

# MODELAGEM DA INCERTEZA DO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO NA FORMA ON-LINE

V. F. Rofatto<sup>1,2</sup>, M. L. S. Bonimani<sup>1</sup>, G. G. Barbosa<sup>1</sup>, C. A. M. Abreu Junior<sup>1</sup>, M. T. Matsuoka<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

## RESUMO

O PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) é uma técnica de posicionamento por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que vem ganhando popularidade graças aos serviços on-line de processamento, muitos deles disponibilizados de forma gratuita. O PPP requer fundamentalmente dados GNSS de um único receptor e o emprego de efemérides e correções precisas do relógio dos satélites. Um dos serviços on-line de processamento PPP é o IBGE-PPP, disponibilizado de maneira pós-processada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Diversos trabalhos foram publicados com a finalidade de avaliar a qualidade das coordenadas estimadas por meio do serviço IBGE-PPP. Entretanto, até o momento, nenhum modelo que descreve a incerteza das coordenadas em função da sessão de observação foi desenvolvido. Aqui, propomos um cálculo da incerteza total com base na estimativa da medida de tendência (efeito sistemático) e dispersão das coordenadas (efeito aleatório) para as sessões de 1h, 2h, 4h, 6h, 8h e 12h. Com base na incerteza total, um modelo que relaciona a incerteza em função da duração da sessão de observação foi desenvolvido para cada coordenada (N, E e h); dado por:  $S_N(T) = 21,48 \times T^{-1,15} + 9,154$ ;  $S_E(T) = 83,4 \times T^{-0,498} - 17,28$ ; e  $S_h(T) = 71,22 \times T^{-0,867} + 23,37$ . Os resultados preliminares mostram que o modelo proposto é capaz de explicar a incerteza das coordenadas N, E e h, com  $R^2 = 0,99$ .

**Palavras chave:** Modelagem, Incerteza, Posicionamento por Ponto Preciso, GNSS.

## ABSTRACT

GNSS Precise Point Positioning (PPP) is becoming increasingly popular thanks to web-based online GNSS data processing services, which are user-friendly, unlimited and most of them are free. This technique provides precise positioning by using precise ephemeris and clock products and by considering other corrections. One of these freely available on-line PPP processing services is the IBGE-PPP from IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Several papers were published with the purpose of evaluating the quality of the coordinates estimated through the IBGE-PPP. However, until now, no model describing the uncertainty of the coordinates as a function of the observation session has been developed. Here, we propose a computation of the total uncertainty based on the trend measure (*systematic effect*) and dispersion of the coordinates (*random effect*) for the following sessions: 1h, 2h, 4h, 6h, 8h and 12h. Then we found out a model which relates uncertainty to the duration of the observation session as follow:  $S_N(T) = 21,48 \times T^{-1,15} + 9,154$ ;  $S_E(T) = 83,4 \times T^{-0,498} - 17,28$ ; and  $S_h(T) = 71,22 \times T^{-0,867} + 23,37$ . The preliminary results show that the proposed model is able to explain the uncertainty of the coordinates N, E and h, with  $R^2=0,99$ .

**Keywords:** Data Modelling, Uncertainty, PPP, GNSS.

## 1- INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a técnica PPP (*Precise Point Positioning*) de posicionamento por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*) tem ganhado cada vez mais popularidade. O PPP foi originalmente desenvolvido por cientistas do centro JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA (*National*

*Aeronautics and Space Administration*) com o objetivo de reduzir o custo computacional em relação ao processamento em redes (Zumberge et al., 1997). Ainda nos anos 90, o PPP se limitava basicamente aos usuários especializados que possuíam aplicativos computacionais de cunho científico, o que, de certa forma, o afastava do usuário comum. No entanto, com

a facilidade oferecida pela internet, surgem os serviços de PPP na forma on-line, aumentando o número de usuários e as aplicações (Matsuoka et al., 2009; Marques, 2012; Rofatto e Assunção, 2016; Azambuja e Matsuoka, 2016; Collischonn e Matsuoka, 2016).

Entre os diversos serviços PPP oferecidos na *web* está o IBGE-PPP, disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) que faz uso do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*) do NRCan (*Natural Resource Canada*). Trata-se de um serviço online gratuito para pós-processamento de dados dos sistemas GNSS disponibilizado em 2009, o qual permite a determinação de coordenadas referenciadas ao sistema geodésico brasileiro, SIRGAS2000. Desde seu lançamento o serviço passou por algumas modificações e atualizações, visando à melhoria dos resultados determinados pelo processamento (IBGE, 2017). O IBGE-PPP, diferente de outros softwares científicos, como por exemplo, o GIPSY-OASIS II (GOA-II, Rofatto, 2014), é “*user-friendly*” e não requer treinamentos avançados para os usuários.

Dentro deste contexto, um aspecto que merece atenção é a incerteza proporcionada pelo IBGE-PPP. Diversos trabalhos foram publicados com a finalidade de avaliar a qualidade das coordenadas estimadas por meio de serviços on-line de PPP, incluindo o IBGE-PPP. Klein et al., 2010 concluíram que os resultados advindos dos serviços APPS (*Automatic Precise Positioning Service*) e IBGE-PPP são similares para um processamento de 24 horas de dados. Olacan et al., 2013 mostraram que os serviços on-line de posicionamento relativo (OPUS, AUSPOS, SCOUT) são mais confiáveis do que os serviços de PPP (CSRS-PPP, GAPS, APPS, magicGNSS). Almeida e Dal Poz, 2016 mostraram que o posicionamento relativo ainda é mais acurado que o serviço IBGE-PPP, independente dos comprimentos e das quantidades de linhas de base envolvidas e também dos intervalos de tempo de dados GNSS. Rocha et al., 2017 avaliaram a qualidade dos serviços de PPP on-line (IBGE-PPP, GAPS, APPS e RT\_PPP (Marques, 2012)) sob a influência da cintilação ionosférica, e concluíram que os melhores resultados foram obtidos com o aplicativo IBGE-PPP.

Hayal e Sanli, 2016 refinaram os coeficientes de um modelo que descreve as incertezas das coordenadas obtidas no processamento PPP do GOA-II (versão 6.3). Entretanto, nenhuma modelagem da incerteza das coordenadas obtidas por meio do serviço IBGE-PPP foi realizada até o momento. Diante do exposto, pretendemos fornecer ao usuário do serviço IBGE-PPP um modelo que descreva a incerteza das coordenadas em função da sessão de observação, à um certo nível de confiança.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 são apresentados brevemente os fundamentos do PPP e detalhes do serviço IBGE-PPP; na seção 3 é descrito a metodologia aplicada para a modelagem da

incerteza do IBGE-PPP; por último, a seção 4 traz as considerações finais.

## 2- FUNDAMENTOS DO PPP e IBGE-PPP

Posicionamento está associado à determinação da posição de objetos em relação a um referencial específico. No caso do PPP, as coordenadas de um único receptor GNSS são obtidas com respeito ao referencial dos satélites (Rofatto et al., 2016). Pra fins práticos, o PPP é classificado como posicionamento absoluto, uma vez que as coordenadas estão associadas diretamente ao centro de massa da Terra, ou num conceito atual, no geocentro (Monico, 2008). Portanto, o PPP refere-se ao posicionamento absoluto com GNSS mediante utilização de dados de um único receptor.

A precisão do PPP varia da ordem dos decímetros, no modo cinemático, até a ordem de poucos milímetros, quando se considere o modo estático e um longo período de coleta de dados. Nesses casos, para atingir o nível de qualidade, deve-se considerar como observável no processamento a combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*) para a fase da onda portadora e/ou código, o que, obviamente, implica no uso de receptor de dupla frequência (Leick, 2004; Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Porém, o PPP também tem sido realizado com dados de receptores de simples frequência, embora com menor precisão, devido ao efeito da ionosfera e à impossibilidade de formar a *ion-free* (Matsuoka et al., 2009). Uma alternativa para minimizar esses efeitos da ionosfera com receptores de simples frequência é o uso de algum modelo da ionosfera disponível, como, por exemplo, o Modelo de Klobuchar e/ou o Modelo Global da Ionosfera do IGS (Aguiar, 2005; Matsuoka, 2007).

Outro aspecto importante e requisito fundamental do PPP é a utilização das efemérides e correções dos relógios dos satélites, ambos mais precisos do que aquelas contidas nas mensagens de navegação. Desta forma, estas informações devem ser disponibilizadas para os usuários por alguma fonte independente. Atualmente, o IGS (*International GNSS Service*) e centros associados, tal como o NRCan, disponibilizam de forma gratuita três tipos de efemérides e correções para o relógio dos satélites, denominadas de FINAL, RÁPIDA e ULTRA-RÁPIDA, cuja descrição detalhada pode ser obtida em Monico, 2008. Cada uma delas possui uma precisão associada e são disponibilizadas em diferentes momentos. No caso do IBGE-PPP, o aplicativo utilizará as órbitas e as correções dos relógios dos satélites mais precisos disponíveis no momento do processamento, e no caso de observações coletadas dentro do território brasileiro, serão utilizadas aquelas do NRCan. A maioria desses produtos tem cada um dos elementos disponibilizados (coordenadas X, Y e Z e erro do relógio de cada satélite) em intervalos de 15 minutos, um intervalo adequado para realizar interpolações das coordenadas dos satélites, entretanto,

nem sempre para as correções dos relógios. Visando reduzir a degradação resultante da interpolação, alguns centros, tal como o NRCan e JPL, geram as correções dos relógios dos satélites com intervalos de 30 segundos. Desde outubro de 2000, o IGS passou a fornecer arquivos com correções dos relógios dos satélites com intervalo de 5 minutos (Matsuoka et al., 2009).

Além das correções supracitadas (correções das órbitas dos satélites e seus relógios, bem como a redução dos efeitos ionosféricos), existem outras muitas fontes possíveis de incerteza que devem ser consideradas no modelo matemático associado ao PPP, como erro do relógio do receptor, troposfera, fase *wind-up*, correção do centro de fase e variação do centro de fase da antena do receptor, cargas das marés oceânicas e muitos outros. É recomendável o uso de modelos para minimizar esses efeitos sobre as observáveis GNSS em receptores de simples ou múltiplas frequências. Os modelos matemáticos envolvidos no PPP podem ser obtidos por (Leick, 2004; Monico, 2008), considerando a combinação *ion-free*:

$$PD_{r(IF)}^s = r_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r0}^s + dT_z m(e) + \varepsilon_{PD_{r(IF)}^s} \quad (1)$$

$$\phi_{r(IF)}^s = \frac{f_1}{c} r_r^s + f_1(dt_r - dt^s) - N_{IF} + \frac{f_1}{c} T_{r0}^s + \frac{f_1}{c} dT_z m(e) + \varepsilon_{\phi_{r(IF)}^s} \quad (2)$$

onde:

$PD_{r(IF)}^s$  - pseudodistância derivada do código resultante da combinação linear *ion-free*;

$\phi_{r(IF)}^s$  - fase obtida da combinação *ion-free*;

$r_r^s$  - distância euclidiana (geométrica) entre o centro de fase da antena do satélite e do receptor;

$dt_r$  - erro do relógio do receptor;

$dt^s$  - erro do relógio do satélite;

$T_{r0}^s$  - atraso troposférico aproximado por algum modelo disponível;

$dT_z$  - atraso zenital troposférico residual a ser estimado no modelo;

$m(e)$  - função de mapeamento em função do ângulo de elevação “ $e$ ” do satélite;

$c$  - velocidade da luz no vácuo (299.792.458 m/s)

$f_1$  - frequência da observável *ion-free* (igual a da portadora L1, ~19 cm).

$\varepsilon_{PD_{r(IF)}^s}$  e  $\varepsilon_{\phi_{r(IF)}^s}$  - incertezas provenientes dos efeitos dos erros aleatórios e da correção imperfeita dos efeitos sistemáticos para a pseudodistância e fase da onda portadora *ion-free*, respectivamente.

Nos modelos matemáticos descritos acima aparecem somente os erros mais comuns. Considerando a equação 1 e 2, é possível observar que os parâmetros (incógnitas) a serem estimados envolvem as coordenadas da estação (presentes no

termo  $r_r^s$ ); o erro do relógio do receptor ( $dt_r$ ); a correção residual da troposfera ( $dT_z$ ); e o vetor de ambiguidades ( $N_{IF}$ ). O erro do relógio do satélite ( $dt^s$ ) é injuncionado pelo valor disponibilizado pelo IGS ou por qualquer outro centro, como o NRCan e JPL. O valor do atraso troposférico aproximado ( $T_{r0}^s$ ) pode ser obtido pelo uso de algum modelo disponível, como o de Hopfield ou Saastamoinen, ou algo mais atual baseado em modelos de previsão numérica do tempo (Alves et al., 2016). Outros erros, como o relacionado ao centro de fase da antena dos satélites e o do receptor também podem ser tratados no PPP. Adicionalmente, os erros relacionados a marés terrestres, carga dos oceanos, entre outros, podem ser levados em conta. Uma descrição detalhada dos erros envolvidos pode ser encontrada em Witchayangkoon, 2000; Leick, 2004; Monico, 2008; e Hofmann-Wellenhof et al., 2008.

O serviço IBGE-PPP de processamento de dados GNSS, já comentado, está disponível on-line desde abril de 2009. Por meio dele, é possível processar dados GNSS de receptores de simples, quanto de dupla frequência, e no modo estático e cinemático, ambos pós-processados. Não é necessário o cadastramento, basta o usuário enviar o arquivo de dados GNSS (em formato RINEX – *Receiver Independent Exchange Format* ou HATANAKA) a página eletrônica (<http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>), informando se a ocupação é estática ou cinemática e, se for necessário, o usuário poderá informar também o tipo e altura da antena em metros. Se a opção “Não alterar RINEX” for à escolhida pelo usuário, o IBGE-PPP irá usar a identificação da antena encontrada no arquivo RINEX e, se a altura não for informada, o valor a ser utilizado será aquele disponível no arquivo RINEX. Este valor deve ser medido verticalmente e referido ao plano de referência da antena. Por fim, o usuário deverá informar um e-mail eletrônico válido para que o processamento seja realizado.

Os resultados do processamento IBGE-PPP são disponibilizados em um arquivo compactado no formato ZIP, o qual é apresentado na tela de resposta do processamento. Quando descompactado é criado um diretório com o mesmo nome. Neste diretório são encontrados cinco arquivos, os quais possuem as seguintes informações (IBGE, 2017):

- (1) SUM: possui o relatório detalhado das informações utilizadas no processamento dos dados, tais como correção do centro de fase da antena, órbitas e parâmetros de orientação terrestre, modelo de carga oceânica, parâmetros de transformação, opções do processamento, observações rejeitadas e coordenadas ITRF e SIRGAS2000 (estático) na época do levantamento;
- (2) POS: possui a estimativa das coordenadas época a época, ao longo do tempo de rastreamento. Ele é útil para um levantamento realizado no modo cinemático ou para o acompanhamento da convergência das coordenadas determinadas no modo estático;

- (3) KML: arquivo para ser visualizado no Google Earth;
- (4) Leiame.txt: informa o conteúdo de cada arquivo de saída do processamento; e
- (5) PDF: apresenta o relatório resumido dos resultados do processamento estático. As principais informações contidas nesta saída são as coordenadas do processamento na época do levantamento e as reduzidas à época 2000.4, os desvios-padrão das coordenadas ( $\sigma$ ) e a ondulação geoidal. Um processamento no modo cinemático não produzirá este arquivo. Este é o principal arquivo de resultados disponibilizado pelo PPP.

A qualidade das coordenadas obtidas pelo serviço IBGE-PPP (nova versão – 1.05/11216) foi divulgada recentemente no manual do serviço (<http://www.ppp.ibge.gov.br/>). Segundo o manual do IBGE-PPP, a incerteza dada pelo IBGE-PPP após 1 hora de rastreamento com receptores de dupla frequência (L1 e L2) são de 0,013m, 0,039m e 0,042m para as componentes, latitude, longitude e altitude respectivamente, podendo chegar a aproximadamente 0,002m, 0,005m e 0,008m após 6 horas de rastreamento, considerando um nível de confiança de 95%. Essas incertezas representam a confiabilidade interna do processamento.

O manual também fornece um indicativo da confiabilidade externa dada pelo comparativo entre as coordenadas determinadas a partir do processamento IBGE-PPP, com as coordenadas determinadas pelo Centro de Combinação SIRGAS e disponibilizadas no link <ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/>. Trata-se de duas soluções independentes e determinadas distintamente, uma vez que o PPP utiliza a técnica de processamento absoluto, enquanto a solução SIRGAS utiliza a técnica de processamento relativo. Pode-se interpretar do manual que o grau de concordância (IBGE-PPP e relativo) obtido com receptores (L1 e L2) após 1 hora de rastreamento são de 0,012m, 0,037m e 0,033m para as componentes, latitude, longitude e altitude respectivamente, podendo chegar a aproximadamente 0,003m, 0,008m e 0,011m após 6 horas de rastreamento. (IBGE, 2017).

As análises realizadas nos trabalhos supracitados neste trabalho são baseadas em arquivos de 24 horas de dados. Além disso, os experimentos visavam exclusivamente avaliar a incerteza dos serviços on-line de posicionamento. Aqui, por outro lado, pretende-se desenvolver e disponibilizar um modelo de incerteza ao usuário do serviço IBGE-PPP. Esse modelo poderá auxiliar os usuários do IBGE-PPP na etapa de planejamento da sessão de observação em um levantamento PPP estático para uma determinada aplicação. Na próxima seção é descrito a metodologia usada para modelar a incerteza do PPP na forma on-line, especificamente do serviço IBGE-PPP.

### 3- MODELAGEM DA INCERTEZA DO IBGE-PPP

Neste estudo, os dados RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) diários das estações NAUS, ONRJ e UFPR, pertencentes à RBMC, coletados em 4 períodos distintos (dias 1 e 30 de junho de 2016; dias 1 e 30 de outubro de 2016), com taxas de coleta de 15 segundos, foram considerados na modelagem. Os dados de 24 horas (diários) foram subdivididos em sessões de 1, 2, 4, 6, 8 e 12 horas, totalizando 612 arquivos. O aplicativo TEQC da UNAVCO (disponível em [www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html](http://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html)) foi utilizado para a edição dos arquivos diários. Um resumo do conjunto de dados considerado é apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – Número de arquivos RINEX para cada estação GNSS.

Intervalo de coleta	Número de arquivos RINEX
1h	96
2h	48
4h	24
6h	16
8h	12
12	8

O processamento dos dados GNSS foi realizado no serviço on-line IBGE-PPP com o uso das efemérides precisas finais do NRCAN. Verificando o arquivo sumário, foi possível constatar que o processamento dos dados pelo IBGE-PPP envolvia a observável *ion-free* (código e fase). O intervalo de estimação foi de 15 segundos e somente as observações coletadas com ângulo de elevação igual ou superior a 10 graus foram incluídas. O atraso troposférico foi estimado durante o processamento. Também foram aplicadas as correções relacionadas à variação do centro de fase da antena dos satélites e do receptor, com utilização das informações fornecidas pelo IGS e NGS (*National Geodetic Survey*). Importante salientar que, após o envio dos dados GNSS ao serviço IBGE-PPP, o processamento e os arquivos ficam a cargo do serviço, e já não é possível o acesso do usuário para mudanças de configuração. Entretanto, todas as estratégias de processamento dos dados GNSS adotadas pelo serviço para a realização do PPP é informado ao usuário no arquivo sumário (.sum).

Com a motivação de estudos anteriores (por exemplo, Hayal e Sanli, 2016), propomos neste estudo inicial um modelo de incerteza do IBGE-PPP que considera o efeito da duração da sessão de observação no posicionamento. Para cada sessão foram estimadas as coordenadas UTM (E, N) em SIRGAS2000 (época 2000,4), bem como as altitudes geométricas (referidas ao elipsóide GRS80). As soluções também foram obtidas a partir de sessões de 24 horas (arquivos

diários) e a média dessas soluções foi tomada como referência (“verdade”) para o cálculo da incerteza das sessões mais curtas. A medida de incerteza é dada por (Monico et al., 2009; Klein et al., 2013):

$$a = b \pm \sigma \quad (3)$$

onde na equação 3,  $a$  é a medida de incerteza,  $b$  é a (possível) tendência existente no valor estimado da grandeza, e  $\sigma$  é o desvio-padrão que representa a precisão à um certo nível de confiança. Nota-se que na equação 3 envolve tanto a influência de erros não aleatórios (isto é, sistemáticos e/ou grosseiros), quanto os efeitos dos erros aleatórios.

Desta forma, na metodologia aqui proposta, para a estimativa da medida de tendência ( $b$ ) na equação 3, foram calculadas as diferenças absolutas entre as coordenadas obtidas em cada sessão e o valor de referência. A média destas diferenças absolutas foi considerada como medida de tendência, ou seja:

$$b_E = \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - E_R|}{n}; b_N = \sum_{i=1}^n \frac{|N_i - N_R|}{n} \text{ e } b_h = \sum_{i=1}^n \frac{|h_i - h_R|}{n} \quad (4)$$

onde na equação 4,  $b_E$ ,  $b_N$  e  $b_h$  são as tendências para as coordenadas E, N e h, respectivamente;  $E_r$ ,  $N_r$  e  $h_r$  são as coordenadas de referência E, N e h, respectivamente, ou seja, representam as médias das soluções de 24 horas (arquivos diários). O índice  $i$  representa o número de sessões, por exemplo, para sessão de 1 hora, considerando os 4 períodos, tem-se  $i=1, \dots, 96$  para cada estação.

Os desvios-padrão ( $\sigma$ ) representam a dispersão das coordenadas (E, N, h) em torno da média para cada sessão ao longo dos 4 períodos considerados. Aqui, adotou-se o grau de confiança de 95% ( $2\sigma$ ). Portanto, os desvios-padrão, devido à presença de erros aleatórios nas observações (de acordo com 95% de nível de confiança), são dados por:

$$\sigma_E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(E_i - \hat{E})^2}{n-1}}; \sigma_N = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(N_i - \hat{N})^2}{n-1}} \text{ e } \sigma_h = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(h_i - \hat{h})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$\hat{E} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{n}; \hat{N} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n}; \hat{h} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{n} \quad (6)$$

onde na equações 5,  $\sigma_E$ ,  $\sigma_N$  e  $\sigma_h$  são os desvios-padrão para E, N, h para cada sessão de observação, respectivamente;  $\hat{E}$ ,  $\hat{N}$  e  $\hat{h}$  são as médias das coordenadas E, N e h calculadas para cada sessão de observação. Por exemplo, para sessão de 4 horas, considerando os 4 períodos, tem-se  $i=1, \dots, 24$  para cada estação.

A incerteza total ( $a_i$ ) para cada sessão de observação e para cada componente (E, N e h) foi obtida pela média das incertezas das estações calculadas de acordo com a equação 3, ou seja:

$$a_i = \sum_{k=1}^k \frac{a_k}{k} \quad (6)$$

onde na equação 6,  $k$  é o número de estações GNSS consideradas.

Neste estudo inicial, foi utilizada a seguinte função para modelar as incertezas das coordenadas (E, N e h):

$$S(T) = a \times T^b + c \quad (7)$$

onde na equação 7, os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  é estimado pelo método dos mínimos quadrados;  $T$  indica a duração da sessão de observação; e  $S$  são as incertezas calculadas por meio da equação 6 para cada componente (E, N e h). A qualidade do ajuste do modelo foi avaliado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Basicamente, este coeficiente indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados. Os parâmetros estimados de cada função, bem como a qualidade do ajustamento de cada modelo são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – Modelos de Incerteza do IBGE-PPP.

Modelo	$R^2$
$S_N(T) = 21,48 \times T^{-1,15} + 9,154$	0,99
$S_E(T) = 83,4 \times T^{-0,498} - 17,28$	0,99
$S_h(T) = 71,22 \times T^{-0,867} + 23,37$	0,99

Os gráficos 1-3 mostram as incertezas totais para cada sessão de observação a um nível de confiança de 95%, acompanhados do modelo de incerteza desenvolvido de acordo com a Equação 7 e apresentado na Tabela 2. 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 melhoria tende a decair à medida que os resultados vão se estabilizando, isso é possível de ser observado ao se verificar a melhoria do primeiro para o segundo intervalo, e os demais com melhorias mais discretas. Como apontado por Yigit et al., 2014, especialmente para sessões de observação mais curtas (1h e 2h), fica evidente que a qualidade da coordenada E (este) é pior que a N (norte), provavelmente devido à geometria da constelação GPS.

#### 4- OBSERVAÇÕES FINAIS

Nós apresentamos uma metodologia para modelar a incerteza do serviço IBGE-PPP. Os resultados iniciais mostram que o modelo é capaz de explicar a incerteza das coordenadas E, N e h, com  $R^2$  de 0,99. Nota-se que a incerteza total é uma medida mais realista quando comparada com a incerteza advinda do processamento do serviço IBGE-PPP.

Entretanto, o modelo não foi validado e será objeto de pesquisa em estudos futuros. Além disso,

outros modelos poderão ser testados (por exemplo, polinomial; exponencial, potência, etc). Recomendamos também para estudos futuros um conjunto maior de

estações GNSS e um período maior de dados para as análises.

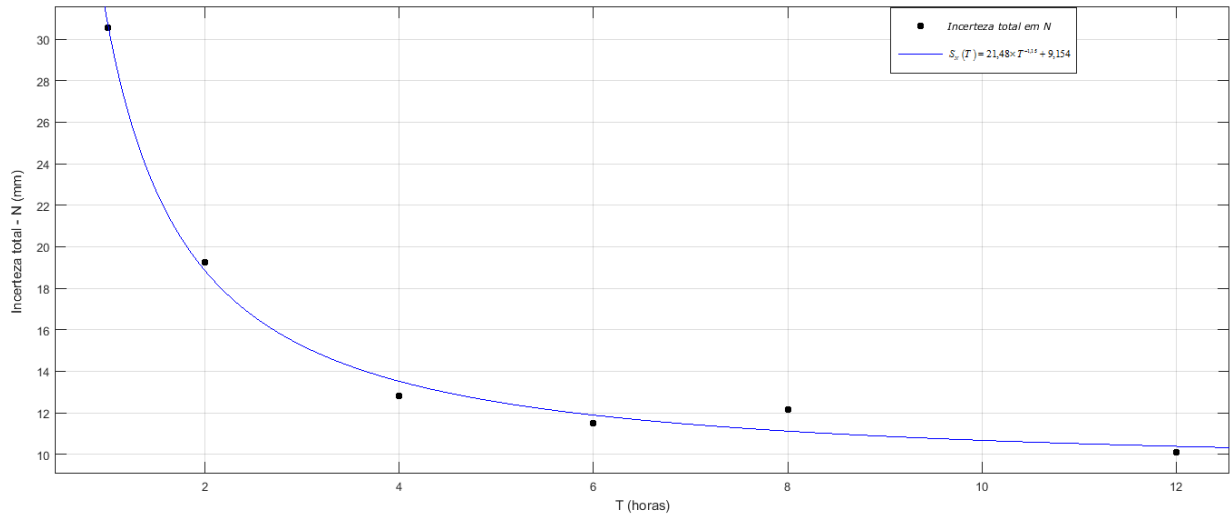


Fig. 1 – Gráfico do modelo de incerteza total para a coordenadas N

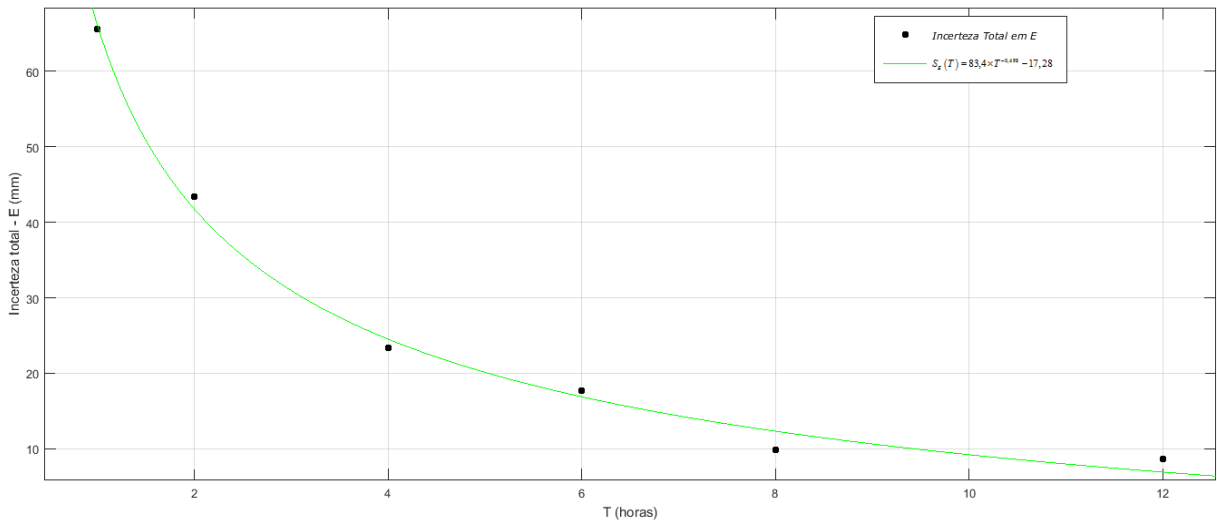


Fig. 2 – Gráfico do modelo de incerteza total para a coordenadas E

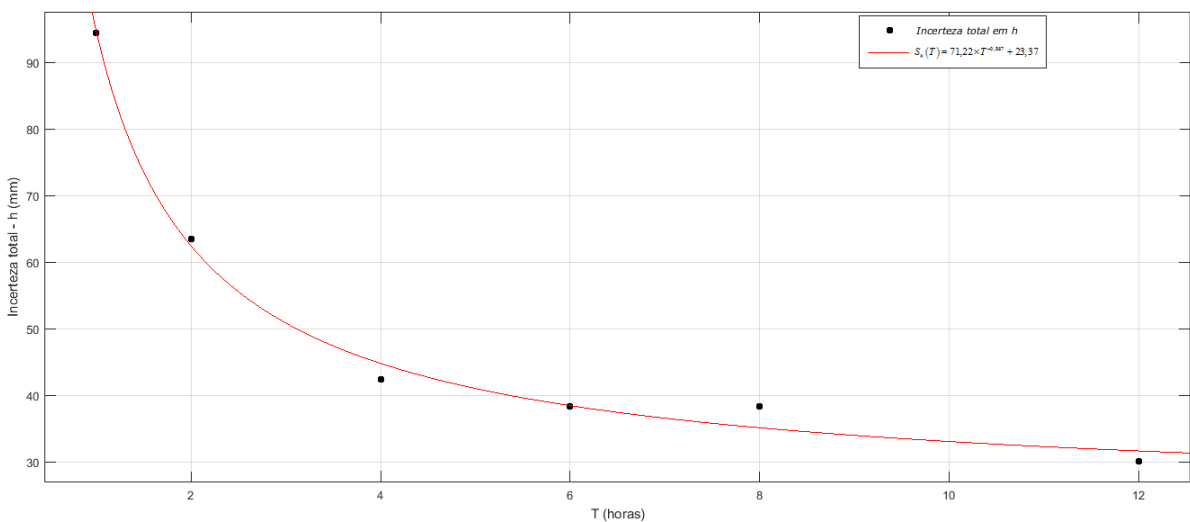


Fig. 3 – Gráfico do modelo de incerteza total para a coordenadas h

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Grupo de Pesquisa em “Controle de Qualidade em Geodesia” ([dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/3674873915161650](http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/3674873915161650)); o Instituto de Geografia (IG), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio à divulgação desse trabalho. Os autores agradecem também ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Proc.n.305599/2015-1) do quinto autor. Esse trabalho está vinculado ao projeto de pesquisa de Iniciação Científica Voluntária (PIVIC) do segundo autor (DIRPE/PIVIC N°370/2017). Por último, mas não menos importante, os autores agradecem ao IBGE, pelos dados das estações GNSS e por disponibilizar de forma gratuita o serviço on-line de processamento PPP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C. R. Modelo Regional da Ionosfera (Mod Ion): Implementação em Tempo Real. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.
- ALVES, et al., 2016. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. GPS solutions, Volume 20, Issue 4, pp 677–685.
- ALMEIDA, M. S.; DAL POZ, W. R. Posicionamento por Ponto Preciso e Posicionamento Relativo com GNSS: Qual é o método mais acurado atualmente?. 2016. Bol. Ciênc. Geod. vol.22, no.1.
- AZAMBUJA, J. L. F.; MATSUOKA, M. T. 2016. Velocidades das coordenadas obtidas por Posicionamento por Ponto Preciso: um modelo considerando coordenadas horizontais e altura elipsoidal. Rev. Bras. Geom., v.4, n. 2, p.70-80.
- COLLISCHONN, C.; MATSUOKA, M. T. 2016. Proposta de método de rede GNSS por PPP e Análise de Confiabilidade. Boletim de Ciências Geodésicas, vol.22, n.3, pp.453-47.
- HAYAL, A. G.; SANLI, D. U. 2016. Revisiting the role of observation session duration on precise point positioning accuracy using GIPSY/OASIS II. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, no 3, p.405-419.
- HOFMANN-WELLENHOF et al. 2008; GNSS – Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, GALILEO, and more. Áustria, Springer Wien New York, 516 páginas.
- IBGE. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Coordenação de Geociências, 2017. Acesso em 10 de junho de 2017. Disponível em <[https://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](https://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.
- KLEIN, I.; MATSUOKA, M. T.; MONICO, J. F. G. 2013. Proposta para a estimativa da acurácia de redes geodésicas horizontais integrando análise de robustez. Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 19, no. 4, pp. 525-547.
- LEICK, A. 2004. GPS satellite surveying. 3rd. ed., New Jersey, John Wiley & Sons, 435 p.
- 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 2017. [http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/manual/Manual\\_RTPPP\\_2015-08.pdf](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.
- MATSUOKA, M.T.; AZAMBUJA, J.L.F.; SOUZA, S.F.; VERONEZ, M. 2009. Potencialidades do serviço on-line de Posicionamento por Ponto Preciso (CSRS-PPP) em aplicações geodésicas. Gaea - Journal of Geoscience, 5(1):42-48.
- MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Ed. UNESP, 2008. 476p.
- MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.
- OLACAN, T.; ERDOGAN, B.; TUNALIOGLU, N. 2013. Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. Boletim de Ciências Geodésicas, vol.19, no.2.
- ROCHA, R. S. M.; JEREZ, G. O.; BRASSAROTE, G. O. N.; MONICO, J. F. G. 2016. 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.
- ROFATTO, V. F. 2014. ZTD em Tempo Quase Real via Estações GNSS Terrestres: Estratégia de Processamento para o GIPSY-OASIS II e Combinação das Séries Temporais. 137 f. Dissertação (mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Presidente Prudente.
- ROFATTO, V. F.; PROL, F. S.; MATSUOKA, M. T.; SOUZA, S. F. 2016. Situação atual na transformação entre sistemas de referência celeste e terrestre. Rev. Bras. Geom., v.4, n. 3, p.169-177.
- ROFATTO, V. F.; ASSUNÇÃO, J. W. M. 2017. Avaliação da utilização de estações virtuais de referência para o georreferenciamento de imóveis rurais. R. bras. Geom., Curitiba, v. 5, n. 3, p. 361-379.
- WITCHAYANGKON, B. 2000. Elements of GPS Precise Point Positioning. Orono, ME, University of Maine, Tese de PhD, 265 p.
- YIGIT et al., 2014. Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS post-processed PPP. Survey Review, vol. 46, pp. 155–166.
- ZUMBERGE, J.F.; HEFLIN, M.B.; JEFFERSON, D.C.; WATKINS, M.M.; WEBB, F.H. 1997. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS Data from Large Networks. Journal of Geophysical Research, 102(B3):5005-5017.