

Avaliação do efeito da cintilação ionosférica e de diferentes intervalos de tempo de coleta de dados no posicionamento por ponto preciso na sua forma on-line

RESUMO

O PPP é um método de posicionamento por GNSS que utiliza efemérides precisas, correções dos relógios dos satélites e possíveis modelagens de erros. As possibilidades de aplicações do PPP têm aumentado nos últimos anos, especialmente devido aos serviços *on-line*, destacando-se entre estes IBGE-PPP, GAPS, APPS e RT_PPP. Esses serviços têm sido utilizados em várias pesquisas e aplicações, porém são poucos os experimentos que consideram ocorrência de cintilação ionosférica. Portanto, no estudo realizado foram selecionados dados de duas estações da RBMC em regiões de alta e baixa atividade ionosférica. Utilizou-se dados de duas épocas do ano, com fraca e forte influência da cintilação ionosférica, buscando-se avaliar o desempenho dos serviços de PPP *on-line* em diferentes intervalos de tempo de coleta de dados GNSS e sob a influência da cintilação ionosférica no posicionamento PPP utilizando o *software* RT_PPP. Com os dados disponíveis o IBGE-PPP obteve melhores resultados que os demais *softwares* e o aumento de tempo de coleta de dados melhorou a acurácia do posicionamento. A estação na região sob menor cintilação ionosférica no período de maior atividade ionosférica alcançou resultados mais acurados, entretanto, não se pôde concluir que o motivo foi a cintilação ionosférica.

PALAVRAS-CHAVE: Posicionamento. PPP *on-line*. Cintilação Ionosférica.

Rodrigo Santos Mendes da Rocha

rodrigomrocha@gmail.com
orcid.org/0000-0003-3611-2912
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Gabriel Oliveira Jerez

gabrielojerez@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6893-2144
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Gabriela de Oliveira Nascimento Brassarote

gabriela.2308@hotmail.com
orcid.org/0000-0003-4962-0684
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

João Francisco Galera Monico

galera@fct.unesp.br
orcid.org/0000-0003-4101-9261
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos métodos de posicionamento com GNSS, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) possui cada vez mais destaque e aplicações em diversas áreas. De maneira geral, esse método utiliza as observáveis (fase e/ou pseudodistância) de um único receptor, fazendo uso de efemérides precisas, correções dos relógios dos satélites e modelos para os vários fenômenos físicos que afetam as observações, de modo a obter soluções com acurácia ao nível de poucos centímetros (MONICO, 2008; MARQUES, 2012).

Com a facilidade oferecida pela internet, serviços de PPP na forma *on-line* passaram a ser disponibilizados, muitos deles de forma gratuita, aumentando o número de usuários desse método. Esses serviços *on-line* de processamento oferecem ao usuário as estimativas de posições no modo pós-processamento, a partir das observações do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) enviadas pelo usuário, bem como outras informações técnicas que propiciam a análise do PPP realizado. Entre os diversos sistemas *on-line* oferecidos, está o IBGE-PPP disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o *Automatic Precise Positioning Service* (APPS) do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), o MagicGNSS, desenvolvido pela *GMV Aerospace and Defense S.A.*, o *Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning* (CSRS-PPP) do *Natural Resource Canada* (NRCan), o RT_PPP da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual Paulista – SP (FCT/UNESP), o *Analysis and Positioning Software* (GAPS) desenvolvido pela *University of New Brunswick* (UNB), dentre outros.

Detalhes de uso desses sistemas foram apresentados em vários trabalhos (ALVES et al., 2010; KLEIN et al., 2010). Em geral, esses trabalhos foram direcionados para avaliar o impacto da variação do intervalo de tempo, não contemplando a influência que a ionosfera tem sobre os sinais GNSS. Outro aspecto é que nesses trabalhos não havia a presença de um serviço PPP desenvolvido no Brasil, como é o caso do RT_PPP. Esse serviço de PPP *on-line* é resultado de uma tese de doutorado desenvolvido na FCT/UNESP (MARQUES, 2012), e que disponibiliza ao usuário uma interface com diversas opções de processamento, dentre as quais se destacam: diferentes formas de corrigir as influências provocadas pela troposfera e ionosfera; tipos de observáveis que serão usadas no processamento e suas precisões; possibilidade de uso do modelo de carga oceânica, correção da variação do centro de fase da antena do receptor além de outras opções (MARQUES et al., 2015). No geral, a maioria dos serviços não permite tantas opções para serem selecionadas pelo usuário.

O presente trabalho tem como objetivo complementar os trabalhos anteriores analisando a qualidade das coordenadas resultantes dos processamentos de quatro serviços de PPP na forma *on-line*, IBGE-PPP, GAPS, APPS e RT_PPP, levando em consideração o intervalo de tempo dos dados e a ocorrência de cintilação ionosférica. Para isso foram selecionadas duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) em regiões distintas; PPTe, localizada em Presidente Prudente, região de alta atividade ionosférica, e POAL, em Porto Alegre, região com ionosfera menos intensa. Para avaliar a influência do intervalo de tempo de coleta de dados foram utilizados resultados de erro médio quadrático em três dimensões (EMQ 3d) advindos dos dados dessas estações em duas épocas do ano, com intervalos de coleta de 30 minutos,

1, 3 e 6 horas iniciados esses a partir da 0h (UTC 0). Já na avaliação da influência da cintilação ionosférica nos resultados de EMQ 3d, são processados dados de dois meses de coleta de dados (um mês de baixa cintilação e outro de alta cintilação, segundo o índice S4) do ano de 2013 somente utilizando o *software* RT_PPP. Como as épocas do ano escolhidas são de forte e fraca influência da ionosfera, espera-se melhores resultados na época de menor influência da mesma.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 são apresentados brevemente os fundamentos do PPP sendo essa subdividida pelas diferentes ferramentas *on-line* que foram usadas; a seção 3 introduz a questão ionosférica no artigo e o porquê de ser usada na pesquisa; a seção 4 trata da metodologia aplicada para a obtenção dos resultados; a seção 5 apresenta gráficos de acurácia e faz análises sobre os resultados obtidos perante as diferentes ferramentas *on-line* e intervalos de tempo aplicados; a seção 6 finaliza o artigo ao apresentar as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP)

O posicionamento GNSS possui diferentes metodologias para que seja possível a obtenção das coordenadas de um receptor. A forma mais simples é denominada posicionamento por ponto (PP), ou posicionamento absoluto, geralmente empregando a observável pseudodistância nos cálculos. Pode ser utilizada também a fase da onda portadora, entretanto, como esse tipo de posicionamento geralmente é realizado época-a-época, o uso da fase da onda não aumenta a qualidade da solução para uma única época, que ficou em torno de 10 metros após a desativação da *Selective Availability*, SA (MONICO, 2008).

Alguns métodos de posicionamento foram desenvolvidos a fim de melhorar a acurácia dos levantamentos GNSS. Foram desenvolvidos o DGPS (*Differential Global Positioning System*) e o posicionamento relativo, esse último o mais utilizado atualmente. São métodos que alcançam acurácia superiores ao PP, todavia, esses métodos necessitam de ao menos mais um receptor para que o posicionamento seja realizado, o que diminui o perfil autônomo que os profissionais de posicionamento buscam. Uma alternativa desenvolvida foi o posicionamento por ponto preciso (PPP).

O PPP é um posicionamento com princípio semelhante ao PP, porém o que confere a qualidade a este é o uso de órbitas precisas dos satélites e correções dos relógios dos satélites. As efemérides precisas disponibilizam posição e correção dos erros dos relógios dos satélites (MONICO, 2008). O *International GNSS Service* (IGS) fornece três tipos de efemérides atualmente, as IGU (ultrarrápidas), as IGR (rápidas) e as IGS (finais), respectivamente de menor a maior acurácia. Além das correções das órbitas dos satélites e seus relógios, também é importante a correção dos outros erros que compõem as observáveis GNSS, como ionosfera, troposfera, cargas das marés oceânicas e muitos outros, a fim de um posicionamento PPP de maior acurácia. É recomendável o uso de modelos para minimizar esses efeitos sobre as observáveis GNSS, que podem ser pseudodistância, fase da onda portadora ou ambas, em receptores de simples ou mais de uma frequência. No caso específico do erro referente à ionosfera, tem-se usado como observável de processamento a combinação linear livre da ionosfera

(*ion-free*) em pseudodistância e fase da onda portadora quando se tem disponível dados de dupla frequência, provocando a eliminação do termo referente à ionosfera (SEEBER, 2003). No caso de receptores de simples frequência têm-se usado modelos da ionosfera para a minimização dos erros.

SERVIÇOS PPP ON-LINE

A facilidade de obtenção das órbitas e correções dos relógios dos satélites via internet e, sobretudo, a grande evolução das pesquisas envolvendo o método PPP ao longo dos últimos anos possibilitou o surgimento de serviços *on-line* de PPP. Algumas organizações têm disponibilizado o PPP *on-line* de forma gratuita, o que faz com que esses serviços se tornem cada vez mais populares.

Com essa possibilidade, os usuários do PPP *on-line* podem realizar o processamento de dados GNSS, obtendo posições com acurácia na ordem de poucos centímetros e com grande facilidade de acesso ao serviço. Basta o usuário enviar seu arquivo de dados no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), e o próprio serviço processa os dados e envia os resultados através do endereço eletrônico informado ou então disponibiliza para *download* em sua página na internet (ALVES et al., 2010).

Apresenta-se a seguir uma breve descrição de alguns dos serviços disponíveis atualmente, utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

IBGE-PPP

O IBGE-PPP é uma ferramenta em que os usuários podem enviar os arquivos de observação de dados para os servidores do IBGE que realizam os cálculos. Esses cálculos são efetuados através do *software* CSRS-PPP desenvolvido no NRCan que faz processamentos PPP utilizando observáveis GPS e GLONASS fornecendo as coordenadas e precisões das coordenadas obtidas para os pontos que tiveram seus dados processados em ITRF2008 e em SIRGAS2000 na época do levantamento e na época de referência 2000,4. As precisões são apresentadas sobre o intervalo de confiança de 95%. O IBGE-PPP faz processamentos de dados de simples e dupla frequência, em posicionamento estático ou cinemático (IBGE, 2013).

Para que o processamento dos dados seja realizado é preciso enviar os arquivos de dados nos formatos RINEX ou Hatanaka. A única alteração possível na ferramenta é informar o tipo de antena utilizado e sua altura. As órbitas dos satélites e correções de seus relógios advêm do NRCan, quando os dados são coletados no Brasil, e do IGS, quando coletados fora do território brasileiro. Sempre utilizam as efemérides precisas de melhor qualidade disponíveis no momento, assim como as correções dos relógios.

A ionosfera é corrigida pelo uso da combinação linear *ion-free* quando, além de dados L1, estão disponíveis dados referentes à portadora L2, tanto em fase quanto em código. Se forem utilizados dados de simples frequência o IBGE-PPP faz uma modelagem do efeito da ionosfera utilizando arquivos IONEX (modelo global do IGS), quando disponível, ou faz uso dos coeficientes dos modelos ionosféricos, como Klobuchar, obtidos das efemérides transmitidas. O atraso

troposférico é corrigido através das componentes hidrostática e úmida vinculadas a uma função de mapeamento *Global Map Function* (GMF). O atraso vertical hidrostático é dado pelo modelo de DAVIS e a úmida pelo modelo de Hopfield, a partir das informações de temperatura e pressão advindas do *Global Pressure and Temperature* (GPT). São feitas também correções do DCB (*Differential Code Bias*) das ondas L1 e L2, correção dos centros de fase dos satélites e dos receptores, utilização do modelo de carga oceânica FES2004 (IBGE, 2013).

AAPS

Opção de processamento PPP disponibilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o AAPS é uma ferramenta *on-line* na qual um usuário pode fazer processamentos PPP modo estático ou cinemático sendo que no segundo é necessário que o usuário faça um cadastro gratuito no serviço.

O AAPS é um serviço do *Global Differential GPS* (GDGPS) que é um sistema de monitoramento em tempo real rastreando dados dos sinais GPS, provido pelo JPL que utiliza a rede GPS global da NASA para dar suporte a diversas atividades na Terra e no espaço, como geração de efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites. Atualmente o AAPS faz o processamento utilizando o *software* GIPSY-OASYS 6.3.

O AAPS sempre busca utilizar as efemérides precisas mais acuradas disponibilizadas pelo JPL, sendo usadas as finais quando se tem aproximadamente 10 dias de latência dos dados, as rápidas aproximadamente com 1 dia de latência, e em PPP em tempo real utiliza-se das efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites disponibilizadas pelo próprio sistema GDGPS com latência aproximada de 1 minuto. O PPP em tempo real é um serviço pago (GDGPS, 2016).

O usuário, ao enviar seus dados, poderá escolher utilizar o código C/A ou P da onda portadora L1, usar dados de pressão para modelagem do atraso troposférico (usada principalmente para melhorar a acurácia em posicionamentos cinemáticos) que utiliza como função de mapeamento o GMF. Inferir peso nas observáveis em função do ângulo de elevação incidente, escolher qual a máscara de elevação e a cada quanto tempo será dada uma solução, coordenada. Em atividades cinemáticas também existem outras possibilidades de configuração.

Ao serem processados os dados, o usuário obtém arquivos contendo as principais estratégias utilizadas no PPP. Também há arquivos contendo as coordenadas finais e desvio-padrão das coordenadas estimadas, dados sobre atraso troposférico, relógio do receptor, e a matriz variância-covariância completa do processamento.

GAPS

O GAPS é o serviço *on-line* de processamento PPP provido pela UNB. Esse projeto foi inicialmente desenvolvido em 2007 como uma ferramenta gratuita para que os usuários pudessem se posicionar seus levantamentos de forma

simples, apenas importando seus dados, informando se é um posicionamento estático ou cinemático e opcionalmente escolhendo a máscara de elevação e coordenadas aproximadas do ponto. Esse é o modo básico, onde o próprio *software* fará a otimização do posicionamento buscando os produtos que, em teoria, fornecerão o melhor posicionamento e que estejam disponíveis.

Além do modo básico há o modo avançado no qual o usuário pode escolher uma gama de especificações, como: quais efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites dentre os produtos IGS e NRCan irão ser utilizadas; quais observáveis básicas serão processadas para gerar a *ion-free*, tendo inclusive a possibilidade do uso do código L2C e da onda portadora L5. Também pode ser escolhido qual o modelo de atraso zenital troposférico a ser aplicado (dentre VMF1, UNB3m, outros) e sua função de mapeamento (Vienna e Niell); modelagem do efeito da carga das marés oceânicas sobre a crosta terrestre e outras funcionalidades. Quando disponível dados de dupla frequência, a observável utilizada é a *ion-free* (GAPS, 2016).

O GAPS fornece coordenadas no ITRF2008 na época do levantamento, em um arquivo que, também, informa quais foram as configurações utilizadas e diversos gráficos para a análise visual da qualidade obtida. Além desse arquivo, tem-se vários outros contendo valores dos diversos *Dilution of Precision* (DOP), de multicaminho, de atraso troposférico, coordenadas, dentre outros elementos que são dados a cada época.

O GAPS processa somente dados GPS e garante acurácia na ordem dos centímetros, dependendo do intervalo de tempo de coleta de dados para dados estáticos e na ordem dos decímetros em dados cinemáticos.

RT_PPP

Marques (2012), em sua tese de doutorado desenvolveu um software de processamento PPP em tempo real, o RT_PPP, na FCT/UNESP (Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual Paulista - SP). Poucos anos depois esse mesmo *software* foi disponibilizado de maneira *on-line* para o processamento de dados GPS no modo pós-processado.

O RT_PPP *on-line* permite ao usuário escolher diversas configurações, tais como: observáveis que serão usadas no processamento (C/A, C/A e L1, C/A e P2, C/A P2 L1 e L2, pseudodistância filtrada pela fase) e suas precisões; forma de correção da ionosfera, troposfera, se será usado modelo de carga oceânica, correção da variação do centro de fase da antena do receptor e outras opções, todas essas no modo estático ou cinemático.

Ao ser escolhida a opção que envolva as medidas de fase e pseudodistância das portadoras L1 e L2, caso não esteja disponível o código P2, o RT_PPP utiliza o código L2C e aplica as correções de DCB. A ionosfera pode ter seu efeito de primeira ordem eliminado se utilizada a combinação *ion-free*, ter correções advindas do modelo de Klobuchar ou de mapas globais de ionosfera (GIM) ou mesmo ser estimada no ajustamento dos dados. O atraso troposférico pode ser estimado via *randomwalk* ou pelos modelos de Hopfield, PNT do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), PNT Europeu (ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) com a utilização da *Vienna Mapping Function* (VMF) como função de mapeamento troposférico ou

estimar o atraso troposférico no ajustamento dos dados. São usadas efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites advindos do IGS e as observáveis ganham peso seguindo o inverso do seno do ângulo de elevação.

Os produtos gerados mostram as informações de entrada fornecidas pelo usuário através da importação do RINEX; resultados em cada época como as coordenadas estimadas, precisões e outros. As configurações escolhidas nos processamentos de dados e os resultados finais também são mostrados, além de gráficos de troposfera, discrepância no sistema geodésico local (SGL) e precisões do processamento dos dados.

Por mais que seja sabido que o uso da *ion-free*, modelo de cargas oceânicas, correção dos centros de fase, e outros, proporcionam maior acurácia ao processamento, o RT_PPP tem como público-alvo profissionais com maiores conhecimentos técnicos para a correta manipulação das especificações no processamento, o que pode permitir diversos tipos de pesquisas (o mesmo pode ser dito sobre o GAPS em seu modo avançado).

IONOSFERA E CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

A atmosfera terrestre tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, podendo provocar variações em sua direção de propagação, velocidade de propagação, polarização e em sua potência. Esses efeitos podem degradar a qualidade da observável GNSS e, conseqüentemente, a acurácia do posicionamento (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003).

A atmosfera, em relação à propagação do sinal GNSS, pode ser dividida em: troposfera e ionosfera, sendo a ionosfera uma das principais fontes de erro sistemático no posicionamento, principalmente para usuários de receptores de simples frequência (CAMARGO, 1999).

A magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende da frequência do sinal e é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content*), que consiste no número de elétrons presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal. O TEC é sensível a variações em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor entre o satélite e o receptor (CAMARGO, 1999). Além disso, na ionosfera existem anomalias e irregularidades que afetam a propagação do sinal GNSS, como a anomalia equatorial, tempestades geomagnéticas, bolhas ionosféricas e a cintilação ionosférica (MATSUOKA, 2007).

A cintilação ionosférica consiste em mudanças bruscas na fase e amplitude do sinal de rádio recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, enfraquecendo o sinal recebido pelos receptores GNSS, podendo ocasionar em muitos casos a degradação ou até mesmo perda do sinal (CONKER et al., 2003).

Os efeitos da cintilação são mais severos na região equatorial do planeta, seguida pelas regiões de altas latitudes (principalmente nos polos) e por fim as de médias latitudes. Nas regiões equatoriais os efeitos da cintilação são relacionados à anomalia equatorial. No entanto, a formação de bolhas ionosféricas em larga escala nesta região, logo após o pôr-do-sol, podem aumentar a ocorrência de cintilação ionosférica. A ocorrência de bolhas ionosféricas é muito mais frequente

durante o período de alta atividade solar, sendo o local de maior ocorrência o equador geomagnético onde elas podem chegar a picos maiores que 1500 km (MATSUOKA, 2007).

A cintilação ionosférica pode ser classificada de acordo com diversos índices, entre esse os índices S são bastante apropriados, sendo o índice S4 um dos mais utilizados (MENDONÇA, 2013). Na Tabela 1 é apresentada a classificação sugerida por Tiwari et. al. (2011).

Tabela 1 – Classificação do índice S4

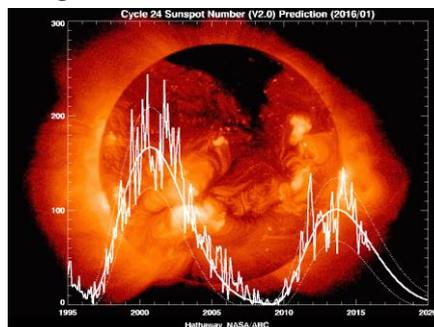
S4	Classes
$S4 > 1$	Forte
$0,5 < S4 < 1$	Moderada
$0 < S4 < 0,5$	Fraca

Fonte: Tiwari, et. al. (2011).

O Brasil, por possuir grande parte de seu território situado no equador geomagnético, sofre intensos efeitos da cintilação ionosférica. Em cenários críticos, caracterizados por fraca cobertura de satélites e incidência de cintilação, pode-se ocorrer a perda do serviço de posicionamento, o que prejudica atividades que dependam deste tipo de serviço, como a navegação aérea e agricultura de precisão. O período que chega aos maiores índices de cintilação é, aproximadamente, de setembro a março. Já os índices mínimos ocorrem durante os meses de abril a agosto.

A magnitude e a frequência da cintilação estão ainda correlacionadas com os ciclos solares (SILVA et al., 2012). Os ciclos solares ocorrem em intervalos de 11 anos, sendo que o último pico ocorreu no final de 2013 e início de 2014, o que torna o período propício para estudos sobre o tema. A Figura 1 apresenta os ciclos solares de 11 anos a partir de 1995.

Figura 1 - Ciclos solares de 11 anos



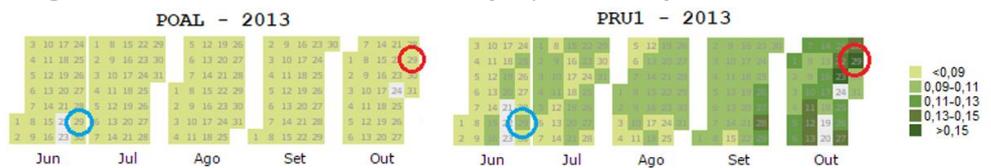
Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>.

METODOLOGIA

Para o presente trabalho o objetivo é a avaliação do desempenho de *softwares on-line* de PPP, bem como a influência da cintilação ionosférica nesse método, considerando ainda o intervalo de tempo dos dados. Para isso foram escolhidas duas estações da RBMC em regiões distintas em relação à atividade ionosférica. Foram utilizados os dados da estação PPTe, localizada em Presidente Prudente, e da estação POAL, localizada em Porto Alegre.

Além da variação regional dos efeitos ionosféricos, foi escolhido o ano de 2013 no qual ocorreu o pico do último ciclo solar de 11 anos (Figura 1). Também se considerou a variação anual das atividades ionosféricas, a partir dos dados disponíveis das estações da Rede CIGALA/CALIBRA (Disponível em: <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/>>) que possuem estações próximas as localidades das estações da RBMC selecionadas para fins de cintilação ionosférica. Esta rede conta com estações de monitoramento da ionosfera e permite a visualização dos dados coletados a partir da ferramenta disponível *on-line*. A partir desta ferramenta é possível acessar um calendário com os índices de cintilação para cada estação, conforme Figura 2 (VANI et al., 2016).

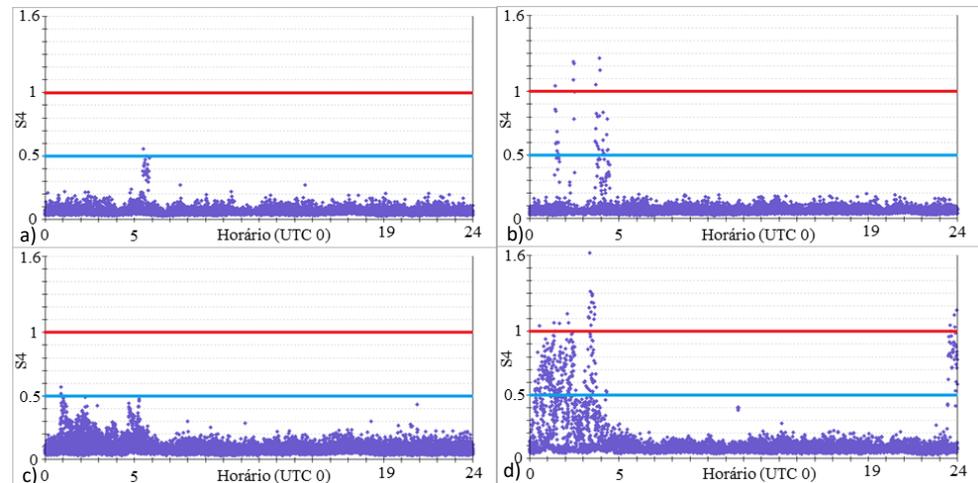
Figura 2 - Calendário dos índices de cintilação para as estações POAL e PRU1 em 2013



Fonte: <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/calendar-view/index.php>

A partir dessas informações, foram selecionados os dias 29 de junho (*day of year – doy – 180*) e 29 de outubro (*doy 302*), para a análise quanto ao intervalo de tempo de coleta de dados. O motivo da escolha desses dias é para verificar se, mesmo estando em condições ionosféricas diferentes, a melhoria da acurácia (através do EMQ 3d) ocorre quando aumentado o intervalo de tempo de coleta de dados. As diferenças das condições ionosféricas são mostradas na Figura 3, advinda de uma ferramenta ISMR Query Tool (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/>) que permite gerar gráficos dos índices de cintilação para as estações, como, por exemplo, o índice S4.

Figura 3 – Índices S4 para as estações: a) POAL dia 29/06/2013; b) POAL dia 29/10/2013; c) PRU1 e PRU2 dia 29/06/2013; d) PRU1 dia 29/10/2013

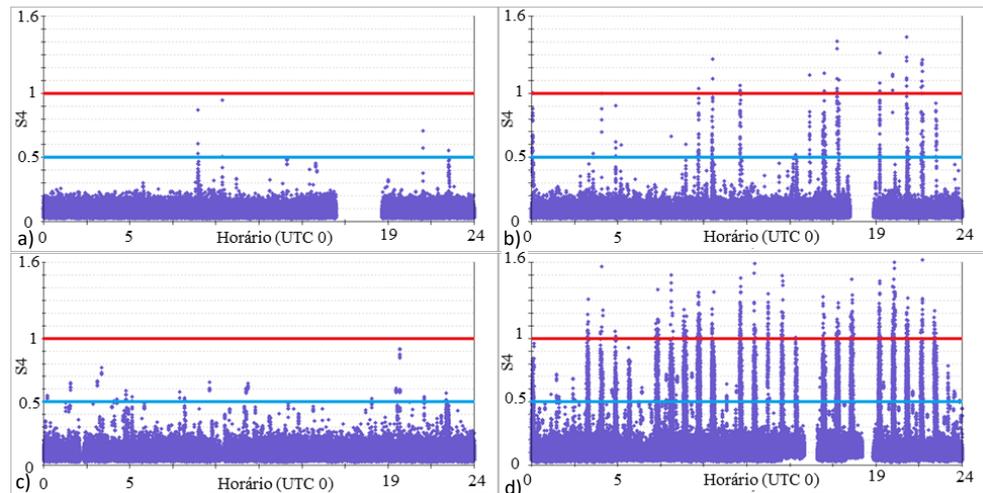


Nos gráficos presentes em Figura 3a e Figura 3b são apresentados os índices S4 de 29 de junho e 29 de outubro da estação POAL, e nos gráficos presentes em Figura 3c e Figura 3d os índices S4 em 29 de junho e 29 de outubro das estações PRU1 e PRU2 (são escolhidas as duas estações em Presidente Prudente pois em alguns dias foi verificado falta de dados em PRU1). Os gráficos foram gerados com máscara de elevação de 30 graus para minimizar os efeitos de multicaminho. A partir dos gráficos ficam evidentes não só a relação do comportamento da cintilação ionosférica com a região da estação, como também a variação diária, inclusive em uma estação de região com ionosfera mais estável, estação POAL. Vale lembrar que, de acordo com Tiwari et al. (2011), valores de S4 entre 0,5 e 1,0 já são considerados moderados e, acima de 1,0 correspondem a forte cintilação. A fim de facilitar a visualização são apresentadas as linhas azul e vermelha na Figura 3, para delimitar o início de índice S4 moderado e forte, respectivamente. Os intervalos de coleta de dados utilizados foram de 30 minutos, 1, 3 e 6 horas, iniciados à 0h (UTC 0). As edições dos arquivos RINEX foram realizadas com o editor TEQC da UNAVCO (Disponível em: <www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>), no qual foram mantidos os 15 segundos de taxa de gravação de dados GNSS dos arquivos advindos da RBMC e utilizadas as ondas portadoras L1 e L2.

O processamento dos dados GNSS na análise quanto ao intervalo de tempo de coleta de dados foi realizado nos *softwares on-line* IBGE-PPP, APPS, GAPS e RT_PPP. Para todos os casos, considerou-se máscara de elevação de 10 graus. Cada *software* tem suas especificidades de processamento, conforme citado na seção 2.1. O IBGE-PPP e o APPS não permitem muitas configurações e buscam automaticamente o que consideram ser a melhor estratégia de processamento possível perante os dados que têm e a latência desses. O GAPS e RT_PPP permitem a um usuário mais avançado várias configurações. A fim de padronizar os processamentos, foram utilizadas as configurações padrão de cada *software*, sendo inclusive no GAPS utilizado o modo básico. Essa escolha se deu pois não seria possível padronizar todas as ferramentas *on-line* para processar os dados sob as mesmas condições e, ao utilizar a configuração padrão, as análises privilegiam o que cada *software* escolhe para processar os dados e qual seria o resultado encontrado da forma mais simples possível de processamento.

Para a análise quanto a influência da cintilação ionosférica, concluiu-se que apenas esses dois dias de amostra não seriam suficientes para essa investigação. Devido a isso resolveu-se, primeiramente, por investigar o índice S4 ao longo do mês de junho e outubro de 2013 nas estações POAL e PPTe. A Figura 4 mostra os resultados do índice S4 durante esses dois meses.

Figura 4 - Índices S4 para as estações a) POAL mês de junho; b) POAL mês de outubro; c) PRU1 e PRU2 mês de junho; d) PRU1 e PRU2 mês de outubro



Dos gráficos presentes na Figura 4a e Figura 4b, em Porto Alegre, e Figura 4c e Figura 4d, em Presidente Prudente, podem ser verificados comportamentos semelhantes aos citados para as Figura 3, onde em outubro são encontrados maiores valores de índice S4 do que no mês de junho, para ambas as estações e os valores do índice S4 em Presidente Prudente, especialmente no mês de outubro, são maiores do que os advindos de Porto Alegre.

Feitas as comparações entre os valores do índice S4, a análise quanto a influência da cintilação ionosférica foi feita através de processamentos de dados de todos os dias desses dois meses, com intervalos de coleta a cada 30 minutos ao longo de cada dia, pois espera-se que, com o aumento do intervalo de coleta de dados, a acurácia do levantamento melhora, e, portanto, intervalos maiores propiciariam que os erros nos sinais GNSS devido a cintilação ionosférica fossem eliminados e assim não contemplassem a análise proposta. Esse estudo foi feito utilizando somente o RT_PPP, pois, por ser um *software* pertencente às pesquisas realizadas na FCT/UNESP, permitiu a automatização dos processamentos. Essa automatização foi implementada em *scripts bash*, para o cálculo de todos os 48 processamentos PPP em cada dia, ao longo dos 61 dias para as duas estações, e *scripts python*, que realizou os cálculos de EMQ 3d e geração dos gráficos de EMQ 3d ao longo de um dia e também para o comportamento horário do EMQ 3d ao longo dos dias. Nesse *script python*, utilizou-se a biblioteca *matplotlib* para gerar os gráficos de EMQ 3d. Para minimizar a possibilidade de erros devido ao multicaminho foi escolhido 15 graus de máscara de elevação. O ideal era que essa angulação fosse maior, todavia, ao aumentar mais do que 15 graus a máscara de elevação, muitos dos processamentos não tinham observáveis suficientes, pois muitos dos satélites eram eliminados.

Para realizar os cálculos do EMQ 3d são necessários os valores de discrepâncias. Esse cálculo foi possível ao considerar como coordenadas de referência as coordenadas oficiais das estações POAL e PPTe (dados nos descritivos das estações fornecidas pelo IBGE) atualizadas para os dias das observações no ITRF2008. As coordenadas das duas estações na época 2000,4 no ITRF2008 e as velocidades no ITRF2008 das estações foram obtidas utilizando o *software on-line* TREVel, desenvolvido na FCT/UNESP (PROL et al., 2014). Com esses valores foram possíveis os cálculos das coordenadas de referência para cada dia.

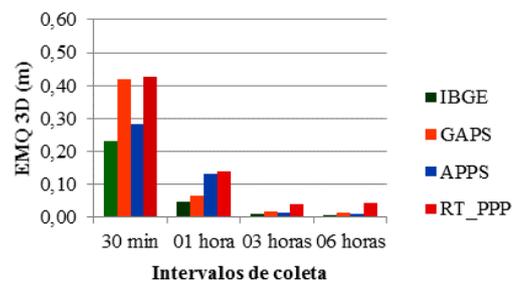
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado na seção anterior, os resultados são divididos em duas partes: quanto a influência do intervalo de tempo de coleta de dados, na seção 5.1, e quanto a influência da cintilação ionosférica, na seção 5.2.

INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES INTERVALOS DE TEMPO DE COLETA DADOS

Os EMQs 3d são apresentados por estação para cada um dos dias de coleta de dados e nos diferentes intervalos de tempo de coleta de dados para cada *software*. Foi escolhida como forma de apresentação gráficos que sintetizam os resultados obtidos de EMQ 3d nos diferentes processamentos de dados GNSS. Isso facilita a visualização dos resultados a fim de comparações, todavia, alguns valores das tabelas que resultaram os gráficos são citados. Adianta-se que o maior contribuinte para os valores de EMQ 3d obtidos nos gráficos presentes na Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 são resultantes da discrepância entre as coordenadas finais dos processamentos e daquela tida como referência, calculada da extrapolação das coordenadas das estações da RBMC para as épocas dos levantamentos, pois todos os desvios-padrão obtidos são condizentes, ao nível centimétrico ou decimétrico (quanto maior o intervalo de tempo de coleta de dados, maior a precisão indicada pelo desvio-padrão). A Figura 5 apresenta os valores obtidos para a estação POAL para o dia 29/06/2013.

Figura 5 – EMQ 3d dos resultados da estação POAL para o dia 29/06/2013

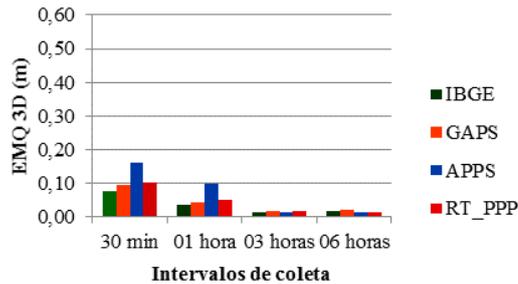


Devido ao intervalo de coleta de dados, nota-se a melhora nos resultados conforme se aumenta o tempo. É possível verificar ainda que o grau de melhora tende a decair à medida que os resultados vão se estabilizando, isso é possível de ser observado ao se verificar a melhora do primeiro para o segundo intervalo, e os demais com melhorias mais discretas. Analisando os *softwares*, o IBGE-PPP apresentou melhores desempenhos, especialmente nos dois processamentos de

dados mais curtos. Na coleta de 30 minutos, GAPS e RT_PPP ultrapassaram os 40 centímetros de EMQ 3d, porém, já com 1 hora, os valores estiveram muito próximos aos 10 centímetros. O APPS também ultrapassou os 10 centímetros ligeiramente nesse intervalo de coleta. A partir das 3 h de coleta de dados, todos os processamentos mantiveram-se abaixo do decímetro.

Na Figura 6 são apresentados os resultados da estação POAL para o dia 29/10/2013.

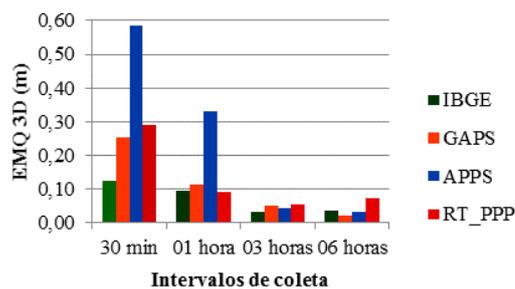
Figura 6 – EMQ 3d dos resultados da estação POAL para o dia 29/10/2013



Os gráficos mostrados pela Figura 6 acompanham a tendência de diminuição do EMQ 3d com o aumento do intervalo de coleta. Pode ser observado que todos os valores com 3 h de rastreo apresentaram EMQ 3d menores que 5 centímetros. Nesse experimento é visto que o IBGE-PPP também obteve resultados melhores que os demais. O GAPS saiu-se melhor na comparação com os outros dois *softwares* restantes. O RT_PPP ultrapassou o limiar dos 10 centímetros levemente no processamento de dados com 30 minutos de coleta, 10,1 centímetros. O APPS alcançou 16,3 centímetros de EMQ 3d com 30 minutos de rastreo de dados, sendo esse o maior valor encontrado em todos os processamentos de dados para esse dia.

A seguir são apresentados na Figura 7 os resultados para a estação PPTe.

Figura 7 – EMQ 3d dos resultados da estação PPTe para o dia 29/06/2013



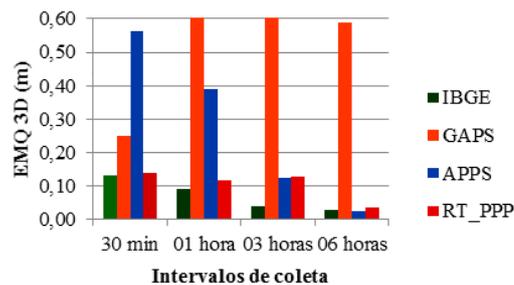
Segundo o gráfico da Figura 7 é possível observar um valor de EMQ 3d muito maior nos processamentos realizados utilizando o APPS. Nos dois processamentos de dados de menor tempo de coleta, esse *software* alcançou os piores resultados quando comparados com os outros serviços *on-line* analisados. O APPS alcançou, aproximadamente, 58 e 33 centímetros de EMQ 3d, para os dois menores intervalos tempo de coleta de dados. Os outros *softwares* para 30 minutos de coleta não ultrapassaram os 30 centímetros. Com uma hora, todos os outros *softwares* estavam bem próximos do EMQ 3d de 10 centímetros.

GAPS e RT_PPP tiveram quase todos os resultados dos processamentos de dados muito próximos. A partir das 3 horas de coleta de dados todos os resultados estiveram abaixo dos 10 centímetros e semelhantes entre si

Mais uma vez o *software* que se destacou foi o IBGE-PPP que, mesmo com 30 minutos de coleta de dados, já obteve valores de EMQ 3d próximos aos 10 centímetros.

A Figura 8 apresenta os resultados estimados para estação PPTe no dia 302.

Figura 8 – EMQ 3d dos resultados da estação PPTe para o dia 29/10/2013



Ao examinarmos os resultados da Figura 8 são encontrados valores muito semelhantes no processamento de 30 minutos a partir da 0h quando comparamos com o processamento da Figura 7. Somente o RT_PPP se diferenciou, por ter alcançado o valor de 13,8 centímetros, ao invés dos quase 30 centímetros observados anteriormente. Com 1 hora de coleta é observada uma redução de todos os valores de EMQ 3d dos *softwares*, menos do GAPS que ultrapassou 1,40 metro. Altos valores são encontrados para esse *software* também nos processamentos de 3 e 6 horas, 1,89 e 59 centímetros, respectivamente. Esses resultados não são mostrados no gráfico pois optou-se por mantê-los fixados em até 60 centímetros no eixo das ordenadas para mais fácil comparação com os demais gráficos. Não é sabido o que resultou esses altos valores no processamento via GAPS, todavia, praticamente todo esse valor advém da discrepância, que atingiu valores muito próximos aos citados de EMQ 3d.

Para os outros três *softwares* os resultados foram melhorando gradativamente ao aumentar o intervalo de coleta, onde, novamente o IBGE-PPP saiu-se melhor. Com 3 horas de coleta esses três *softwares* alcançaram os valores de acurácia esperados de um posicionamento PPP.

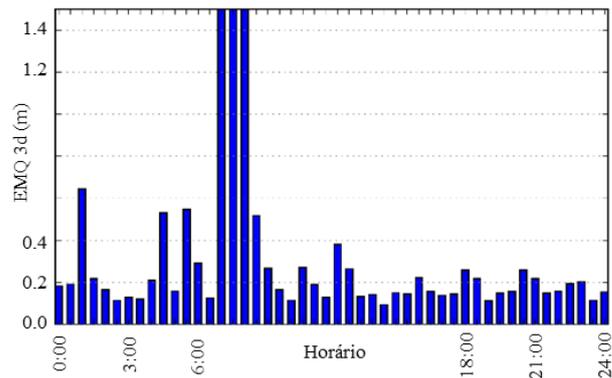
INFLUÊNCIA DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

A análise quanto a influência ionosférica no processamento de dados GNSS com coletas de 30 minutos resultaram em 122 gráficos diários e 192 gráficos de hora em hora do comportamento do EMQ 3d. Devido ao grande volume de dados envolvidos, somente os mais relevantes serão comentados.

A primeira percepção é de que alguns dias apresentaram o EMQ 3d muito alto devido ao baixo número de observáveis disponíveis. Como exemplo tem-se o dia 12/06/2013, em POAL, que apresentou nas coletas entre 7:00h a 7:30h e 7:30h a 8:00h EMQ 3d acima dos 11 metros. Quando examinados os resultados

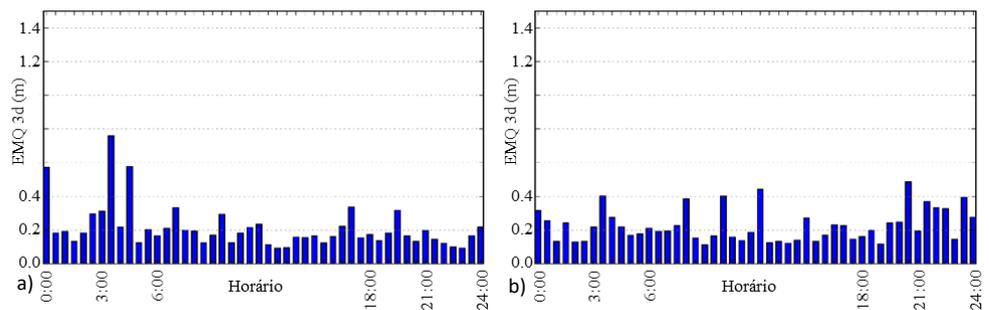
dos processamentos de dados nesse horário é observado que os desvios-padrão obtidos nas componentes cartesianas alcançou entre os 3,6 metros até os 10 metros, pois apenas uma época estava disponível para o processamento. As outras não puderam ser processadas pois foram eliminadas pela máscara de elevação adotada de 15 graus. Devido a esse problema somente resultados com o EMQ 3d abaixo de 1 metro serão considerados nesse estudo. A Figura 9 mostra o gráfico do citado dia onde é percebido que durante três períodos de coleta de dados o EMQ 3d excedeu o limite imposto ao gráfico.

Figura 9 – EMQ 3d do dia 12/06/2013 em POAL



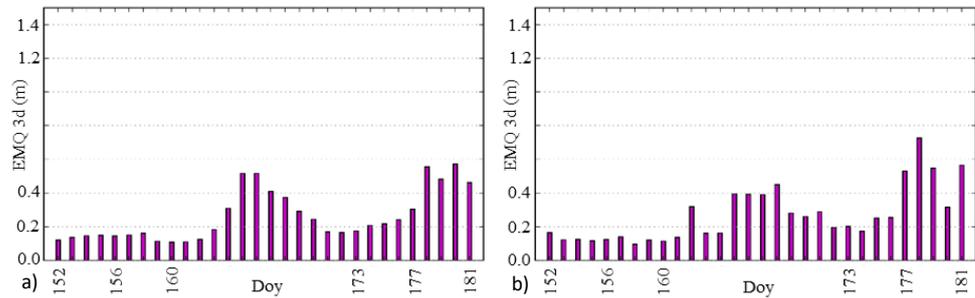
Excluído os citados processamentos de dados GNSS via PPP, os processamentos do mês de junho em sua maioria apresentam EMQ 3d semelhantes ao longo do dia e nas duas estações. Nesse mês a cintilação é mais fraca, como já mostrada pela Figura 4a e Figura 4c. Como exemplo, são mostrados os gráficos de EMQ 3d referente ao dia 29 de junho nas duas estações na Figura 10.

Figura 10 – EMQ 3d do dia 29/06/2013 em: a) POAL; b) PPTTE



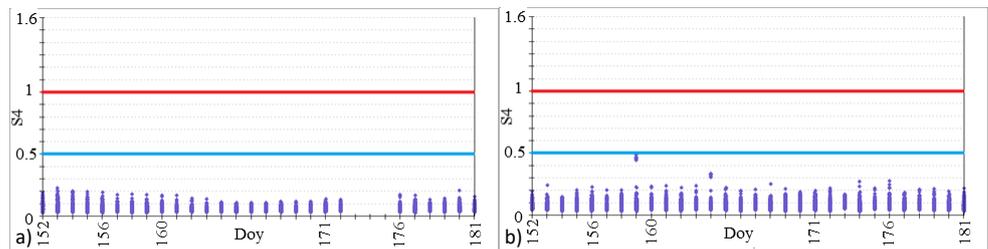
Esses gráficos mostram que nenhuma das estações ultrapassou o EMQ 3d de 1 metro, onde inclusive o maior valor encontrado foi no processamento referente a coleta de dados no intervalo de tempo entre 3:30 h a 4:00 h (UTC 0) na estação POAL. Todavia, essa piora na acurácia obtida provavelmente não se refere a cintilação ionosférica, pois, segundo o gráfico presente na Figura 3b, não ocorreram altos valores de cintilação na região durante esse horário. Considerando os horários após o pôr-do-sol, e estando as estações no fuso horário UTC -3, pode-se utilizar o horário de 0:00 h a 0:30h para verificar o comportamento EMQ 3d para todo o mês de junho em ambas as estações.

Figura 11 – EMQ 3d das coletas de dados entre 0:00 h a 0:30 h no mês de junho na estação: a) POAL; b) PPTe



Os gráficos da Figura 11 se assemelham e considerações podem ser feitas a partir do índice S4. Podemos analisar os gráficos presentes na Figura 12 no qual são apresentados os índices S4 somente no intervalo de tempo entre 0:00 h e 0:30 h ao longo do mês de junho de 2013 em ambas as estações (os espaços em branco no gráfico referente a POAL significam que não houve coleta de dados nos respectivos dias). Esses gráficos mostram que não ocorreu diferença significativa no índice S4 nas estações para essa época do ano, o que nos indica que os resultados alcançados têm mais influência das próprias amostras envolvidas no cálculo das coordenadas do que da cintilação ionosférica.

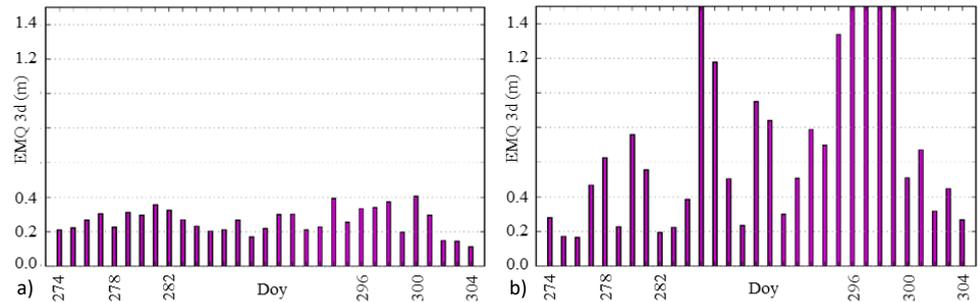
Figura 12 – Índice S4 do mês de junho entre 0:00 h a 0:30 h em: a) POAL; b) PRU1 e PRU2



O comportamento do índice S4 e do EMQ 3d durante esse mês de junho se mantém semelhantes aos outros horários próximos ao pôr-do-sol. Ao mudar a análise quanto a um horário de menor influência da cintilação ionosférica no processamento de dados, como em horários próximos ao meio-dia no local, os valores de EMQ 3d também se mantém estáveis, porém um pouco abaixo dos valores mostrados na Figura 11.

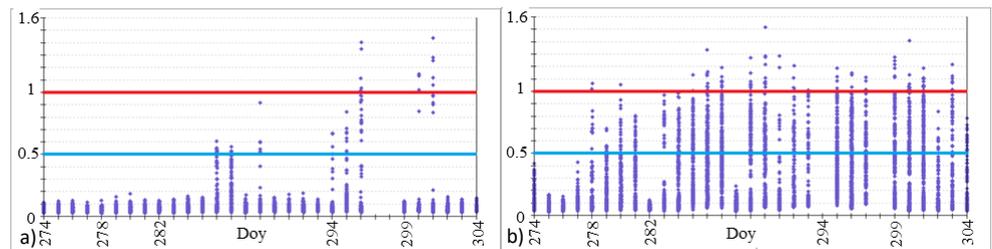
Utilizando o período entre 0:00h e 0:30h de coleta de dados para análise quanto o EMQ 3d nas duas estações, porém no mês de outubro de 2013 tem-se a Figura 13a, em POAL, e Figura 13b, em PPTe. Nessas são observados maiores valores de EMQ 3d dos processamentos de dados advindos de PPTe.

Figura 13 – EMQ 3d para coletas de dados entre 0:00 h a 0:30 h no mês de outubro na estação: a) POAL; b) PPTe



Os gráficos para outros horários que estão próximos ao pôr-do-sol local das estações mantém o mesmo padrão apresentado pela Figura 13, ou seja, o gráfico EMQ 3d em POAL mantém-se com comportamento mais regular, enquanto o de PPTe apresenta picos superiores a 1 metro. A Figura 14 mostra o índice S4 em POAL e PPTe para o horário de 0:00 h a 0:30 h com máscara de elevação de 30 graus.

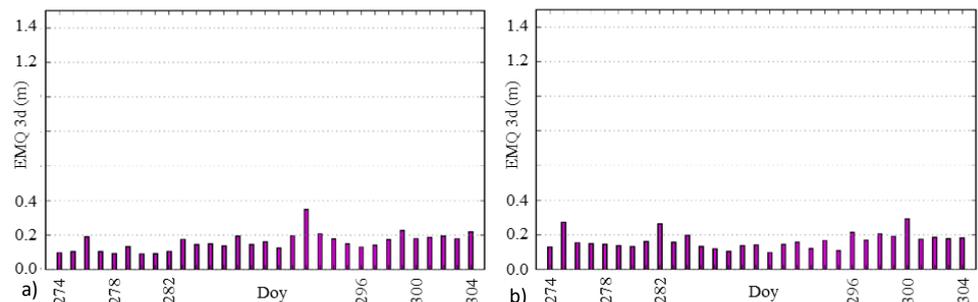
Figura 14 – Índice S4 do mês de outubro entre 0:00 h a 0:30 h em: a) POAL; b) PRU1 e PRU2



Segundo a Figura 14 a cintilação ionosférica em PPTe no intervalo de tempo proposto é maior do que o observado em POAL. Além disso, ambas as estações apresentam maiores valores se comparados com os gráficos referentes a junho de 2013.

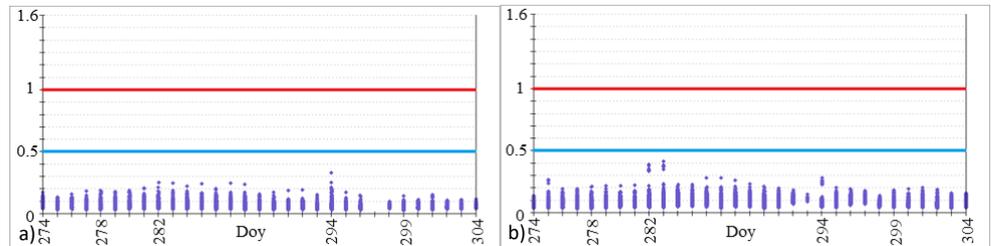
Quanto ao horário próximo ao meio-dia local, como processamentos PPP das coletas de dados GNSS entre 15h e 15:30 h (UTC 0), é observado que o EMQ 3d assentou em ambas as estações para esse mês de outubro, conforme observado pela Figura 15.

Figura 15 – EMQ 3d para coletas de dados entre 15:00 h a 15:30 h no mês de outubro na estação: a) POAL; b) PPTe



Como na Figura 15 apresentou diminuição do EMQ 3d para esse intervalo de tempo de coleta de dados em ambas as estações, foi verificado se essa diminuição está de acordo com o índice S4 das estações durante o mesmo horário, apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Índice S4 do mês de outubro entre 15:00 h a 15:30 h em: a) POAL; b) PPTE



A Figura 16 mostra que houve uma diminuição significativa do índice S4 em POAL e especialmente PPTE durante o intervalo de tempo entre 15:00 h e 15:30 h. Nesse período de tempo o S4 observado é muito próximo àquele mostrado pela Figura 12, no qual os valores estão abaixo inclusive do limiar de cintilação ionosférica moderada.

Porém, esse maior índice S4 não pode ser conclusivo para atestar que a cintilação ionosférica foi o maior responsável por altos valores EMQ 3d em PPTE pois, ao examinar a quantidade de processamentos das épocas de diversos dias e horários em PPTE durante o mês de outubro em intervalos de coletas de dados próximos ao pôr-do-sol, foi visto que uma quantidade considerável de épocas não foram processadas, a exemplo do ocorrido no dia 12/06/2013 em POAL entre às 7:00 h e 8:00 h, mostrado pela Figura 9. Devido a isso resolveu-se por analisar se, ao retirar determinados satélites do processamento de dados que tiveram suas observáveis com maiores índices S4 em PPTE, ocorre uma melhoria do EMQ 3d. A Tabela 2 mostra as diferenças entre os EMQ 3d nos processamentos de dados utilizando todos os satélites disponíveis e retirando o satélite com o maior índice S4 observado, durante o intervalo de tempo entre 0:00 h e 0:30 h no mês de outubro em PPTE. Valores negativos indicam degradação do resultado ao retirar satélites.

Tabela 2 – Discrepância do EMQ 3d entre processamentos originais e o processamento ao retirar o satélite com maior índice S4 durante o intervalo de tempo entre 0:00 h e 0:30 h no mês de outubro em PPTe

Doy	EMQ 3d			Doy	EMQ 3d		
	Sat. Cortado	Original	Discrepância		Sat. Cortado	Original	Discrepância
278	0,9307	0,6258	-0,3049	290	1,5464	0,8409	-0,7055
280	1,5794	0,7594	-0,8201	291	1,6018	0,2988	-1,303
281	1,3621	0,5549	-0,8071	292	4,927	0,5062	-4,4208
283	1,2794	0,2243	-1,055	297	6,7837	13,5184	6,7347
284	2,126	0,3851	-1,7409	299	2,9695	2,3672	-0,6023
285	0,7474	14,0811	13,3337	300	0,7927	0,509	-0,2837
286	1,9856	1,1768	-0,8089	301	0,7995	0,6712	-0,1283
287	2,4355	0,5042	-1,9313	302	0,4299	0,3175	-0,1124
288	2,4355	0,2335	-2,2019	303	0,596	0,4476	-0,1484
289	1,4455	0,9495	-0,496	304	0,433	0,2661	-0,167

Conforme aponta a Tabela 2, houve uma piora na maioria dos processamentos quando foram retirados satélites com maiores índices S4 do processamento de dados PPP. Inclusive, nos *doy* 274, 275, 276, 277, 279, 282, 293, 294, 295, 296 e 298, quando retirado o satélite que apresentou maior índice S4, não foi possível o cálculo do PPP pelo RT_PPP. Isso significa que, ao retirar os satélites mais propensos a degradar o posicionamento PPP devido a cintilação ionosférica, a acurácia do posicionamento foi piorada por terem poucas observáveis disponíveis para ser feito o posicionamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O artigo teve como intuito avaliar quatro dos sistemas de PPP *on-line* disponíveis atualmente e, além disso, investigar a influência do intervalo de tempo de coleta e ações ionosféricas no posicionamento GNSS.

Para a realização das análises quanto a diferentes intervalos de tempo foram escolhidas as estações POAL e PPTe que sofrem menor e maior influência ionosférica, respectivamente, devido as suas localizações. A escolha do ano 2013 foi por este ter sido o pico do último ciclo solar. Foram usados dados de duas datas diferentes, uma em junho e a outra em outubro nos quatro *softwares on-line* (IBGE-PPP, GAPS, APPS e RT_PPP). Esses meses foram escolhidos por serem de menor (junho) e maior (outubro) atividade de cintilação ionosférica. Para a escolha dos dias foram utilizados os índices S4 que tem alta correlação com a ocorrência de cintilação ionosférica. Os intervalos de tempo de coleta dos dados escolhidos foram de 30 minutos, 1, 3 e 6 horas.

Praticamente todos os resultados calculados a partir de 3 horas de rastreo obtiveram resultados satisfatórios de EMQ, estando abaixo de 7 centímetros. As exceções foram os processamentos do dia 29/10/2013 em PPTe iniciados à 0h, no qual APPS, RT_PPP e GAPS ultrapassaram os 12 centímetros de EMQ. Nesse último *software*, inclusive, ocorreu algum erro de modelagem onde foi

encontrada grande discrepância entre a coordenada utilizada como referência e a coordenada calculada pelo *software*. Todavia, ressalta-se que em trabalhos prévios realizados pelos autores com o GAPS, todos os resultados obtidos com o mesmo foram condizentes ao posicionamento PPP com acurácia próxima as encontradas pelos outros *softwares*. De maneira geral, a maioria dos *softwares* se comportou melhor quando sujeitos a maiores tempos de coleta de dados. Além do maior número de observáveis, o aumento de tempo de rastreamento acarreta numa diminuição da magnitude dos outros erros que não são modelados e, portanto, não estão presentes nas equações de observação do ajustamento de dados.

O serviço *on-line* que obteve maior regularidade nos processamentos de dados GNSS via PPP foi o IBGE-PPP que na maioria dos processamentos manteve seus valores de EMQ 3d abaixo dos 10 centímetros. O APPS foi o *software* que obteve os maiores valores na maioria dos processamentos (desconsiderando o processamento problemático do GAPS) e GAPS e RT_PPP apresentaram resultados semelhantes.

Para a avaliação quanto a influência da cintilação ionosférica no processamento PPP utilizou-se somente o *software* RT_PPP. Esse *software* é uma ferramenta de processamento PPP em tempo real totalmente desenvolvida no Brasil (FCT/UNESP), que foi adaptada para uma versão pós-processada. Por possuir licença vinculada a FCT/UNESP, foi possível a automatização de processamentos para a seguinte avaliação: processamento de dados de todos os dias dos meses de junho e outubro de 2013 nas estações POAL e PPTe, feitos com amostras de dados de 30 minutos, totalizando 48 processamentos por dia.

Na avaliação sobre a influência do intervalo de tempo de coleta de dados e os diferentes *softwares on-line* disponíveis, todos os resultados foram obtidos em processamentos utilizando, na medida do possível, as configurações padrão das ferramentas *on-line*, a fim de privilegiar os processamentos quanto as configurações que o próprio *software* disponibiliza como sendo a mais adequada. Algumas dessas ferramentas, em especial GAPS e RT_PPP, permitem várias outras configurações, visando ter os pesquisadores como público-alvo.

Os resultados foram sintetizados em alguns gráficos de acurácia que foram expostos ao longo do artigo. Também foram mostrados o comportamento do índice S4 nos meses de interesse, a fim de correlacioná-los com as acurácias obtidas. Os resultados mostraram que durante o mês de junho, o EMQ 3d em POAL e PPTe foram próximos, quando se excluem alguns processamentos de dados no qual a amostra de dados era muito pequena para obter o posicionamento via PPP. Esse comportamento é refletido nos gráficos referentes ao índice S4, que nesse mês somente poucas observações ultrapassaram o limiar moderado de cintilação ionosférica. Durante o mês de outubro os resultados obtidos dos processamentos de dados das estações foram bem diferentes do encontrado no mês de junho, no horário local logo após o pôr-do-sol. Em geral, ocorreu uma alta do EMQ 3d significativa em PPTe durante o período citado, algo correlacionado com o índice S4 de cintilação ionosférica encontrado para a estação. Em horários próximos ao meio-dia local nas estações, os resultados foram semelhantes, com o EMQ 3d com valores menores. Como tentativa de investigar se o motivo da piora dos resultados em PPTe nos dados GNSS com intervalo de coleta de dados entre 0:00 h e 0:30 h (UTC 0) foi devido à cintilação ionosférica, foram excluídos satélites com altos índices S4 ao longo de todo o mês

de outubro e refeito o processamento dos dados. Todavia, ocorreu uma piora do EMQ 3d, pois houve uma grande diminuição da amostra de dados disponível.

Portanto, a avaliação da cintilação ionosférica nos processamentos de dados GNSS utilizando o RT_PPP indicou uma maior probabilidade de degradação do posicionamento PPP quando o mesmo é realizado sob efeito de cintilação ionosférica, entretanto, não foi possível comprovar essa conclusão, pois a tentativa de mitigação escolhida (exclusão de satélites com alto índice S4) resultou em grande diminuição da amostra de dados.

Experimentos relacionados às diferentes configurações de processamento de dados com os *softwares* utilizados no artigo, além de mais análises sobre o RT_PPP, que é uma ferramenta que foi disponibilizada muito recentemente, devem ser mais explorados em trabalhos futuros, para a avaliação da qualidade de cada *software*. Quanto a avaliação da influência da cintilação ionosférica, sugere-se a exclusão de satélites com alto índice S4 em processamentos envolvendo mais constelações GNSS, que possui substancialmente maior a amostra de dados e evita que ocorram degradações nos resultados como os mostrados no presente artigo.

O artigo teve como intuito avaliar quatro dos sistemas de PPP *on-line* disponíveis atualmente e, além disso, investigar a influência do intervalo de tempo de coleta e ações ionosféricas no posicionamento GNSS.

Para a realização das análises quanto a diferentes intervalos de tempo foram escolhidas as estações POAL e PPTTE que sofrem menor e maior influência ionosférica, respectivamente, devido as suas localizações. A escolha do ano 2013 foi por este ter sido o pico do último ciclo solar. Foram usados dados de duas datas diferentes, uma em junho e a outra em outubro nos quatro *softwares on-line* (IBGE-PPP, GAPS, APPS e RT_PPP). Esses meses foram escolhidos por serem de menor (junho) e maior (outubro) atividade ionosférica. Para a escolha dos dias foram utilizados os índices S4 que tem alta correlação com a ocorrência de cintilação ionosférica. Em junho, a data escolhida apresentou baixo valor de índice S4, ao contrário do dia escolhido em outubro, com alto valor do mesmo. Os intervalos de tempo de coleta dos dados escolhidos foram de 30 minutos, 1, 3 e 6 horas.

Praticamente todos os resultados calculados a partir de 3 horas de rastreamento obtiveram resultados satisfatórios de EMQ, estando abaixo de 7 centímetros. As exceções foram os processamentos do dia 29/10/2013 em PPTTE iniciados à 0h, no qual APPS, RT_PPP e GAPS ultrapassaram os 12 centímetros de EMQ. Nesse último *software*, inclusive, ocorreu algum erro de modelagem onde foi encontrada grande discrepância entre a coordenada utilizada como referência e a coordenada calculada pelo *software*. Todavia, ressalta-se que em trabalhos prévios realizados pelos autores com o GAPS, todos os resultados obtidos com o mesmo foram condizentes ao posicionamento PPP com acurácia próxima as encontradas pelos outros *softwares*. De maneira geral, a maioria dos *softwares* se comportou melhor quando sujeitos a maiores tempos de coleta de dados. Além do maior número de observáveis, o aumento de tempo de rastreamento acarreta numa diminuição da magnitude dos outros erros que não são modelados e, portanto, não estão presentes nas equações de observação do ajustamento de dados.

O serviço *on-line* que obteve maior regularidade nos processamentos de dados GNSS via PPP foi o IBGE-PPP que na maioria dos processamentos manteve seus valores de EMQ 3d abaixo dos 10 centímetros. O APPS foi o *software* que obteve os maiores valores na maioria dos processamentos (desconsiderando o processamento problemático do GAPS) e GAPS e RT_PPP apresentaram resultados semelhantes.

Para a avaliação quanto a influência da cintilação ionosférica no processamento PPP utilizou-se somente o *software* RT_PPP. Esse *software* é uma ferramenta de processamento PPP em tempo real totalmente desenvolvida no Brasil (FCT/UNESP), que foi adaptada para uma versão pós-processada. Por possuir licença vinculada a FCT/UNESP, foi possível a automatização de processamentos para a seguinte avaliação: processamento de dados de todos os dias dos meses de junho e outubro de 2013 nas estações POAL e PPTE, feitos com amostras de dados de 30 minutos, totalizando 48 processamentos por dia.

Na avaliação sobre a influência do intervalo de tempo de coleta de dados e os diferentes *softwares on-line* disponíveis, todos os resultados foram obtidos em processamentos utilizando, na medida do possível, as configurações padrão das ferramentas *on-line*, a fim de privilegiar os processamentos quanto as configurações que o próprio *software* disponibiliza como sendo a mais adequada. Algumas dessas ferramentas, em especial GAPS e RT_PPP, permitem várias outras configurações, visando ter os pesquisadores como público-alvo.

Os resultados foram sintetizados em alguns gráficos de acurácia que foram expostos ao longo do artigo. Também foram mostrados o comportamento do índice S4 nos meses de interesse, a fim de correlacioná-los com as acurácias obtidas. Os resultados mostraram que durante o mês de junho, o EMQ 3d em POAL e PPTE foram próximos, quando se excluem alguns processamentos de dados no qual a amostra de dados era muito pequena para obter o posicionamento via PPP. Esse comportamento é refletido nos gráficos referentes ao índice S4, que nesse mês somente poucas observações ultrapassaram o limiar moderado de cintilação ionosférica. Durante o mês de outubro os resultados obtidos dos processamentos de dados das estações foram bem diferentes do encontrado no mês de junho, no horário local logo após o pôr-do-sol. Em geral, ocorreu uma alta do EMQ 3d significativa em PPTE durante o período citado, algo correlacionado com o índice S4 de cintilação ionosférica encontrado para a estação. Em horários próximos ao meio-dia local nas estações, os resultados foram semelhantes, com o EMQ 3d com valores menores. Como tentativa de investigar se o motivo da piora dos resultados em PPTE nos dados GNSS com intervalo de coleta de dados entre 0:00 h e 0:30 h (UTC 0) foi devido à cintilação ionosférica, foram excluídos satélites com altos índices S4 ao longo de todo o mês de outubro e refeito o processamento dos dados. Todavia, ocorreu uma piora do EMQ 3d, pois houve uma grande diminuição da amostra de dados disponível.

Portanto, a avaliação da cintilação ionosférica nos processamentos de dados GNSS utilizando o RT_PPP indicou uma maior probabilidade de degradação do posicionamento PPP quando o mesmo é realizado sob efeito de cintilação ionosférica, entretanto, não foi possível comprovar essa conclusão, pois a tentativa de mitigação escolhida (exclusão de satélites com alto índice S4) resultou em grande diminuição da amostra de dados.

Experimentos relacionados às diferentes configurações de processamento de dados com os *softwares* utilizados no artigo, além de mais análises sobre o RT_PPP, devem ser mais explorados em trabalhos futuros, para a avaliação da qualidade de cada *software*. Quanto a avaliação da influência da cintilação ionosférica, sugere-se a exclusão de satélites com alto índice S4 em processamentos envolvendo mais constelações GNSS, que possui substancialmente maior a amostra de dados e evita que ocorram degradações nos resultados, como os mostrados no presente artigo.

Assessment of the ionospheric scintillation and different data time intervals effect on the precise point positioning in its on-line versions

ABSTRACT

PPP is a GNSS positioning methods that uses precise ephemeris, satellite clock corrections and possible error modeling. The possibilities of PPP applications have increased in the latest years, especially due to the on-line services; like the IBGE-PPP, GAPS, APPS and RT_PPP. These services have been used in several researches and applications, however there are few experiments that consider ionospheric scintillation occurrence. In this context, in this study two RBMC stations were selected in different regions, one with high and other with low ionospheric activity. Data from two periods were also used, with weak and strong influence of the ionosphere, aiming to evaluate the performance of on-line PPP services with different intervals of GNSS data collection and also under influence of ionospheric scintillation in the positioning, using the RT_PPP software. With the utilized data, the IBGE-PPP achieve the better results in comparison with the other softwares and the increase of data collection time improved the positioning accuracy. The station in the region with lower ionospheric scintillation effect in the period of more ionospheric activity achieve the best results in accuracy, however, it wasn't possible to conclude that these results were caused only by the ionospheric scintillation.

KEYWORDS: Positioning. PPP on-line. Ionospheric Scintillation.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. M. D.; ROMÃO, V. M. C.; MONICO, J. F. G.; GARNÉS, S. J. A. Avaliação da qualidade do Posicionamento por Ponto Preciso na sua forma on-line. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife. p. 1-7, 2010.

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

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

GAPS. GPS Analysis and Positioning Software. Acesso em 25 de janeiro de 2016. <http://gaps.gge.unb.ca/>.

GDGPS. The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS (GDGPS) System. Acesso em 30 de janeiro de 2016. <http://apps.gdgps.net/>.

IBGE. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Coordenação de Geociências, 2013. Acesso em 30 de janeiro de 2016. http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf.

KLEIN, I.; MATSUOKA, M. T.; SOUZA, S. F. Análise do serviço on-line de PPP (GDGPS - APPS) para Receptores de Dupla Frequência: um estudo envolvendo dados de estações da RBMC. **Gaea-Journal of Geoscience**, v. 6, n. 2, p. 90-98, 2010.

MARQUES, H. A. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. 244p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente, 2007.

MARQUES, H. A.; VANI, B.; OYAMA, R.; MONICO, J. F. G. Software RT_PPP - PPP Online: Descrição e Manual de Uso, 2015. Acesso em 25 de janeiro de 2016. http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/manual/Manual_RTPPP_2015-08.pdf.

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

MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação Ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013. 144p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente, 2013.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, FELIPE. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.66, p. 569-579, 2014.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. 2.ed, 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. **III Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente, v.1, p. 228-233, 2012.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. 3WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region. **Proceedings of IEEE**. 2011.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual Exploration and Analysis of Ionospheric Scintillation Monitoring Data: The ISMR Query Tool. **Computers & Geosciences**. 2016.

Recebido: 29 jul. 2016

Aprovado: 21 mar. 2017

DOI: 10.3895/rbgeo.v5n2.5429

Como citar: ROCHA, R. S. M.; JEREZ, G. O.; BRASSAROTE, G. O. N.; MONICO, J. F. G. Avaliação do efeito da cintilação ionosférica e de diferentes intervalos de tempo de coleta de dados no posicionamento por ponto preciso na sua forma on-line. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 251-276, abr/jun. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Rodrigo Santos Mendes da Rocha

Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

