférica, é importante notar inclusive, a variação na escala do gráfico B, devido aos altos valores obtidos. Vale lembrar que, como comentado anteriormente, o dia em questão teve

maior cintilação que os demais. Podendo isso ter influenciado nos resultados mais elevados. Os gráficos D, E e F correspondem aos dias 153, 154 e 155, dias de baixa cintilação ionosférica.

Para os processamentos com tempo de coleta de 20 a 120 minutos, tanto nos dias de alta cintilação ionosférica (Figura 10 – A, B e C), quanto nos dias de baixa cintilação (Figura 10 – D, E e F), em todos os casos houve melhoria com a utilização de dados combinados GPS/

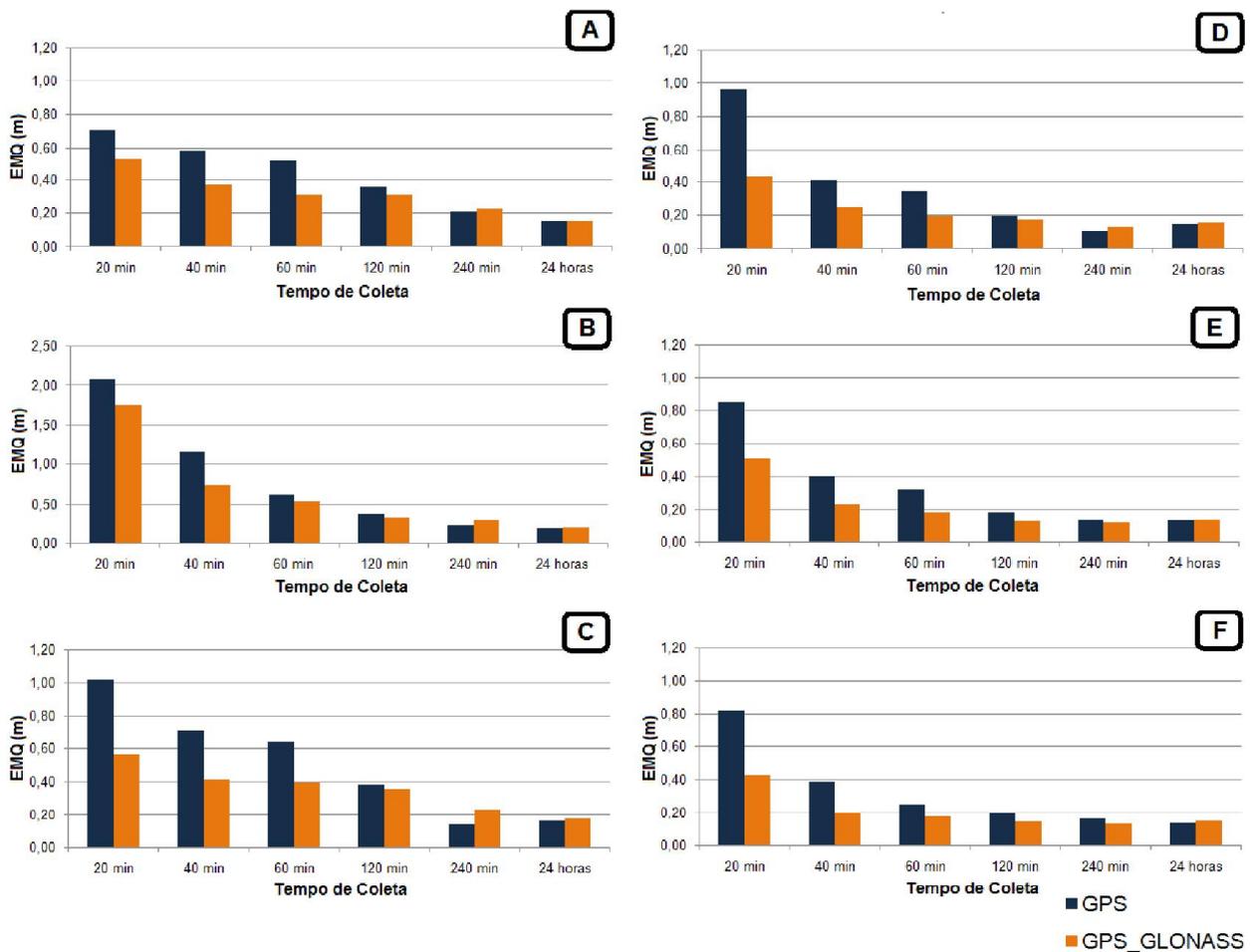


Fig. 10 – Erro Médio Quadrático 3D para os processamentos com início de coleta às 00h.

GLONASS. Nos dados de 240 minutos de coleta a melhoria foi em 33% dos casos (sendo essa melhoria obtida com dados sem efeito de cintilação ionosférica – dias 154 e 155 de 2014). Nas coletas de 24 horas as mudanças foram pouco significativas, e dos seis casos observados em apenas um houve melhoria (dia 061), ou seja, 16% dos casos. Nota-se nos resultados uma diminuição da melhoria quando o tempo de coleta aumenta. Isso provavelmente ocorre pois quando se tem pouco tempo de coleta, um número maior de satélites ocasiona um aumento no grau de liberdade para o processamento dos dados. Já para grandes intervalos de coleta, a quantidades de dados GPS já é elevada.

É possível notar que os dados obtidos a partir dos meses de março (Figura 10 – A, B e C) e junho (Figura 10 – D, E e F), períodos de alta e baixa cintilação ionosférica, não apresentam grande diferença, com exceção do Gráfico B, em que o EMQ apresentado é maior que o dobro dos valores dos demais períodos. Os relatórios de processamento foram analisados e os períodos com alta cintilação apresentam maior número

de observações rejeitadas. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que a plataforma online do IBGE para PPP descarta observações com erros grosseiros (IBGE-PPP, 2013). Portanto, grande parte dos dados afetados por erros causados pela cintilação ionosférica podem não ter sido utilizados no processamento.

A Figura 11 apresenta os resultados dos processamentos dos dados com início de coleta às 12h. Assim como na figura anterior os gráficos A, B e C correspondem, respectivamente, aos dias 061, 062 e 063, enquanto os gráficos D, E e F correspondem aos dias 153, 154 e 155.

Para os dados iniciados às 12h os períodos de coletas de 20 a 60 minutos tiveram melhoria com a utilização de dados combinados em todos os casos. Para os dados de 120 e 240 minutos os valores obtidos foram bastante semelhantes. Para 120 minutos houve uma pequena melhoria em metade dos casos. Para 240 minutos houve melhoria em 33% dos casos, ou seja, em dois dos seis períodos. Além da possível causa já citada anteriormente para a piora nos resultados ao utilizar dados combinados em grandes intervalos

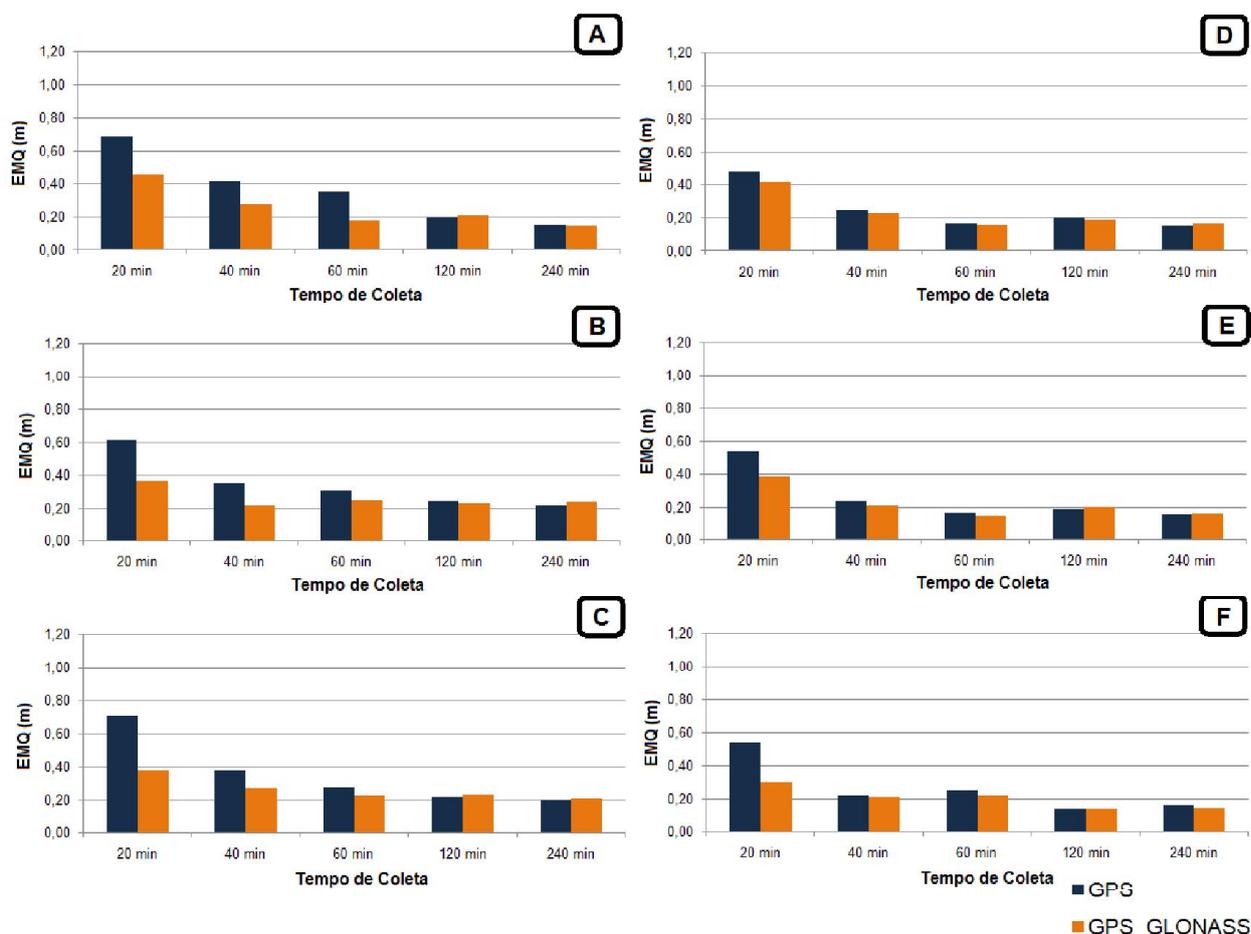


Fig. 11- Erro Médio Quadrático 3D para os processamentos com início de coleta às 12h.

de coleta, em alguns casos esta piora pode estar relacionada a erros provindos de outras fontes, ou mesmo problemas nos satélites.

Foi realizada ainda uma comparação entre os valores de EMQ obtidos com os dois tipos de processamentos (usando apenas GPS e usando GPS e GLONASS). A Figura 12 apresenta as diferenças entre os EMQ resultantes por dia de processamento. Os valores positivos representam melhoria nos resultados de processamento utilizando-se dados combinados, enquanto os negativos indicam piora.

A partir do gráfico fica mais clara a melhoria do uso combinado de dados GPS/GLONASS na maior parte dos casos observados. Além disso, pode-se verificar que, nos casos em que houve piora nos resultados, os valores não são tão significativos e acontecem nos períodos de coleta mais longos, principalmente 240 min e 24h.

A Tabela 4 mostra em percentual os casos que tiveram melhores resultados com o processamento, com os dados separados por horário de início e intervalo de coleta.

O EMQ apresentou melhoria significativa na maior parte dos dados com pouco tempo de coleta, entre 20 e 120 minutos. Nos intervalos de 20 a 60 minutos 100% dos casos apresentaram melhoria com o uso de dados combinados. Com intervalo de 120 minutos a melhoria foi em 75% dos casos, considerando-se todos os casos analisados, seguidos de 33,33% dos casos para 240 minutos e 16,67% para coletas de 24 horas. Os dados obtidos indicam que quanto maior o tempo de coleta, menor a influência da utilização de dados combinados GPS/GLONASS, uma vez que os resultados vão ficando mais próximos. Para pequenos intervalos a melhoria é significativa tanto nos períodos com alta quanto nos de baixa cintilação ionosférica.

5.2 Posicionamento Relativo

Na presente seção são apresentados os resultados dos processamentos com Posicionamento Relativo. De maneira análoga ao PPP, também foram obtidos valores de EMQ. Os valores para dados com início de coleta às 00h são apresentados na Figura 13, onde os gráficos

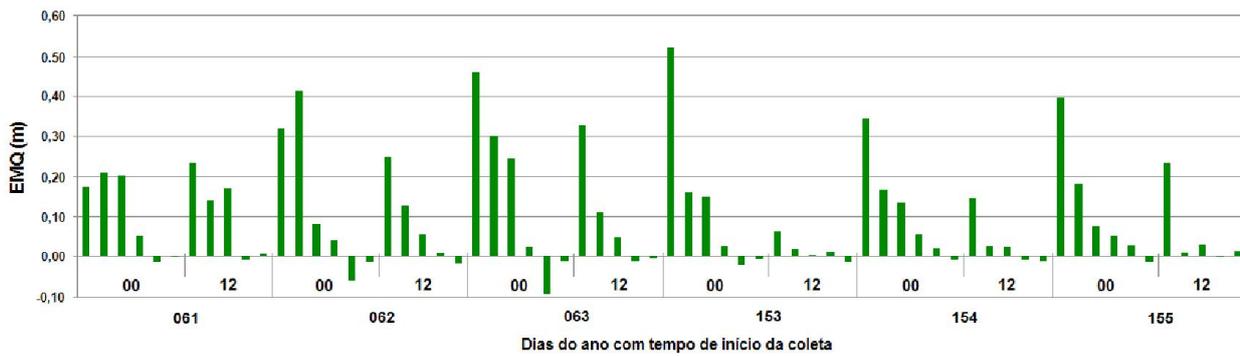


Fig. 12 – Diferença EMQ com PPP GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 4: Casos com melhoria nos resultados com dados combinados

| Hora Inicial | Tempo de Coleta | GPS | GPS/GLONASS |
|--------------|-----------------|--------|-------------|
| 00 | 20 min | 0,00% | 100,00% |
| | 40 min | 0,00% | 100,00% |
| | 60 min | 0,00% | 100,00% |
| | 120 min | 0,00% | 100,00% |
| | 240 min | 66,67% | 33,33% |
| | 24 horas | 83,33% | 16,67% |
| 12 | 20 min | 0,00% | 100,00% |
| | 40 min | 0,00% | 100,00% |
| | 60 min | 0,00% | 100,00% |
| | 120 min | 50,00% | 50,00% |
| | 240 min | 66,67% | 33,33% |

A, B e C correspondem, respectivamente, aos dias 061, 062 e 063, e os gráficos D, E e F correspondem aos dias 153, 154 e 155. É importante destacar a variação na escala dos gráficos A, B e C que apresentam valores muito maiores que as escalas dos demais.

De acordo com os resultados (comparando as Figuras 10 e 13), houve uma maior influência da cintilação ionosférica no Posicionamento Relativo, assim, a análise será realizada de maneira separada. Observando-se inicialmente os dias de alta cintilação ionosférica, dias 061, 062 e 063, gráficos A, B e C, pode-se perceber que nos dias 061 e 063, os resultados das coletas de 20 a 120 minutos obtiveram melhoria nos resultados com o uso de dados combinados. Nas coletas de 240 minutos a melhoria foi diferente para cada um dos casos e com 24 horas de coleta houve piora utilizando-se dados combinados. O dia 062 tem um comportamento diferente, que pode ser notado devido aos altos valores obtidos, assim como ocorrido no PPP. Para este caso o EMQ obtido com dados GPS/GLONASS com 20

minutos de coleta atingiu quase 30 m, e no caso do processamento apenas com GPS o software não conseguiu finalizar o processamento, ocorrendo falha. Nos demais tempos de coleta o uso de dados GLONASS não melhorou os resultados, na maioria dos casos piorou.

Nos dias de baixa cintilação ionosférica, dias 153, 154 e 155, os resultados não apresentaram um padrão claro, como ocorreu no PPP, mas de maneira geral aproximadamente 60% dos intervalos avaliados tiveram melhoria com o uso de dados combinados.

A Figura 14 apresenta o EMQ para os dados coletados a partir das 12h, onde os gráficos A, B e C, correspondem, respectivamente, aos dias 061, 062 e 063, enquanto os gráficos D, E e F correspondem aos dias 153, 154 e 155.

Como pode ser visto na Figura 14 os dados coletados a partir das 12h não tiveram resultados muito discrepantes entre si. Analisando-se os dias 061, 062 e 063, gráficos A, B e C, com exceção do tempo de 40 minutos do dia 062, todas as observações de 20 a 120 minutos obtiveram melhorias com a utilização de dados combinados. Os dados de 240 minutos, apesar de não terem diferenças muito significativas, tiveram piora com a utilização de dados GLONASS.

Novamente nos dias de baixa cintilação, dias 153, 154 e 155, não é possível ver um padrão claro de melhoria ou piora. Analisando todos os períodos de coleta, em torno de 66% dos casos houve melhora com a utilização de dados combinados.

O gráfico comparativo que mostra a diferença entre o EMQ do processamento GPS e do GPS/GLONASS foi dividido para melhor visualização em relação às escalas, devido aos altos valores encontrados nos dias de forte cintilação. A Figura 15 apresenta os resultados

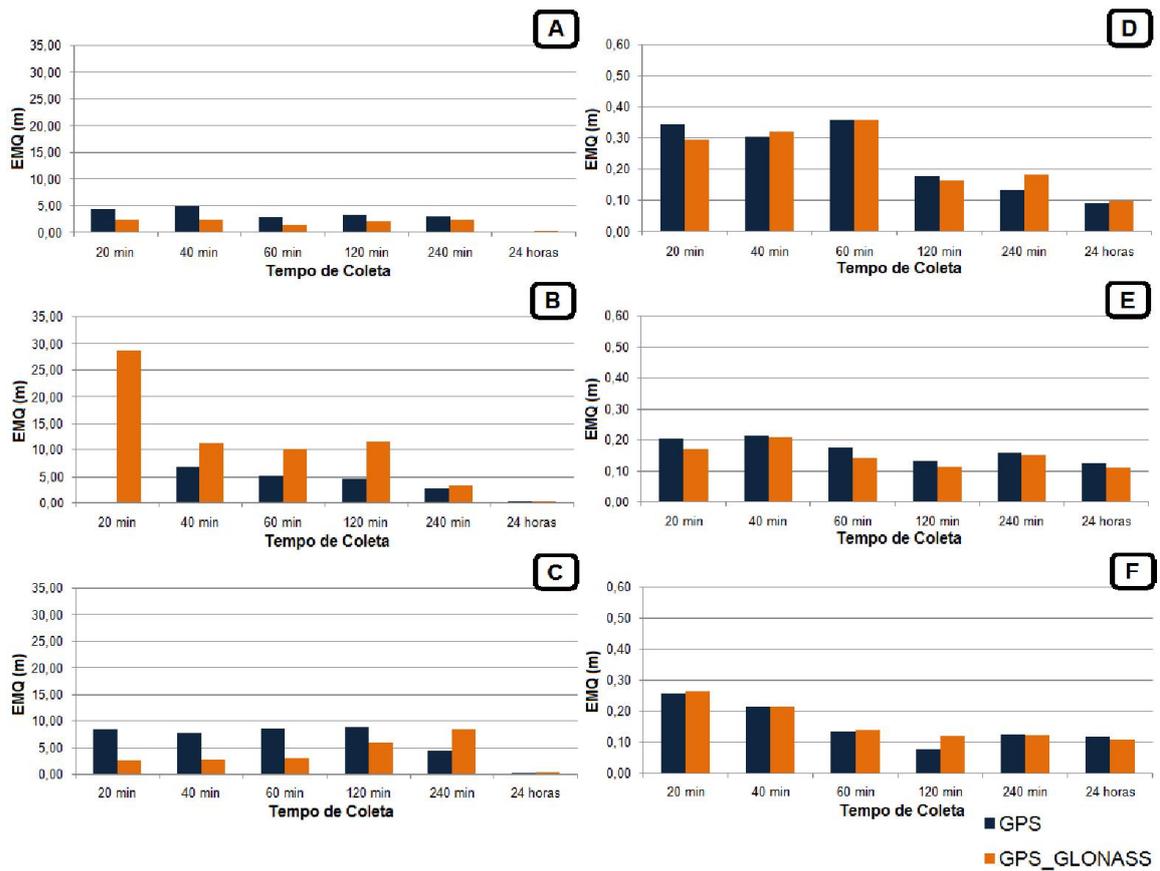


Figura 13 - Erro Médio Quadrático 3D para os processamentos com início de coleta às 00h.

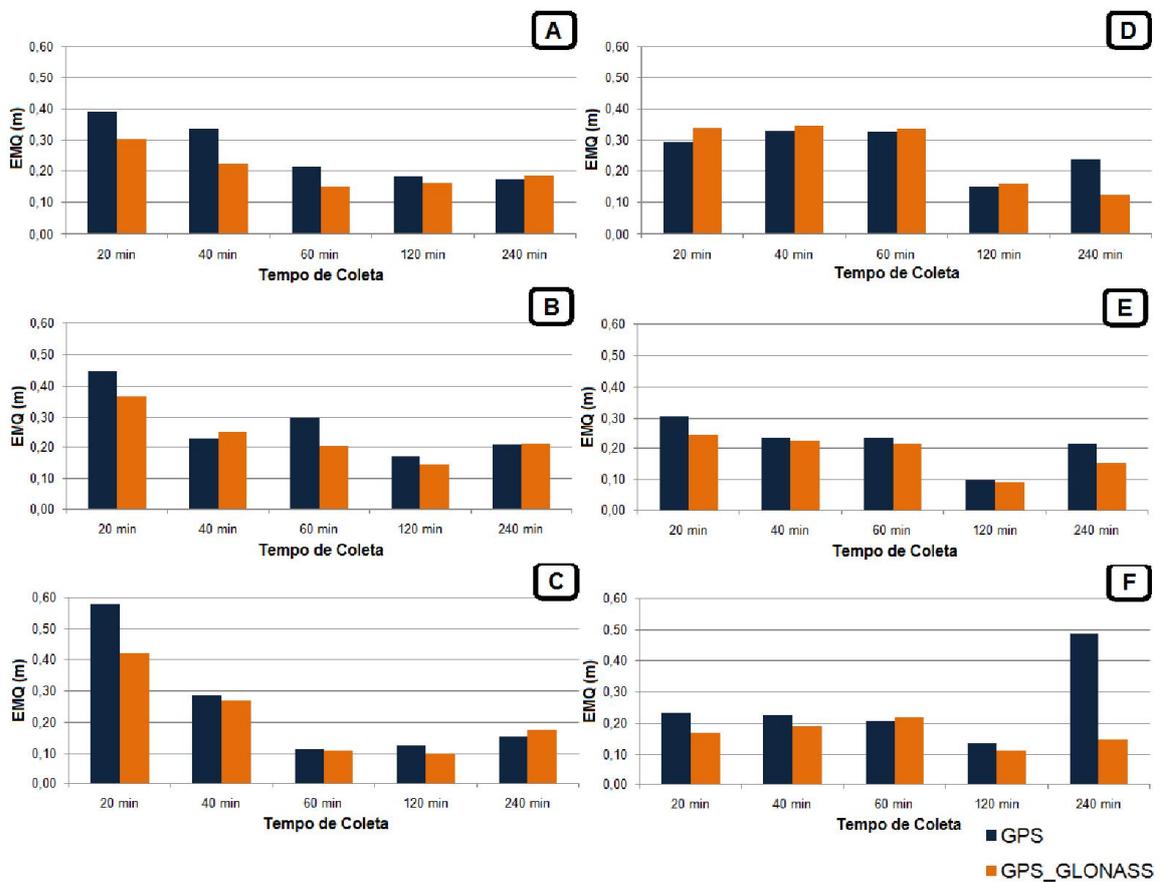


Fig. 14 - Erro Médio Quadrático 3D para os processamentos com início de coleta às 12h.

Observando-se os gráficos é possível notar que os dados com piores resultados ao utilizar-se dados GLONASS são do dia 062, no período de maior cintilação ionosférica, ou seja, a partir das 00h. Em relação aos outros dias, com exceção do período de 240 minutos de coleta do dia 063, com início às 00h, na maior parte dos casos, houve melhoria utilizando-se dados combinados e, novamente, nos casos em que não houve melhoria a piora não foi grande. Porém, como afirmado anteriormente, diferente dos processamentos com PPP, não é possível observar um padrão claro na ocorrência de melhoria ou piora.

A Tabela 5 mostra o percentual dos casos que tiveram melhores resultados com o processamento, com os dados separados por horário de início e intervalo de coleta.

Em relação aos resultados de EMQ, considerando-se todos os períodos de 20 minutos a melhoria acontece em 83,33% dos casos. Para 40 minutos a melhoria foi em 66,67%, subindo para 75% dos casos com 120 minutos de coleta, levando-se em conta os intervalos com início de coleta em ambos os horários. Com 240 minutos de coleta ocorre melhoria em 50% e em 33,33% dos casos com intervalo de coleta de 24 horas.

Problemas na fixação das ambiguidades das linhas de base para pequenos períodos de coleta eram esperados, já que as linhas de base trabalhadas eram longas, em média 162,5 km, embora dados de dupla frequência fossem empregados. Das 132 linhas de base processadas, utilizando-se apenas dados GPS, 50 linhas tiveram solução *float* e uma falhou o processamento. Do mesmo total de linhas processadas com dados GPS/GLONASS 38 linhas ficaram *float* e nenhuma falhou. A Tabela 6 apresenta a distribuição das linhas de base

com solução *float* por intervalo de coleta e a porcentagem em relação ao total de 12 linhas por intervalo. Nela é possível observar que o número de linhas com solução *float* diminui com o aumento do tempo de coleta, como era esperado e, além disso, é possível ver que o uso de dados combinados mantém ou diminui o número de linhas com solução *float*. Vale lembrar que no dia 062, com intervalo de 20 minutos, uma linha teve falha no processamento da linha e não entrou na contagem, por isso um número menor de linhas no intervalo de 20 minutos com início às 00h.

Levando-se em conta todos os intervalos de coleta a porcentagem de linhas com solução *float* passou de 38,17% para 28,79%, ao utilizar dados GPS/GLONASS.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo procurou validar a utilização de dados combinados GPS/GLONASS para PPP e Posicionamento Relativo a partir da nova realidade do sistema russo, hoje com constelação completa.

Os resultados para PPP indicaram um padrão de melhoria com o uso de dados GPS/GLONASS em pequenos intervalos de tempo, de 20 a 120 minutos. Além disso, observou-se que quanto maiores os intervalos de coleta, menor a influência da utilização de dados combinados. A variação da cintilação não indicou mudanças nos resultados de posicionamento.

Os resultados do Posicionamento Relativo não indicaram um padrão claro de melhoria, porém, foram encontrados valores significativos não só nos resultados finais, como nos dados de processamento. O uso de dados combinados diminuiu o número de linhas de base com problemas na fixação das ambiguidades.

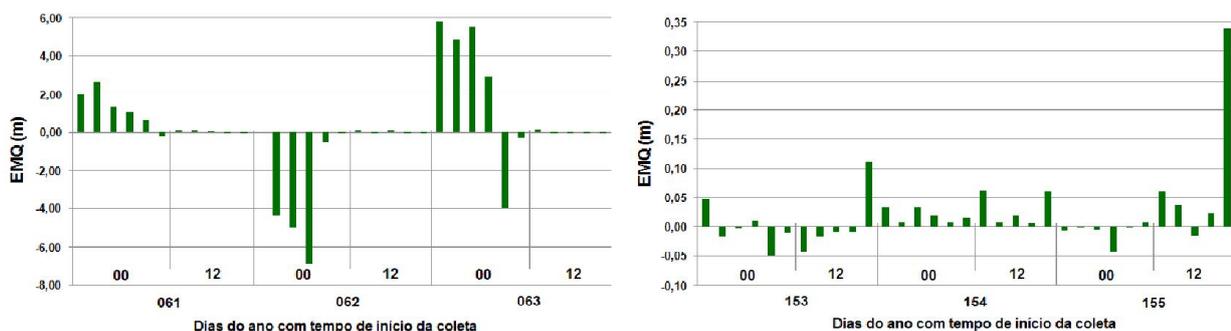


Fig. 15 – Diferença EMQ com Posicionamento Relativo GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 5: Casos com melhoria utilizando-se dados combinados

| Hora Inicial | Tempo de Coleta | GPS | GPS/GLONASS |
|--------------|-----------------|--------|-------------|
| 00 | 20 min | 16,67% | 83,33% |
| | 40 min | 33,33% | 66,67% |
| | 60 min | 50,00% | 50,00% |
| | 120 min | 33,33% | 66,67% |
| | 240 min | 50,00% | 50,00% |
| | 24 horas | 66,67% | 33,33% |
| 12 | 20 min | 16,67% | 83,33% |
| | 40 min | 33,33% | 66,67% |
| | 60 min | 33,33% | 66,67% |
| | 120 min | 16,67% | 83,33% |
| | 240 min | 50,00% | 50,00% |

Tabela 6: Linhas de base com solução float

| Dias | Tempo de Coleta | GPS | GPS/GLONASS | GPS | GPS/GLONASS |
|------|-----------------|-----|-------------|---------|-------------|
| 00 | 20 min | 7 | 8 | 63,64% | 66,67% |
| | 40 min | 6 | 6 | 50,00% | 50,00% |
| | 60 min | 6 | 6 | 50,00% | 50,00% |
| | 120 min | 6 | 6 | 50,00% | 50,00% |
| | 240 min | 6 | 4 | 50,00% | 33,33% |
| | 24 horas | 0 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 12 | 20 min | 12 | 6 | 100,00% | 50,00% |
| | 40 min | 4 | 2 | 33,33% | 16,67% |
| | 60 min | 3 | 0 | 25,00% | 0,00% |
| | 120 min | 0 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| | 240 min | 0 | 0 | 0,00% | 0,00% |

Além disso, os efeitos da cintilação ionosférica parecem afetar mais o processamento relativo que o PPP, o que pode estar relacionado ao tratamento dado pelos softwares utilizados em cada tipo de processamento. Outra questão importante é que no posicionamento relativo utilizam-se outras estações como bases, neste caso, distantes da estação de interesse, o que leva a efeitos ionosféricos diferentes. A análise de dados de cintilação das outras estações seria interessante, porém, não existem estações de monitoramento disponíveis nas regiões das mesmas.

Esses e outros questionamentos levantados podem ser tema de estudos futuros de continuidade do presente trabalho. De maneira

geral os experimentos indicaram que a utilização de dados combinados GPS/GLONASS para pequenos intervalos de coleta já se mostra efetivo depois da modernização do sistema GLONASS.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento da bolsa do primeiro autor (processo 470112/2012-3), pela bolsa de produtividade em pesquisa para a segunda autora e ao projeto Universal (processo 470112/2012-3). A FAPESP pelo projeto Regular da segunda autora (processo 2012/19906-7). Ao projeto CIGALA e CALIBRA (MONICO et al., 2012) pelo acesso ao banco de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. B. M. **Método dos Mínimos Quadrados com penalidades: Aplicação no posicionamento relativo GPS**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. p. 30-33.

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**, Vol. 38, 2003. p.1-23.

Gazeta Russa. Disponível em

<http://br.rbth.com/ciencia/2014/06/23/estacoes_do_glonass_serao_instaladas_em_cuba_e_na_nicaragua_26181.html>. Acesso em Dez. 2014.

GPS World. Disponível em <<http://gpsworld.com/first-glonass-station-outside-russia-opens-brazil/>>. Acesso em Dez. 2014.

GPS - Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Disponível em <<http://www.gps.gov>>. Acesso em Dez. 2014.

IBGE-PPP. Posicionamento por Ponto Preciso. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>>. Acesso em Dez. 2014.

- IBGE-PPP. **Manual do usuário: Aplicativo On-line IBGE-PPP**. Versão 2013. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>>. Acesso em Dez. 2014. p.25.
- International Laser Ranging Service**. Disponível em <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/g129_general.html>. Acesso em Dez. 2014.
- MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação Ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013. 148f. 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.
- MONICO, J. F. G.; FRANCESCHI, G.; BOUGARD, B.; AQUINO, M.; SOLEY, M. CIGALA: A FP7 Innovative Activity to Tackle the Threat of Ionospheric Scintillation to GNSS Operations in Latin America. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 64/6, 2012, p.767-779.
- NIS GLONASS**. Disponível em <http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/development_history/>. Acesso em Dez. 2014.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- 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.
- SOUZA, J.S.; ALVES, D.B.M.; VANI, B.C. Estudo do Comportamento da Cintilação Ionosférica em Diferentes Regiões Brasileiras e seu Impacto no Posicionamento GNSS. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**. Aceito para publicação. 2014.
- TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, 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, Yuri; SUBBOTIN, Valeriy; STUPAK, Grigory; DVORKIN, Vyacheslav; POVALYAEV, Alexander; KARUTIN, Sergey. GLONASS: Developing Strategies for Future. **GPS World**, V.22, N. 4, p. 42-49. 2011a.
- URLICHICH, Yuri; SUBBOTIN, Valeriy; STUPAK, Grigory; DVORKIN, Vyacheslav; POVALYAEV, Alexander; KARUTIN, Sergey. BAKITKO, Rudolf GLONASS Modernization. **GPS World**. V. 22, N. 11, p. 34-39. 2011b.
- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. ISMR query tool: retrieval, visualization and analysis of ionospheric scintillation data. 2013. In: **MIMOSA Workshop**: “Supporting Space Weather Activities in South America” in São José dos Campos (Brazil), February 26th. 2013.
- VAZ, J.A.; PISSARDINI, R. S.; FONSECA JUNIOR, E.D. Comparação da cobertura e acurácia entre os sistemas GLONASS e GPS obtidas dos dados de observação de uma estação da rede brasileira de monitoramento contínuo. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 65/3, 2013, p.529-539.
- 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.