



Posicionamento multi-GNSS

Multi-GNSS positioning

Paulo de Tarso Setti Júnior ¹, Crislaine Menezes da Silva ², Paulo Sérgio de Oliveira Júnior ³, Daniele Barroca Marra Alves ⁴ e João Francisco Galera Monico ⁵

¹ Universidade de Luxemburgo, Faculdade de Ciências, Tecnologia e Medicina, Esch-sur-Alzette, Luxemburgo. paulo.setti@uni.lu.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-1832>

² Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente, Brasil. crislaine.menezes@unesp.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2023-4237>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, Brasil. paulo.junior@ufpr.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7000-6924>

⁴ Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil.
daniele.barroca@unesp.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9033-8499>

⁵ Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil.
galera.monico@unesp.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-9261>

Recebido: 08.2020 | Aceito: 11.2020

Resumo: Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) têm ganhado bastante visibilidade nas últimas duas décadas, sendo atualmente aplicados em diversas atividades, as quais vão muito além do posicionamento e navegação; algumas delas requerem alta acurácia (centimétrica a milimétrica), como o monitoramento de estruturas e a agricultura de precisão. Para atender a estas necessidades, diferentes métodos de posicionamento foram desenvolvidos, como o posicionamento por ponto (simples e preciso) e o posicionamento relativo. Mais recentemente, surgiu a possibilidade do posicionamento em tempo real com uso de redes, tanto para o posicionamento por ponto quanto para o relativo. O lançamento de novas constelações globais de satélites tem permitido a integração dos diferentes sistemas que, quando bem-sucedida, oferece melhorias para o posicionamento quanto à disponibilidade de satélites, à geometria entre o receptor e o satélite, à solução das ambiguidades e o desempenho deste quando comparado ao uso isolado dos sistemas. Nesse sentido, este artigo tem por objetivo apresentar uma revisão e o estado da arte das principais características dos quatro sistemas globais e dos diferentes métodos de posicionamento, dando destaque para a integração multi-GNSS, tendências e desafios em cada um deles. São também apresentados resultados comparando o posicionamento GPS ao posicionamento multi-GNSS com as quatro constelações e uso de uma máscara de elevação de 25°, simulando um ambiente obstruído. Com relação à acurácia do posicionamento, que leva em consideração o erro e desvio-padrão na estimativa da posição, a integração dos sistemas trouxe uma melhoria de até 44%.

Palavras-chave: Posicionamento multi-GNSS. Posicionamento de alta precisão. Posicionamento por ponto simples.

Abstract: GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) have gained a lot of visibility in the last two decades, being currently applied in several activities that go far beyond navigation positioning, some of them requiring high precision (centimeter to millimeter), such as structural monitoring and precision agriculture. To meet these requirements, different positioning methods have been developed, such as (standard and precise) point positioning and relative positioning. More recently, the possibility real time positioning with the use of networks has emerged, both for point and relative methods. The launch of new global constellations has enabled the integration of the different systems which, when successful, offers improvements for the positioning regarding the availability of satellites, the geometry between the receiver and the satellites, ambiguity resolution and its performance when compared to the isolated use of systems. In this sense, this paper presents a review and state of the art of the main characteristics of the four global systems and the different positioning methods, highlighting the multi-GNSS integration, trends and challenges in each of them. Results comparing multi-GNSS with the four constellations positioning to GPS-only, using a 25° cutoff angle, simulating an obstructed environment, are also presented. Considering the positioning accuracy, which considers the error and standard deviation in the position estimate, the integration of the systems brought an improvement of up to 44%.

Keywords: Multi-GNSS Positioning. High precision positioning. Standard Point Positioning.

1 INTRODUÇÃO

O posicionamento por satélite tem se tornado essencial para a vida da sociedade moderna e é usado por uma grande parcela da população. Nas últimas décadas, o GPS (*Global Positioning System*) tem sido o sistema mais conhecido e utilizado em diversas aplicações da Geodésia, Geofísica e navegação. O advento dos GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), entretanto, tem despertado muito interesse na comunidade científica e vem mudando esse cenário. Além dos pioneiros GPS e GLONASS (*GLobal NAtigation Satellite System*), operacionais, tem-se hoje disponível o sistema BDS (*BeiDou System*), declarado operacional em julho de 2020, e o Galileo, que está em fase final de desenvolvimento, a poucos passos de se tornar completamente operacional. Atualmente, o GPS e o GLONASS estão passando por uma modernização significativa, visando agregar mais capacidade, mais sinais disponíveis e uma melhor acurácia e interoperabilidade com os outros sistemas. Com esses novos desenvolvimentos no GNSS, mais de cem satélites com múltiplas frequências estarão em órbita e uma ampla gama de aplicações científicas e comerciais será beneficiada, tanto na parte de posicionamento quanto em outras aplicações, como a modelagem atmosférica e serviços de tempo.

Para posicionamento com GNSS, as observáveis rastreadas pelo receptor mais utilizadas são a fase de batimento da onda portadora e a pseudodistância (MONICO, 2008). Devido à baixa precisão da pseudodistância e das efemérides transmitidas, a precisão do Posicionamento por Ponto Simples (PPS, *Standard Point Positioning*) é de nível métrico e é comumente utilizado em navegação automobilística e marítima em mar aberto e em *smartphones*, necessitando de apenas um receptor para isso (SEEBER, 2003). Com o uso de dois receptores, utilizando apenas dados de pseudodistância, pode-se realizar o posicionamento diferencial GNSS (*Differential GNSS - DGNSS*), que pode proporcionar acurácia decimétrica (SEEBER, 2003; DALBELO et al., 2007). Para isto, os receptores devem estar separados por uma distância não muito longa para reduzir os erros relacionados à atmosfera e às órbitas dos satélites. O DGNSS é muito utilizado em aplicações de navegação aérea e para navegação marítima próxima a portos.

Para posicionamento preciso é necessário utilizar a observável fase da onda portadora, que é cerca de cem vezes mais precisa que a pseudodistância. Os métodos de posicionamento baseados nessa observável são divididos em relativo (*Real Time Kinematic - RTK*) e por Ponto Preciso (PPP) (GOAD; REMONDI, 1984; ZUMBERGE et al., 1997). O posicionamento relativo requer o uso de pelo menos dois receptores, um deles com posição conhecida, e no PPP necessita-se de um único receptor ao nível do usuário, exigindo modelagem robusta dos erros e uso de efemérides precisas. Para viabilizar posicionamento de linhas de bases longas, sem que seja necessário um longo tempo de observação, o método de posicionamento baseado em redes (*Network-RTK - NRTK*) foi desenvolvido (FOTOPOULOS; CANNON, 2001). Neste método, ao invés de uma única estação de referência, uma rede é utilizada. A partir desta rede pode-se estimar os erros atmosféricos e parâmetros orbitais em tempo real e transmiti-los a um usuário dentro da área de cobertura da rede. No NRTK o usuário necessita de um link bidirecional com a estação da rede que é o centro de processamento dos dados, para que seja possível receber as correções em tempo real. Para realizar o NRTK, independentemente do método utilizado para gerar as correções, é necessário que as ambiguidades entre as estações da rede sejam solucionadas de forma confiável, o que continua sendo um tópico desafiador nas pesquisas em GNSS e um dos principais fatores na determinação das distâncias da linha de base entre estações. Após o procedimento de solução das ambiguidades, os erros das observáveis em cada uma dessas estações devem ser determinados e as correções geradas. O usuário pode utilizar esse valor para corrigir suas observáveis e realizar posicionamento com acurácia centimétrica (FOTOPOULOS; CANNON, 2001; ALVES; MONICO, 2011).

Nos últimos anos, o PPP tem recebido grande atenção da comunidade científica pela acurácia comparável ao posicionamento relativo. Uma das principais desvantagens do PPP é o longo tempo de convergência para obter a solução das ambiguidades de forma confiável. Visando diminuir o tempo de convergência, o conceito de rede do NRTK foi adaptado ao PPP, dando origem ao método PPP-RTK (TEUNISSEN; KHODABANDEH, 2015). O PPP-RTK estende o conceito de PPP, fornecendo aos usuários de um único receptor os erros orbitais, relógios e hardware. A diferença essencial entre PPP e PPP-RTK é que o último método incorpora correções de rede adicionais, as quais permitem que as ambiguidades inteiras do usuário possam ser solucionadas de forma mais rápida. Correções atmosféricas geradas pela rede também podem ser aplicadas no PPP-RTK e geralmente são necessárias para um menor tempo de convergência.

A integração bem-sucedida dos GNSS oferece melhorias para o posicionamento quanto à disponibilidade de satélites, à geometria entre o receptor e o satélite, à solução das ambiguidades e ao desempenho deste quando comparado ao uso isolado dos sistemas, além de possibilitar um entendimento melhor de possíveis erros sistemáticos que podem não ser detectados em soluções individuais (KOUBA et al., 2017; MONTENBRUCK et al., 2017). Em suporte à essa integração multi-GNSS, o IGS (*International GNSS Service*), serviço da IAG (*International Association of Geodesy*) voltado à diversas atividades relacionadas ao GNSS, criou em 2011 o projeto piloto MGEX (*Multi-GNSS Experiment*). Tal projeto tem como objetivo preparar o IGS, que inicialmente fornecia produtos GPS e GLONASS, para o advento do multi-GNSS, visando gerar e disponibilizar produtos para todos os sistemas globais de satélites (MONTENBRUCK et al., 2017).

Nesse trabalho, será apresentada uma breve introdução aos sistemas GNSS, seguida pelo modelo das observáveis GNSS em sua concepção atual. Depois, os métodos de posicionamento serão descritos, enfatizando suas características principais. Algumas vantagens e problemas em investigação sobre a integração dos sistemas GNSS serão destacadas nesse estudo. Será enfatizada a modelagem e estimativa de parâmetros decorrentes da utilização integrada de múltiplas constelações e sinais GNSS, tais como tendências entre sistemas (*Inter System Bias* - ISBs) e entre frequências (*Inter Frequency Bias* - IFBs). Alguns resultados comparativos do posicionamento GPS e multi-GNSS são apresentados e discutidos. Adicionalmente, serão apresentadas as novas tendências e desafios futuros no posicionamento GNSS.

2 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE

Os sistemas globais de navegação por satélite tiveram início na década de 1970, visando a determinação instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário, quaisquer fossem as condições atmosféricas e sua localização geográfica (SEEBER, 2003). Desenvolvidos de maneira concomitante e independente, o GPS e o GLONASS foram os sistemas pioneiros, seguidos pelos sistemas Galileo e BDS. O Quadro 1 apresenta as principais características dos quatro sistemas globais, que serão brevemente descritos em seguida.

O GNSS compreende também sistemas de cobertura regional, que inclui os sistemas regionais de navegação por satélite (*Regional Navigation Satellite Systems* – RNSS), composto atualmente pelo japonês QZSS (*Japanese Quasi-Zenith Satellite System*), pelo indiano IRNSS/NavIC (*Indian Regional Navigation Satellite System*) e pela componente regional do BDS (KOGURE; GANESHAN; MONTENBRUCK, 2017), além dos sistemas de aumento baseados tanto em satélites (*Satellite-Based Augmentation System* - SBAS), como o norte-americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*) e o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) (WALTER, 2017), quanto em estações terrestres (*Ground-Based Augmentation System* - GBAS) (PULLEN, 2017).

2.1 GPS

Desenvolvido e controlado pelos Estados Unidos da América, o GPS foi declarado operacional no ano de 1995. É composto por uma constelação nominal de 24 satélites em órbita terrestre média (*Medium Earth Orbit* - MEO) e por estações terrestres distribuídas pelo globo a fim de monitorar e controlar os satélites (SEEBER, 2003); 30 satélites estão, em dezembro de 2020, operacionais (GPS, 2020). Desde o lançamento do primeiro satélite, em 1978 (HEGARTY, 2017), o GPS passou por diversos projetos de modernização tanto no seu segmento terrestre quanto nos blocos de satélites. Em relação aos sinais, é utilizada a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem na mesma frequência e a identificação é dada por um código atribuído a cada satélite, denominado de PRN (*Pseudo Random Noise*). Inicialmente o sistema possuía as portadoras L1 e L2, sendo que apenas o código P (*Precise or Protected* – Preciso ou Protegido), reservado para usos militares e usuários autorizados, era transmitido em L2 (SEEBER, 2003). Como resultado dos projetos de modernização, a partir do bloco IIR-M a portadora L2 passou a transmitir seu segundo sinal civil, denominado de L2C. A partir do ano de 2010, uma terceira portadora, denominada de L5, começou a ser transmitida no bloco IIF, com o terceiro sinal civil L5C. Com três satélites em órbita, uma nova geração denominada de GPS III conta com um quarto sinal civil em L1 (L1C) (GPS, 2020).

Quadro 1 – Principais características dos GNSS.

Parâmetro	GPS	GLONASS	Galileo	BDS (MEO)
Desenvolvido por	EUA	Rússia (União Soviética)	União Europeia	China
Constelação nominal	24	24+3	24+6	27
Planos orbitais	6	3	3	3
Inclinação (°)	55	64,8	56	55
Altitude (km)	20200	19100	23222	21500
Período orbital	1h58min	1h15min	14h04min	12h53min
Repetibilidade (dias siderais)	1	8	10	7
Frequências (MHz)	L1: 1575,42 L2: 1227,60 L5: 1176,45	L1: 1597-1617 L2: 1240-1260 L3: 1202,025	E1: 1575,42 E5a: 1176,45 E5b: 1207,14 E5: 1191,795 E6: 1278,75	B1: 1561,098 B2: 1207,14 B3: 1268,52
Identificação dos satélites	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Efemérides	Elementos keplerianos	Posição, velocidade, tempo	Elementos keplerianos	Elementos keplerianos
Modelo ionosférico	Klobuchar	-	NeQuick G	-
Sistema de referência	WGS84 (<i>World Geodetic System 1984</i>)	PZ-90 (<i>Parametry Zemli 1990</i>)	GTRF (<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>)	CGCS2000 (<i>China Geodetic Coordinate System 2000</i>)
Sistema de tempo	GPST (<i>GPS Time</i>)	UTC(SU) (<i>Universal Time Coordinated of Russia</i>)	GST (<i>Galileo System Time</i>)	BDT (<i>BeiDou Time</i>)

Fonte: Adaptado de Langley, Teunissen e Montenbruck (2017).

2.2 GLONASS

O GLONASS é o sistema global desenvolvido pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) e atualmente operado pela Rússia. De forma similar ao GPS, foi criado com fins militares e expandido para uso civil (SEEBER, 2003). Embora a constelação completa tenha sido alcançada em 1995, o sistema passou por um longo período de decadência, sem novos lançamentos necessários devido à curta vida útil dos satélites; em 2001, a constelação contava com 7 satélites ativos (FEAIRHELLER; CLARK, 2006). A partir de 2002, o governo russo estabeleceu um plano de reestabelecimento da cobertura global e modernização do sistema, que conta hoje com 28 satélites em órbita, dos quais 24 estão ativos (dezembro 2020) (IAC, 2020). Em relação aos sinais, na concepção original é utilizada a tecnologia FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite transmite e é identificado por uma frequência diferente (MONICO, 2008). Como nos primeiros satélites GPS, a portadora L1 possuía sinal para a comunidade civil e usuários autorizados, enquanto que a segunda portadora era designada somente para usuários autorizados (MONICO, 2008). A partir da geração GLONASS-M, incluiu-se ao sistema um novo sinal civil na portadora L2 (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Os satélites GLONASS-K1 passaram a transmitir, além dos sinais FDMA, uma nova portadora L3, CDMA. A nova geração GLONASS-K2 contará com a tecnologia CDMA também nas portadoras L1 e L2 (REVNIVYKH et al., 2017).

2.3 Galileo

O Galileo surge como a primeira alternativa completamente civil aos satélites de posicionamento, desenvolvido pela União Europeia (FALCONE; HAHN; BURGER, 2017). A constelação Galileo, que conta atualmente com 28 satélites em órbita, 22 dos quais estão operacionais (dezembro 2020), segue rumo à fase FOC (*Full Operational Capability*), quando contará com os 30 satélites na constelação (ESA, 2020). Cada satélite Galileo transmite sinais em três frequências (Quadro 1) na técnica CDMA, sendo que o sinal E1 é transmitido na mesma frequência que o sinal L1 GPS, e a sub-banda E5a utiliza-se da mesma frequência que a nova portadora L5 GPS. Os sinais são utilizados para oferecer três tipos de serviço de posicionamento: OS

(*Open Service*), que se utiliza da banda E1 e das sub-bandas E5a e E5b para posicionamento civil; PRS (*Public Regulated Service*) nas frequências E1 e E6, um serviço restrito a usuários autorizados pelo governo; e CS (*Commercial Service*) também na frequência E6, mas criptografada e sendo um serviço pago. Como um quarto serviço, os satélites Galileo dão suporte ao Cospas-Sarsat, um serviço de busca e resgate internacional liderado pelos Estados Unidos, Rússia, Canadá e França (GSA, 2016; FALCONE; HAHN; BURGER, 2017).

2.4 BDS

A China, nos anos 1980, decidiu construir seu próprio sistema de navegação por satélite em três fases. A primeira fase, denominada de *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System* (BeiDou-1, ou BDS-1), concretizou-se com o lançamento de três satélites geostacionários nos anos de 2000 a 2003 para demonstração do sistema. Tais satélites foram mais tarde substituídos por satélites da fase BDS-2, que correspondeu à fase regional do sistema, iniciada no ano de 2004 e declarada operacional em 2012 (LIU et al., 2014). Esta fase é composta por 14 satélites, sendo 5 deles de órbita geostacionária (*Geostationary Earth Orbit - GEO*), 5 de órbita geossíncrona (*Inclined Geo-Synchronous Orbit - IGSO*), e 4 de órbita MEO, recobrando todo o território chinês e outras partes da Ásia e do Pacífico (YANG; TANG; MONTENBRUCK, 2017). A terceira e última fase do sistema é composta por uma constelação global (BDS-3) (SUN et al., 2012; YANG; TANG; MONTENBRUCK, 2017), que se completou em junho de 2020 (BDS, 2020) com 27 satélites MEO em órbita, e o sistema foi declarado operacional em julho do mesmo ano. São transmitidos sinais abertos e autorizados em três frequências, denominadas de B1, B2, B3 pela técnica CDMA (Quadro 1).

3 OBSERVÁVEIS BÁSICAS DO GNSS

As observáveis básicas do GNSS são a pseudodistância e a fase da onda portadora. De precisão métrica, a pseudodistância é basicamente uma medida do tempo de propagação do sinal entre o satélite e o receptor, convertida para distância e obtida sem que se considere o erro de não sincronismo entre os relógios. Considerando um dado instante de observação t , frequência j e constelação S , a equação da pseudodistância de um satélite s rastreado por um receptor r é dada pela Eq. (1) (ODJIK, 2017):

$$P_r^S(t) = \rho_r^S(t, t - \tau_r^S) + T_r^S + c[dt_r(t) + d_{r,j}^S(t) + \Delta d_{r,j}^S(t)] - c[dt^S(t - \tau_r^S) + d_j^S(t - \tau_r^S)] + \mu_j^S I_r^S(t) + \varepsilon_{P_{r,j}}^S \tag{1}$$

em que P_r^S é a observação de pseudodistância (m), ρ_r^S é a distância geométrica entre o satélite e o receptor (m), τ_r^S é o tempo de propagação do sinal (s), T_r^S é o atraso troposférico (m), c é a velocidade da luz (m/s), dt_r é o erro do relógio do receptor (s), $d_{r,j}^S$ é a tendência do código no hardware do receptor (s), $\Delta d_{r,j}^S$ é a tendência interfrequência do código (s), dt^S é o erro do relógio do satélite (s), d_j^S é a tendência do código no hardware do satélite (s), μ_j^S é o coeficiente ionosférico que relaciona o atraso a uma determinada frequência, I_r^S é o atraso ionosférico (m) e $\varepsilon_{P_{r,j}}^S$ representa os erros aleatórios na medida da pseudodistância (m). A tendência no hardware do receptor é diferente para cada constelação, mesmo quando os sinais são rastreados em bandas sobrepostas. A diferença na tendência entre os sistemas é denominada de ISB. No caso da constelação GLONASS FDMA, as observações de pseudodistância são ainda contaminadas pela IFB do código.

A equação de fase da onda portadora é dada pela Eq. (2) (ODJIK, 2017):

$$\varphi_r^S(t) = \rho_r^S(t, t - \tau_r^S) + T_r^S + c[dt_r(t) + \delta_{r,j}^S(t) + \Delta \delta_{r,j}^S(t)] - c[dt^S(t - \tau_r^S) + \delta_j^S(t - \tau_r^S)] - \mu_j^S I_r^S(t) + \lambda_j^S N_r^S + \varepsilon_{\varphi_{r,j}}^S \tag{2}$$

em que φ_r^S refere-se à observação de fase da onda portadora (m), $\delta_{r,j}^S$ é a tendência da fase no hardware do receptor (s), $\Delta \delta_{r,j}^S$ é a tendência interfrequência da fase (s), δ_j^S é a tendência da fase no hardware do satélite (s), λ_j^S é o comprimento de onda do sinal (m), N_r^S é a ambiguidade da fase da onda portadora (ciclos) e $\varepsilon_{\varphi_{r,j}}^S$ representa os erros aleatórios na medida da fase da onda portadora (m).

4 POSICIONAMENTO MULTI-GNSS

Diversos métodos de posicionamento utilizando o GNSS foram desenvolvidos nas últimas décadas, com diferentes graus de complexidade e acurácia, desde o posicionamento com uso de pseudodistância e simples frequência, método mais utilizado pela comunidade civil, até métodos altamente acurados que utilizam observações de fase da onda portadora, combinação de frequências e constelações e informações advindas de redes. Nesta seção é apresentado o conceito de Diluição de Precisão (*Dilution of Precision – DOP*), que indica a qualidade esperada para o posicionamento a partir da geometria dos satélites observados. Nas próximas seções, serão detalhadas as particularidades introduzidas em cada método de posicionamento quando da utilização combinada de sistemas, destacando suas aplicações, limitações e tendências, bem como resultados e análises comparando o posicionamento GPS ao posicionamento multi-GNSS, com utilização dos quatro sistemas globais. Para o processamento, selecionou-se a estação PPTTE (-22°07'12"; -51°24'31"), localizada em Presidente Prudente, SP. A estação integra a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) (IBGE, 2020). Selecionou-se o dia 01/06/2020, das 10 às 12h UTC, e utilizou-se uma máscara de elevação de 25°. O valor de 25° foi selecionado para simular um ambiente com alto grau de obstruções, como grandes centros urbanos, local em que o posicionamento multi-GNSS se mostra muito vantajoso comparado ao posicionamento GPS com máscara de elevação de 5° ou 10°, como comumente realizado.

O processamento deu-se no software de código aberto RTKLib 2.4.3 (TAKASU, 2013), exceto para o PPP-RTK, em que se usou o software PPP-WIZARD (LAURICHESSE; PRIVAT, 2015), e o posicionamento GPS foi comparado ao posicionamento combinado GPS e GLONASS. A posição estimada é comparada às coordenadas oficiais da estação, atualizadas para a época de processamento. Os resultados são apresentados a partir do erro (diferença entre as coordenadas tomadas como verdadeiras e as estimadas da estação) e a partir da acurácia, que leva em consideração o erro e o desvio-padrão das coordenadas estimadas no ajustamento.

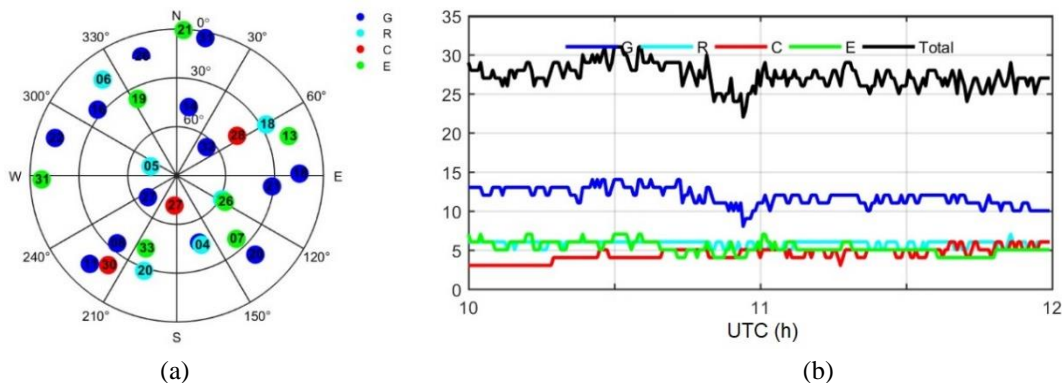
4.1 Diluição de Precisão

A qualidade do posicionamento é afetada diretamente pela disposição geométrica dos satélites. A acurácia da solução será proporcional à precisão das observações multiplicada pelo DOP, sendo este calculado a partir da posição do receptor e dos satélites por ele rastreados. Quando os satélites se encontram muito próximos entre si ou formando um plano com o receptor, obtém-se um alto valor de DOP devido à fraca geometria. O volume da figura geométrica formada pelos vetores unitários que unem o receptor aos satélites é inversamente proporcional ao DOP; a melhor geometria ocorre quando o volume é maximizado, o que implica num DOP mínimo (LANGLEY, 1999). O conceito de DOP pode também ser derivado do ajustamento das observações GNSS pelo método dos mínimos quadrados a partir da matriz variância-covariância dos parâmetros no Posicionamento por Ponto (MONICO, 2008), propagada para o sistema local (JEKELI, 2002; MARQUES, 2012).

Para exemplificar o conceito de DOP, a Figura 1 apresenta o diagrama polar da estação PPTTE na época 10h00min00s UTC do dia 01/06/2020, bem como o número de satélites rastreados durante o período das 10h às 12h UTC. Em média, 27 satélites foram rastreados. A partir do diagrama polar, que apresenta a posição dos 13 satélites GPS, 6 GLONASS, 7 Galileo e 3 satélites BDS-2 rastreados, nota-se que a combinação de sistemas melhora a geometria dos satélites, com uma melhor distribuição espacial. A melhor distribuição dos satélites fica mais evidente na Figura 2, que apresenta o PDOP (*Position DOP*) da estação, também durante o período das 10h às 12h UTC, considerando a constelação GPS e multi-GNSS dos quatro sistemas, e uma máscara de elevação de 10° e 25°, esta última para simular um ambiente obstruído, em que a linha de visão entre o receptor e satélites próximos ao horizonte é comprometida.

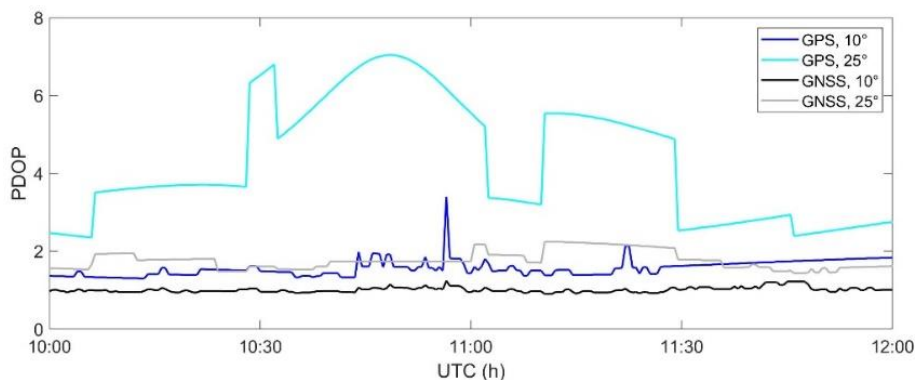
Considerando-se que a geometria ideal é alcançada quando o valor de PDOP é inferior a 5 ou 6 (LANGLEY, 1999; BORRE et al., 2007), é possível observar que os melhores resultados são esperados para o posicionamento multi-GNSS, com máscara de elevação de 10°, com um PDOP médio de 1,1. Quando a máscara é aumentada para 25°, o PDOP médio sobe para 1,8 sendo, em grande parte do tempo, equiparável ao GPS com máscara de 10°, que apresentou uma média de 1,7. O maior problema se encontra na constelação GPS com máscara de elevação de 25°, com PDOP médio de 4,2, e superior a 6 em alguns momentos do dia.

Figura 1 – (a) Diagrama polar (10h UTC) e (b) número de satélites rastreados pela estação PPTE em 01/06/2020; G – GPS, R – GLONASS, C – BDS, E – Galileo.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 2 – PDOP (PPTE, 01/06/2020) para as constelações GPS e multi-GNSS, com máscara de elevação de 10° e 25°.



Fonte: Os autores (2020).

5 POSICIONAMENTO POR PONTO SIMPLES

No PPS, método mais utilizado pela comunidade civil em atividades de navegação, as coordenadas do receptor são estimadas diretamente em relação ao geocentro, dispondo-se de apenas um receptor a nível de usuário e uso de pseudodistância normalmente em simples frequência (ODIJK, 2017). É necessário que se conheça as posições e erros dos relógios dos satélites GNSS, obtidos a partir das mensagens de navegação.

Devido à acurácia de ordem métrica do método, não se faz necessária a utilização de um modelo robusto que considere todas as diferenças entre os sistemas, mas algumas tendências não podem ser negligenciadas. Ao se utilizar efemérides transmitidas, as informações relativas aos satélites são obtidas no sistema de tempo e referência de cada sistema (Quadro 1). Para solução da posição do receptor, entretanto, deve-se adotar um sistema de tempo e referência comum ou adicionar parâmetros de transformação. Os sistemas de referência associados ao GPS, GLONASS, Galileo e BDS estão alinhados ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) a nível centimétrico (YANG, 2009; FALCONE; HAHN; BURGER, 2017; JEKELI; MONTENBRUCK, 2017); dada a acurácia esperada para o PPS, a transformação entre os sistemas de referência pode ser negligenciada. A adoção de um único referencial de tempo, entretanto, deve ser considerada, visto que uma diferença de apenas 10 ns resultaria em um erro de quase 3 m; a diferença de tempo entre o GPST e o GST, por exemplo, é de dezenas de nanossegundos (DEFRAINGNE et al., 2013).

Sejam X e Y duas constelações diferentes. O tempo registrado no receptor t_r em que foram coletadas observações do sistema X se relaciona com o tempo de X t^X por meio do erro do relógio do receptor dt_r na Eq. (3):

$$t_r(t^X) = t^X + dt_r(t^X). \tag{3}$$

Observações de Y que são coletadas no mesmo instante t_r registrado pelo receptor estão associadas a um outro sistema de tempo, que se utiliza de diferentes relógios físicos para sua realização. Entretanto, t_r pode

ser expresso por meio do erro do relógio do receptor em relação ao sistema de tempo de X pela Eq. (4):

$$t_r(t^Y) = t^Y + dt_r(t^Y) = t^Y + dt_r(t^X) - t^{XY} \tag{4}$$

com $t^{XY} = t^Y - t^X$.

O mesmo princípio pode ser utilizado para estimativa da tendência do código no hardware do receptor de observações da constelação Y, sendo o ISB definido pela Eq. (5):

$$ISB_r^{XY}(t^X, t^Y) = [d_r^Y(t^Y) - d_r^X(t^X)]. \tag{5}$$

Se a constelação em questão na Eq. (5) se referir ao GLONASS, um termo referente ao IFB poderia ser adicionado e o ISB seria dependente de cada satélite, e não apenas do receptor. No PPS, entretanto, o IFB é normalmente negligenciado. Se o ISB não é previamente conhecido ou calibrado, não é possível desassociá-lo da diferença de tempo entre dois sistemas, e os dois parâmetros são estimados como um só pela Eq. (6):

$$ISB_r^{XY} = [d_r^Y - d_r^X(t^X)] - t^{XY}. \tag{6}$$

Nesse caso, o erro do relógio do receptor é dado em função de um sistema X e o erro do relógio em relação a Y torna-se dependente do ISB entre X e Y, como demonstra a Eq. (7):

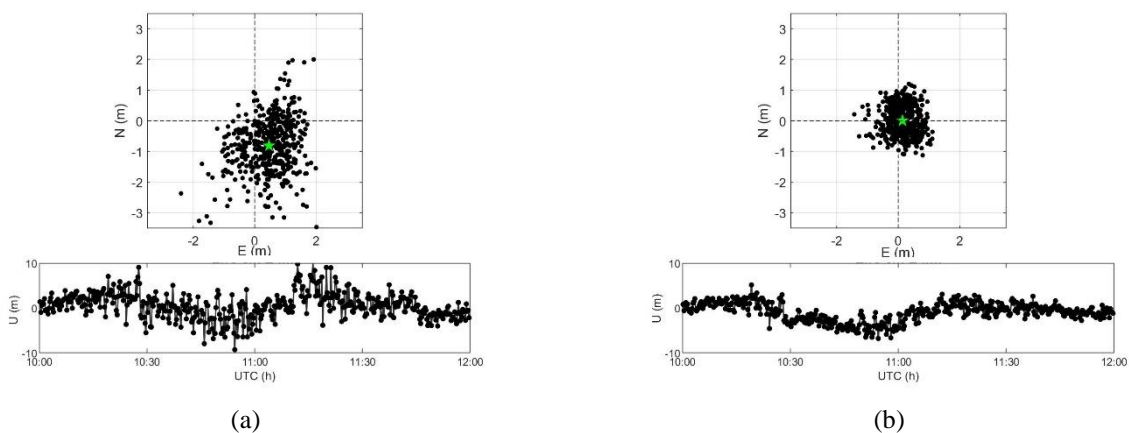
$$dt_r^Y(t) = dt_r^X(t) + ISB_r^{XY}. \tag{7}$$

Deste modo, o número de parâmetros a serem estimados no ajustamento é igual a $3+i$, sendo i o número de sistemas utilizados (3 coordenadas do receptor, $dt_r^X(t)$ e ISB_r entre X e os outros sistemas rastreados).

Para obtenção de melhor acurácia, os erros atmosféricos devem ser corrigidos, normalmente por modelos. Para o atraso ionosférico tem-se como exemplo o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987) e NeQuick G (RADICELLA, 2009); para o atraso troposférico pode-se citar os modelos de Hopfield e Saastamoinen (SEEBER, 2003). A estimativa da posição é realizada época a época, sendo o posicionamento estático e cinemático processados de forma similar.

A Figura 3 apresenta o erro do PPS GPS e multi-GNSS para a estação PPTE, com observações de pseudodistância GPS e GLONASS L1, Galileo E1 e BDS B1, modelo troposférico de Saastamoinen e ionosférico de Klobuchar. Considerando as duas horas de processamento, o posicionamento GPS apresentou um erro médio de 0,9 m na componente leste, 0,8 m na componente norte e 0,9 m na componente vertical. No multi-GNSS, o erro médio foi de 0,1 m nas componentes leste e norte e de 0,5 m na componente vertical. A melhoria da combinação multi-GNSS é mais evidente no desvio-padrão do ajustamento, que passa de 5,9 m, 6,6 m e 7,5 m nas componentes leste, norte e vertical, respectivamente, do posicionamento GPS para 3,7 m, 3,4 m e 4,9 m no posicionamento multi-GNSS. Considerando a acurácia tridimensional, a estimativa da posição teve uma melhoria de 40% na solução multi-GNSS em relação à GPS.

Figura 3 – Erro horizontal e vertical do PPS (a) GPS e (b) multi-GNSS. Em verde, média do erro horizontal.



Fonte: Os autores (2020).

6 DGNSS

No DGNSS, utiliza-se uma estação base de rastreamento contínuo com coordenadas conhecidas e um segundo receptor cuja posição deseja-se determinar. Nessas condições, se os dois receptores não estão muito distantes um do outro, assume-se uma alta correlação dos erros envolvidos nas observações coletadas por ambos (SEEBER, 2003). Uma vez que as coordenadas da estação base são conhecidas, é possível calcular, a partir de seus dados coletados, correções que deverão ser aplicadas ao posicionamento da estação de posição desconhecida. Correções às pseudodistâncias ou às posições podem ser estimadas, sendo a primeira a mais comumente empregada (DALBELO et al., 2007).

Seja i o receptor de coordenadas conhecidas e x um satélite da constelação X . A correção de pseudodistância ΔP_i^x será, a partir da Eq. (1), dada pela Eq. (8) (LIU et al., 2017a):

$$\Delta P_i^x = c(dt_i + d_r^x + t^x) - c[dt^x + d^x] + T_i^x + I_i^x + \varepsilon_{P_i}^x \quad (8)$$

em que t^x é a diferença de tempo entre o sistema X e um outro sistema adotado como referência, sendo $t = 0$ para os satélites da constelação cujo sistema de tempo foi adotado como referência.

A correção ΔP_i^x é então enviada ao receptor ii , cuja posição deseja-se determinar. Erros nas pseudodistâncias assumidamente correlacionados são eliminados ou reduzidos, como o erro atmosférico e erros relacionados aos satélites. As observações corrigidas são dadas pela Eq. (9) (LIU et al., 2017a):

$$P_{ii}^x - \Delta P_i^x = \rho_{ii}^x + c dT^x + \varepsilon_{P_{ii}}^x \quad (9)$$

com $dT^x = dt_{ii} - dt_i + d_{ii}^x - d_i^x$.

A partir das observações corrigidas na Eq. (9), o receptor realiza o posicionamento por PPS. Assim como no PPS, escolhe-se uma constelação que terá seu sistema de tempo como referência, e o erro do relógio dos outros sistemas é dividido em duas componentes. Seja X o sistema adotado como referência. A equação de observação de um satélite y , da constelação Y , será dado pela Eq. (10) (LIU et al., 2017a):

$$P_{ii}^y - \Delta P_i^x = \rho_{ii}^y + c(dT^x + ISB_{i,ii}^{XY}) + \varepsilon_{P_{ii}}^x \quad (10)$$

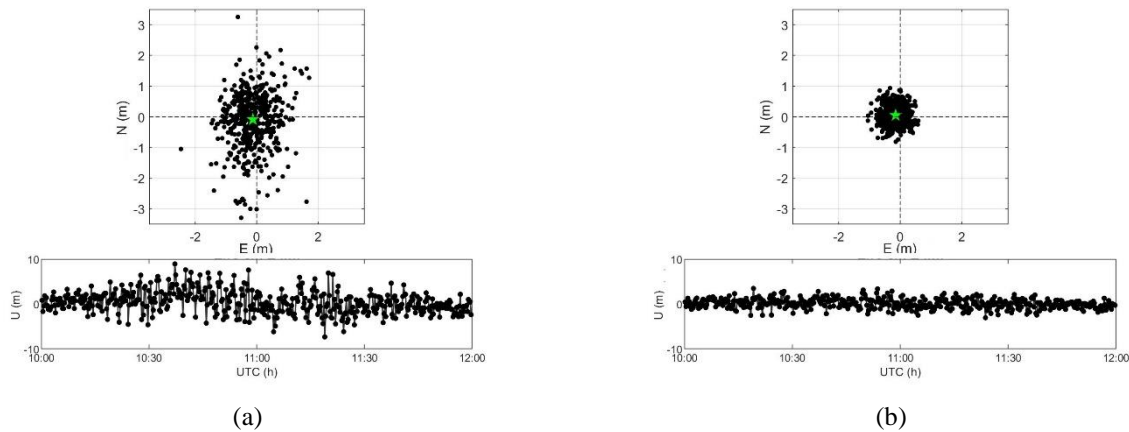
com $ISB_{i,ii}^{XY} = d_{ii}^y - d_i^y - (d_{ii}^x - d_i^x)$. O termo $ISB_{i,ii}^{XY}$ refere-se à diferença de ISB entre duas diferentes constelações no modelo DGNSS, podendo ser chamado de ISB Diferencial (*Differential ISB – DISB*) (ODIJK; TEUNISSEN, 2013). Tal parâmetro, assim como no PPS, pode ser calibrado a priori ou estimado juntamente com os outros parâmetros no ajustamento. Assim que dados de novas épocas estejam disponíveis, o processo é repetido e as variações das correções são calculadas para serem também disponibilizadas aos usuários.

Quando uma rede de estações é utilizada para gerar as correções, tem-se o conceito de DGNSS em rede (*network DGNSS – NDGNSS*) ou WADGNSS (*Wide-area DGNSS*). A partir do NDGNSS, é possível minimizar o problema da decorrelação espacial dos erros envolvidos no DGNSS. No método, as correções são calculadas individualmente em cada estação da rede pela Eq. (8). Uma única correção para cada satélite é enviada ao usuário, o que é feito a partir de algum método de interpolação, usualmente baseado na distância das estações com relação à posição do usuário (BAKULA, 2010; ALVES et al., 2012). O WADGNSS é o método utilizado pelos SBAS, normalmente com abrangência continental. Neste método, uma rede sobre a área de abrangência envia continuamente suas observações para uma estação de controle central. Essa estação calcula então correções para os parâmetros de órbitas e relógios transmitidos nas mensagens de navegação, além de informações relativas ao estado da atmosfera (ionosfera e troposfera). As correções são enviadas para os satélites geoestacionários do sistema de aumento, e então enviadas aos usuários, que aplicam tais correções na sua estimativa de posição (KEE; PARKINSON; AXELRAD, 1991; ASHKENAZI et al., 1993).

A Figura 4 apresenta o erro do posicionamento DGPS (*Differential GPS*) e DGNSS com os quatro sistemas globais para a estação PPTE. Como base, utilizou-se a estação da RBMC SPAR (-21°11'05"; -50°26'23"), localizada em Araçatuba, SP. A linha de base formada foi de 144 km. Assim como no PPS, foram utilizadas observações de pseudodistância GPS e GLONASS L1, Galileo E1 e BDS B1. Pela Figura, fica

evidente a vantagem da utilização combinada das constelações GNSS. Considerando as duas horas de processamento, o posicionamento GPS apresentou um erro médio de 0,21 m na componente leste, 0,10 m na componente norte e 0,43 m na componente vertical. No multi-GNSS, o erro foi de 0,15 m na componente leste, 0,05 m na componente norte e 0,11 m na componente vertical. O desvio-padrão do ajustamento GPS foi de 1,27 m para a componente leste, 1,44 m para a componente norte e 2,54 m na componente vertical. Para o caso multi-GNSS, o desvio-padrão foi de 0,50 m, 0,42 m e 1,69 m para as componentes leste, norte e vertical, respectivamente. Considerando a acurácia tridimensional, a posição estimada da estação teve uma melhoria de 44% na solução multi-GNSS em relação à GPS. Vale destacar que os erros resultantes são de ordem métrica devido ao comprimento da linha de base; ainda assim, os resultados são mais acurados quando comparados ao PPS (para o caso multi-GNSS, a acurácia tridimensional foi de 7,0 m no PPS e de 1,82 m no DGNSS).

Figura 4 – Erro horizontal e vertical do posicionamento (a) DGPS e (b) DGNSS. Em verde, média do erro horizontal.



Fonte: Os autores (2020).

7 POSICIONAMENTO RELATIVO

O posicionamento relativo, como o DGNSS, requer o uso de dois receptores, que são utilizados para eliminar ou reduzir significativamente os erros sistemáticos. Um dos receptores é conhecido como receptor de referência (ou base) para que seja possível realizar as diferenciações das observações do outro (ou outros) receptor, conhecido como móvel. Isso também é aplicado aos satélites, onde o satélite com o maior ângulo de elevação é atribuído como satélite de referência (ou base). Uma das diferenças entre o DGNSS e o posicionamento relativo é que este último utiliza a observável fase da onda portadora, que depende da solução das ambiguidades (*Ambiguity Resolution – AR*) para estimar a posição do receptor móvel com alta precisão.

A combinação multi-GNSS apresenta vários benefícios. No caso de baixo número de satélites observados em cada sistema, é possível realizar a dupla diferença (DD) entre os sistemas e, assim, possibilitar a obtenção das ambiguidades de forma rápida, ou até instantânea. Outra vantagem importante é não apenas o uso de multi-GNSS, mas também de observações multifrequência, que podem ser benéficas para a AR e consequentemente para o posicionamento relativo (CELLMER; PAZIEWSKI; WIELGOSZ, 2013; HE et al., 2014; TEUNISSEN; ODOLINSKI; ODIJK, 2014; ODOLINSKI; TEUNISSEN; ODIJK, 2015; GAO; GAO; PAN, 2017; PAZIEWSKI; SIERADZKI, 2017; LI et al., 2018; ZHANG et al., 2020). Por outro lado, o uso de observações de múltiplas frequências e sistemas pode aumentar a necessidade computacional para a AR devido ao grande número de observáveis e parâmetros a serem estimados. Estudos foram realizados para resolver esse problema e a solução parcial das ambiguidades (*Partial Ambiguity Resolution - PAR*) foi desenvolvida (CAO; O'KEEFE; CANNON, 2007; PARKINS, 2011; LI et al., 2015; GAO; GAO; PAN, 2017).

A abordagem ideal para combinar tais observações ainda é um problema em aberto. A integração de múltiplos sistemas pode ser realizada de duas formas diferentes: a combinação fraca (*loose combination - LC*) ou a combinação forte (*tight combination - TC*) (ZHANG et al., 2003; JULIEN et al., 2004). Na LC, cada sistema tem o próprio satélite base, enquanto que na TC o satélite base de um sistema pode ser usado para formar as diferenças do outro sistema. Sistemas com frequências iguais permitem a realização de diferenciação entre sistemas. Esta abordagem é denominada por TC e considera o DISB (MONTENBRUCK; HAUSCHILD;

HESSELS, 2011; ODIJK; TEUNISSEN, 2013; PAZIEWSKI; WIELGOSZ, 2015; ODIJK et al., 2017; PAZIEWSKI; SIERADZKI, 2017).

A equação de DD para a pseudodistância e fase, considerando dois receptores, i e ii , e dois satélites x e v , pertencentes a constelação X, é dada pela Eq. (11) (ODIJK; WANNINGER, 2017):

$$\begin{aligned} \Delta \nabla P_{i,ii}^{xv} &= \Delta \nabla \rho_{i,ii}^{xv} + \Delta \nabla c d_{i,ii}^{xv} + \Delta \nabla \xi_{i,ii}^{xv} + \Delta \nabla I_{i,ii}^{xv} + \Delta \nabla T_{i,ii}^{xv} + e_{P_{DD}} \\ \nabla \Delta \varphi_{i,ii}^{xv} &= \Delta \rho_{i,ii}^{xv} + c \nabla \Delta \delta_{i,ii}^{xv} + \nabla \Delta \zeta_{i,ii}^{xv} - \nabla \Delta I_{i,ii}^{xv} + \nabla \Delta T_{i,ii}^{xv} + \lambda (\nabla \Delta N_{i,ii}^{xv} + \nabla \Delta \omega_{i,ii}^{xv}) + \epsilon_{\Phi_{DD}} \end{aligned} \quad (11)$$

em que $\Delta \nabla$ é o símbolo adotado para a DD, que representa $\Delta \nabla (\cdot)_{i,ii}^{xv} = (\cdot)_{i,ii}^v - (\cdot)_{i,ii}^x = (\cdot)_i^{xv} - (\cdot)_{ii}^{xv}$.

Quando a linha de base entre os receptores é suficientemente curta (tipicamente menos de 10 km), pode-se supor que os erros troposféricos e ionosféricos são cancelados. Para linhas de bases mais longas, estes erros não são cancelados, pois são correlacionados espacialmente. Para os atrasos troposféricos, é possível estimar um parâmetro para o atraso úmido residual, enquanto a componente hidrostática pode ser corrigida com o uso de um modelo empírico. Em relação aos atrasos ionosféricos, pode-se estimar a DD dos parâmetros ionosféricos no processamento ou eliminá-los a partir do uso de combinações de duas ou mais frequências.

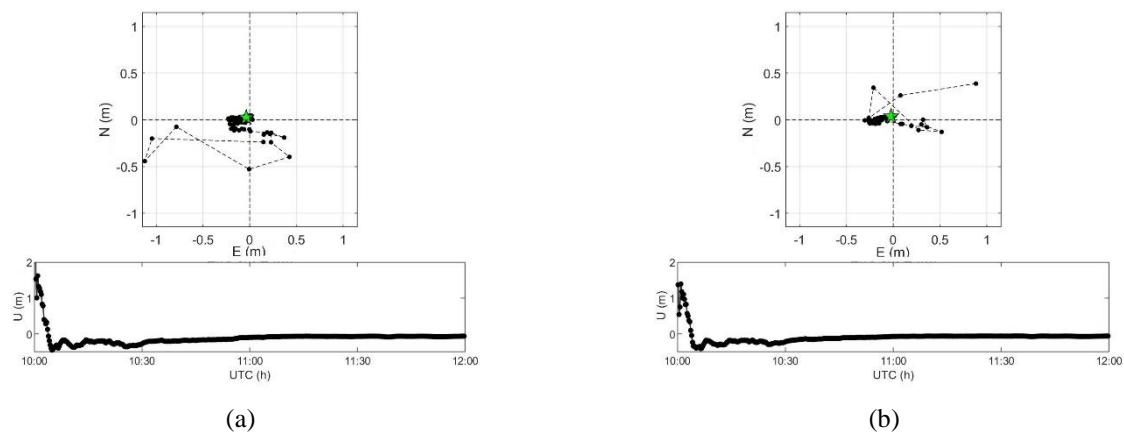
Existem algumas formas de realizar o posicionamento relativo: modo estático, semicinemático e cinemático em tempo real (RTK). No posicionamento relativo estático, os dados são coletados por receptores estacionários e para que a posição seja obtida com alta precisão é necessário um longo de tempo de observação, para que a geometria do satélite mude e seja possível obter a AR, algo na ordem de meia hora a algumas horas em caso de linhas de base longas (GOAD; REMONDI, 1984). Já o posicionamento relativo semicinemático foi desenvolvido para que esse longo período de observação não seja necessário. Para isso, alguns métodos foram propostos visando obter a posição com alta acurácia, com um tempo menor de observação do que o método estático convencional. Estes métodos baseiam-se no contínuo rastreamento do receptor entre os pontos de interesse, ou seja, o receptor coleta dados por um curto período em um ponto e depois visita outro ponto para coletar dados por um breve tempo, rastreando continuamente os satélites durante o trajeto entre os pontos. Dentre as estratégias de semicinemático, pode-se destacar a troca de antenas (HOFMANN-WELLENHOF; REMONDI, 1988; ODIJK; WANNINGER, 2017), a revisita de pontos de interesse (CANNON, 1990; ODIJK; WANNINGER, 2017) e o *stop and go* (REMONDI, 1985; ODIJK; WANNINGER, 2017).

Quando o segundo receptor é móvel e é necessário obter posições instantâneas em tempo real, o método é denominado RTK. Ele é utilizado em aplicações que necessitam de alta acurácia, como o controle de máquinas agrícolas. No RTK, para obter a posição do receptor móvel em tempo real, as correções determinadas no receptor de referência são transmitidas ao receptor móvel por meio de um link de comunicação de dados. No RTK, não é necessário que o receptor de referência permaneça estático, este também pode estar em movimento. O RTK é limitado a linhas de bases de até 10 km, se links de comunicação via rádio forem utilizados ou, se linhas de bases mais longas forem utilizadas, os atrasos atmosféricos devendo ser estimados com base em dados de pelo menos duas frequências. Devido à sua alta produtividade, o RTK é comumente utilizado em levantamentos cadastrais e de engenharia e agricultura de precisão.

Caso dados BDS sejam usados para o posicionamento relativo, um outro tipo de tendência surge, caso a linha de base seja formada por receptores diferentes. Esta tendência é denominada de tendência diferencial entre tipos de satélites (*Differential Inter-Satellite-Type Bias – DISTB*) e está presente quando se fazem diferenciações, na mesma frequência, entre satélites de diferentes tipos BDS (GEO, IGSO e MEO) (NADARAJAH et al., 2013; NADARAJAH et al., 2015). Os fabricantes de receptores atualizaram o *firmware* de seus receptores para eliminar os DISTB ao usar receptores diferentes para a realização de posicionamento relativo com BDS. No entanto, usuários que utilizam receptores com *firmware* antigo devem levar em consideração a presença de DISTB ao processar dados BDS (NADARAJAH et al., 2015).

A Figura 5 apresenta o erro na estação PPTE, processada no modo relativo estático e usando SPAR como estação base (linha de base de 144 km). Foram utilizadas observações na combinação livre de ionosfera para as frequências GPS e GLONASS L1 e L2, Galileo E1 e E5 e BDS B1 e B2. Analisando a Figura, fica evidente a acurácia centimétrica do método. Ao final do processamento, o erro tridimensional GPS foi de 9,4 cm, com desvio-padrão de 3,6 cm, contra erro de 7,1 cm e 2,9 cm de desvio-padrão no processamento multi-GNSS, o que representa uma melhoria de 24% na acurácia tridimensional.

Figura 5 – Erro horizontal e vertical do RTK (a) GPS e (b) multi-GNSS. Em verde, média do erro horizontal.



Fonte: Os autores (2020).

8 POSICIONAMENTO BASEADO EM REDES

Nos últimos anos, um método de posicionamento que vem sendo amplamente utilizado é o posicionamento baseado em redes, também conhecido como RTK em rede (*Network RTK - NRTK*). Este método foi desenvolvido visando acabar com a limitação espacial do RTK, introduzindo o uso de uma rede de estações de referência. No NRTK o número de estações de referência pode variar de três a dezenas e a distância entre elas pode variar de alguns poucos quilômetros a centenas de quilômetros.

Uma etapa primordial no NRTK é o processo de solução das ambiguidades para cada uma das linhas de base independentes desta rede. Uma vez que as ambiguidades foram solucionadas é possível determinar os erros das observáveis em cada uma dessas estações e a partir de um método adequado pode-se obter a correção para qualquer posição na área de abrangência da rede. Diversos métodos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos para formular correções a partir dos dados das estações de uma rede. Existem algumas possibilidades como algoritmos de derivadas parciais (WÜBBENA et al., 1996), algoritmos de interpolação (GAO; LI; MCLELLAN, 1997) e algoritmo de ajustamento condicional (RAQUET, 1998). As correções também podem ser utilizadas para gerar dados de uma estação de referência virtual (*Virtual Reference Station - VRS*) próxima ao usuário ou pode ser aplicado o conceito de MAC (*Master-Auxiliary Concept*) (EULER et al., 2001; VOLLATH et al., 2002, LACHAPELLE; ALVES, 2002). Maiores detalhes sobre este método de posicionamento podem ser encontrados em Alves e Monico (2011), Alves et al. (2016) e Jerez e Alves (2019).

9 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

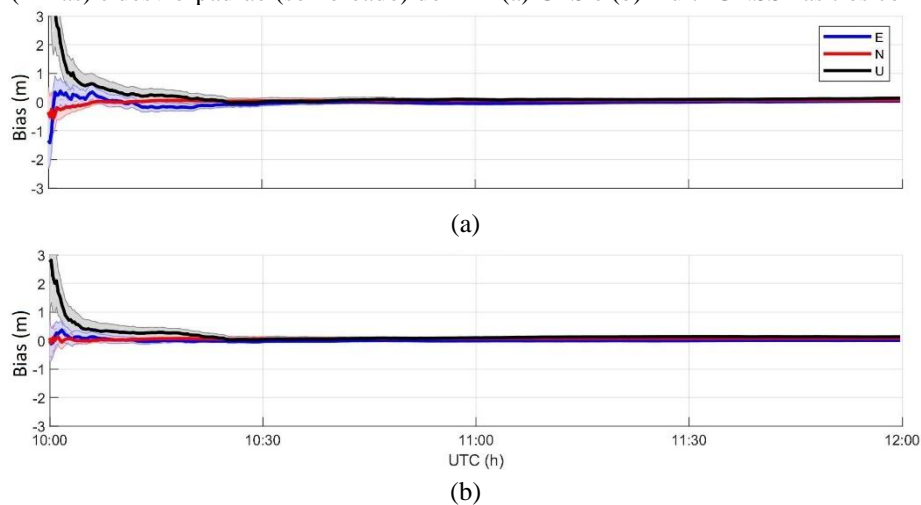
O PPP surge como alternativa ao posicionamento relativo (ODIJK, 2017), com a principal vantagem da não necessidade de uma estação base para diferenciação das observações, sendo assim necessário o uso de apenas um receptor a nível do usuário (ZUMBERGE et al., 1997; KOUBA; HÉROUX, 2001). Devido a isso, o método vem sendo cada vez mais utilizado em atividades que requerem alta acurácia, como levantamentos topográficos e geodésicos e monitoramento de estruturas e do movimento da crosta terrestre (AN; MENG; JIANG, 2020). Em sua concepção original, o método requer uso de observações de fase e pseudodistância em dupla frequência GPS, órbitas e relógios precisos e modelagem dos erros envolvidos. As ambiguidades das observações de fase são tratadas como reais, sendo uma combinação dos valores inteiros da ambiguidade somados às tendências de hardware originadas tanto nos satélites quanto no receptor (KOUBA et al., 2017).

Pesquisas realizadas nas duas últimas décadas (HÉROUX; KOUBA, 2001; SEEPERSAD; BISNATH, 2014) demonstraram o potencial de obtenção de acurácia milimétrica a centimétrica do método em sua concepção original tanto em modo estático quanto em cinemático, em que são utilizados dados de dupla frequência GPS na combinação livre de ionosfera e um período longo de coleta de dados. A principal desvantagem do PPP, entretanto, encontra-se no tempo de convergência da solução, definido como o tempo decorrido desde o início da coleta de dados até a época em que a estimativa da posição do receptor atinge um determinado nível de acurácia, não mais se desviando dele (KOUBA et al., 2017). Este tempo de convergência

está diretamente ligado ao nível de ruído da pseudodistância no receptor e do local em que o posicionamento está sendo realizado (nível de multicaminho, ionosfera, antena, geometria dos satélites, etc.). Com uma modelagem adequada, o PPP multi-GNSS apresenta melhor acurácia e um tempo menor de convergência em relação ao PPP GPS (TEGEDOR; OVSTEDAL; VIGEN, 2014; LI et al., 2015; LIU et al., 2017b).

A Figura 6 apresenta o erro e desvio-padrão nas três componentes para o PPP. Utilizou-se a combinação livre de ionosfera para as frequências GPS e GLONASS L1 e L2, Galileo E1 e E5 e BDS B1 e B2. O tempo que o desvio padrão da solução GPS demorou para convergir para 10 cm foi de 25 min para a componente leste, 7 min para a componente norte e 45 min para a componente vertical. No caso multi-GNSS, o tempo de convergência foi reduzido para 12 min em leste, 5 min em norte e 31 min na componente vertical. Ao final das duas horas de processamento, o erro tridimensional GPS foi de 16,5 cm, com desvio-padrão de 3,8 cm, contra erro de 15,1 cm e 2,5 cm de desvio-padrão no processamento multi-GNSS, o que representa uma melhoria de 9% na acurácia tridimensional, e uma redução de 14 min no tempo de convergência.

Figura 6 – Erro (linhas) e desvio-padrão (sombreado) do PPP (a) GPS e (b) multi-GNSS nas três componentes locais.



Fonte: Os autores (2020).

10 PPP-RTK

Nos últimos anos, a comunidade geodésica tem direcionado um grande volume de estudos para soluções PPP em tempo real ou quase real. Foi nesse sentido que o IGS RTWG (*IGS Real-Time Working Group*) estabeleceu-se em 2001 visando investigar produtos precisos voltados às aplicações do método em tempo real (CAISSY; AGROTIS, 2011); resultados com acurácia centimétrica foram apresentados por Gao e Chen (2004). Nesse contexto, o RTPP (*Real-Time Pilot Project*) é iniciado pelo IGS em 2007. Nesse projeto emprega-se observações GNSS em tempo real obtidas de uma rede global. O RTS (*Real Time Service*) foi lançado oficialmente somente em 2013. Entre os produtos foram incluídas correções para as órbitas e relógios transmitidos dos satélites GPS (<http://www.rtigs.net>). Assim, para os usuários do serviço a acurácia centimétrica passa a ser possível com PPP em tempo real baseado nos produtos obtidos com redes GNSS globais (RIZOS et al., 2012; GRINTER; ROBERTS, 2013; OLIVERA JR et al., 2017). A tendência das pesquisas para PPP em tempo real também é verificada em eventos sobre GNSS realizados anualmente. Nessas sessões, o potencial do PPP para aplicações em tempo real foi evidenciado sistematicamente (WÜBBENA et al. 2005; LAURICHESSE; MERCIER, 2007; LAURICHESSE et al., 2009).

Analogamente ao que ocorre no modo pós-processado, uma das maiores dificuldades do PPP em tempo real é o tempo de convergência da solução, que ocorre porque o PPP tradicional realiza a estimativa de parâmetros de estado (como atraso troposférico) conjuntamente com as ambiguidades reais, o que exige um tempo de inicialização considerável. Na literatura, observa-se a necessidade de no mínimo ~30 min para convergência apropriada dos valores reais das ambiguidades, ainda que se disponha de boas condições de geometria dos satélites e pouca presença de multicaminho (GE et al. 2012; ROVIRA-GARCIA et al., 2015).

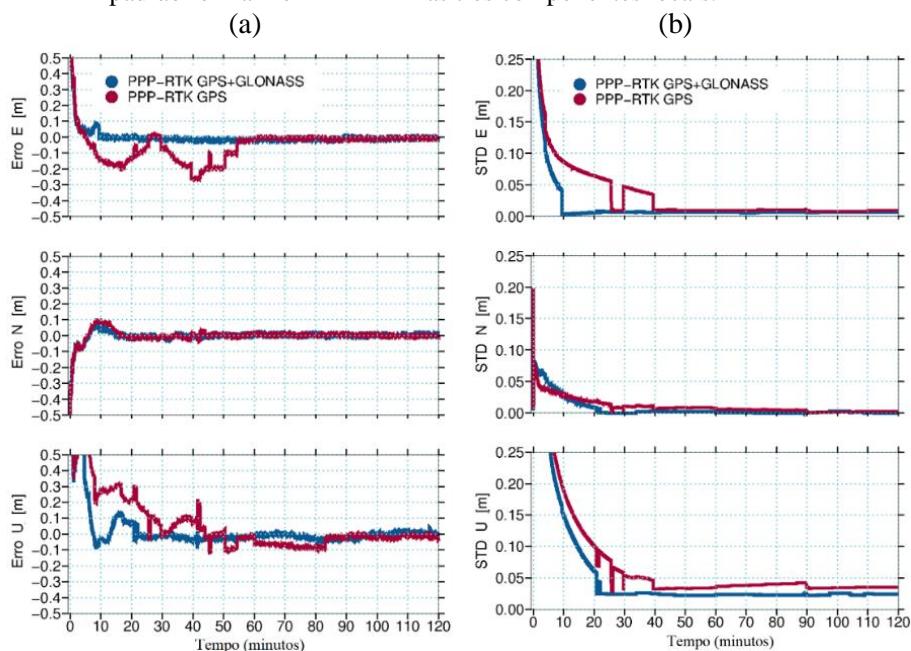
A praticidade e rentabilidade em termos de custo do PPP, bem como a disponibilidade de produtos precisos em tempo real, têm impulsionado as pesquisas que buscam algoritmos de fixação das ambiguidades

de fase para valores inteiros (MERVART et al., 2008; COLLINS et al., 2010; LAURICHESSE et al., 2010; GE et al., 2012). Observa-se que melhorias significativas são atingidas quando, em adição às correções de órbita e relógios, são fornecidos produtos relacionados às tendências instrumentais nas medidas de fase, que permitem obter uma solução confiável para as ambiguidades como valores inteiros (SHI & GAO 2014; TEUNISSEN e KHODABANDEH, 2015). Estes e outros avanços fortaleceram o conceito conhecido como SSR (*State Space Representation*), com o objetivo de isolar todos os erros físicos que afetam as observáveis GNSS (WÜBBENA et al. 2005; MERVART et al. 2013). Nesse sentido, resultados que incluem a aplicação de correções SSR para o efeito ionosférico e/ou atraso troposférico têm demonstrado avanços e costumam apresentar convergência ao nível do centímetro nos primeiros minutos ou mesmo segundos (LEANDRO et al. 2011; ROVIRA-GARCIA et al. 2015; OLIVEIRA JR 2017; OLIVEIRA JR et al. 2020). Assim, a melhoria no tempo de convergência da solução é promovida conjuntamente pelas correções de tendências de hardware e pelas correções atmosféricas proporcionadas pelas redes de estações GNSS permanentes, conduzindo ao chamado PPP-RTK (WÜBBENA et al., 2005; 2014; STÜRZE et al. 2012; OLIVEIRA JR, 2017).

O PPP-RTK se apresenta como solução de posicionamento baseado em correções SSR e como potencial solução rival ou complementar aos tradicionais métodos de RTK ou NRTK. Isso se mostra viável especialmente se as correções SSR forem geradas a partir de redes GNSS mais esparsas do que aquelas requeridas para geração de correções NRTK, com uma infraestrutura menos onerosa. No entanto, as performances da modelagem atmosférica para geração de correções SSR dependem da topologia da rede e das condições atmosféricas e avanços ainda são necessários para garantir a confiabilidade e integridade das soluções de modo equivalente ao que se tem no NRTK. Os avanços na realização de posicionamento multi-GNSS certamente trarão mais melhorias e perspectivas para os algoritmos de PPP-RTK.

A Figura 7 apresenta os resultados de um teste com 2 horas de dados, utilizando-se o programa PPP-WIZARD e os produtos disponibilizados pelo CNES (*Centre Nationale d'Etudes Spatiales*) em tempo real para órbita, relógio e tendências de fase que permitem realizar PPP-RTK. Na primeira solução utiliza-se somente a constelação GPS e na segunda utiliza-se GPS+GLONASS. É realizado posicionamento no modo cinemático e a primeira tentativa de fixação das ambiguidades após 1h de inicialização. Considerando-se o erro das coordenadas (Figura 7a), a solução GPS levou em torno de 50 min para alcançar 10 cm considerando-se o posicionamento tridimensional; a solução GPS+GLONASS atingiu essa marca em 19 min. O ganho maior foi na componente altimétrica e na componente leste. Comportamento similar é verificado para o desvio-padrão formal da solução (Figura 7b), onde são ainda mais nítidos os ganhos com o maior número de observações da solução em que se utiliza mais de uma constelação.

Figura 7 – Exemplo de convergência em termos de discrepância em relação (a) às coordenadas verdadeiras e (b) desvio padrão formal no PPP-RTK nas três componentes locais.



Fonte: Os autores (2020).

11 TENDÊNCIAS E DESAFIOS NO POSICIONAMENTO MULTI-GNSS

Os sistemas globais estarão totalmente operacionais até 2021. Com o lançamento dos satélites GPS III, modernizados, o sistema GPS melhorará sua robustez nos próximos anos. O GLONASS tem planos de modernização semelhantes. Satélites GLONASS-B transmitirão novos sinais CDMA nas três bandas de frequência GLONASS, com previsão de lançamento para 2023, com seis satélites até 2025. O Galileo prevê uma robustez melhor do que o GPS, e vem sendo estudado, como evolução para o sistema, um aspecto regional de satélites IGSO na Europa. O BDS é atualmente o único que possui um sistema regional, que deverá ser estendido, nos próximos anos, por uma componente de satélites LEO (*Low Earth Orbit*), denominada Centispace-1 (HEIN, 2020). Quando os quatro sistemas globais atingirem suas constelações completas, teremos mais de 120 satélites operacionais transmitindo sinais em diferentes frequências. Isso contribuirá significativamente para o posicionamento atual, em que normalmente dados de dupla frequência GPS são adotados. Pode-se esperar para os próximos anos, portanto, melhorias nos métodos de posicionamento tanto na acurácia da estimativa da posição quanto no tempo de coleta de dados, modelagem mais robusta dos erros que afetam as observáveis GNSS, bem como o surgimento de novas aplicações para os sinais, como no sensoriamento remoto geodésico e aplicações de tempo real. Dentre os desafios e tendências deste tópico pode-se destacar a modelagem estocástica multi-GNSS, a modelagem atmosférica, o uso de receptores e antenas de baixo custo e a aplicação do GNSS na aviação civil.

O advento da rede 5G pode ser considerado uma tendência no posicionamento GNSS, uma vez que a rede pode fornecer posicionamento centimétrico, em escala local, com o auxílio de uma rede densa de estações base. Um ponto interessante é a integração do 5G com o GNSS em áreas urbanas, devido ao posicionamento por GNSS ter sua acurácia deteriorada devido à disponibilidade limitada de sinais e multicaminho. Assim, tal integração pode resultar em posicionamento mais acurado (PERAL-ROSADO et al., 2018), mas, ainda, é necessária a compatibilidade e interoperabilidade entre o 5G e o GNSS.

A modelagem estocástica envolve a determinação das informações de variância das observáveis rastreadas pelos receptores multi-GNSS. Isso é importante para obter estimativas precisas dos parâmetros desconhecidos e, uma vez que os modelos estocásticos sejam determinados realisticamente, a incerteza dos parâmetros estimados será minimizada. Pela combinação de sistemas e sinais, a confiabilidade e a redundância dos modelos de posicionamento poderão ser melhoradas. Além disso, usando múltiplas frequências e atrasos atmosféricos mais precisos pode-se obter um posicionamento preciso de forma mais rápida quando comparado a cenários de simples ou dupla frequência.

Um ponto de importância que tem impacto especialmente na convergência do PPP é a modelagem atmosférica. No Brasil, isso se torna ainda mais relevante devido às condições peculiares da região, o que torna esse tema um desafio para posicionamento GNSS acurado. O comportamento da troposfera é extremamente variável devido à extensão territorial do país: algumas regiões sob influência da floresta Amazônica são extremamente úmidas enquanto outras no interior são extremamente secas, além da existência de regiões costeiras. Em se tratando da ionosfera, o país possui regiões com alta atividade ionosférica e irregularidades devido a sua localização em relação ao equador geomagnético (CAMARGO, 1999), o que exige o desenvolvimento de modelos robustos que sejam adequados a essa realidade. Com relação ao tratamento da troposfera no posicionamento, estudos realizados mostram que o uso de informações do atraso zenital úmido (*Zenith Wet Delay – ZWD*) a priori, advindos de uma rede regional, podem contribuir com a redução do tempo de convergência, especialmente quando poucas observáveis estão disponíveis (ZHENG et al., 2018). Alves et al. (2016) mostraram ainda que a utilização de modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo) na região brasileira pode melhorar a acurácia do PPP em até 3 vezes em relação à de modelos empíricos.

Pesquisas realizadas em regiões de atividade ionosférica mais estável que o Brasil têm mostrado que a melhor abordagem para uma rápida convergência no PPP é abandonar a combinação livre de ionosfera e incorporar ao ajustamento informações precisas da ionosfera derivados de alguma fonte externa, normalmente interpoladas do local ou regional (BANVILLE et al., 2014; ABDELAZEEM; ÇELIK; EL-RABBANY, 2017; OLIVEIRA JR., 2017; ZHAO et al., 2018). A inserção de informações a priori da ionosfera deixam as estimativas do atraso ionosférico robustas e evitam a amplificação de ruídos das combinações lineares (LOU

et al., 2016). Ao se abandonar a combinação livre de ionosfera, deve-se repensar os modelos, algoritmos e estratégias de processamento do PPP, uma vez que tanto a determinação da posição do usuário quanto a geração de órbitas e relógios precisos são baseadas nessa combinação. Assim, pesquisas dessa natureza também são uma tendência no Brasil, que possui condições ionosféricas peculiares, como já mencionado.

Nos últimos anos, o uso de receptores de baixo custo vem ganhando espaço em atividades de posicionamento de alta acurácia. Entre tais receptores, tem-se o uso de *smartphones* capazes de rastrear múltiplas constelações e frequências. As observações coletadas, entretanto, são até 90% mais ruidosas que as obtidas por receptores geodésicos, com valores de razão sinal ruído (*Signal to noise ratio* – SNR) muito baixos devido à sensibilidade ao multicaminho e a outros fatores como a polarização da antena (CHEN et al., 2019; WU et al., 2019; PAZIEWSKI, 2020). É necessário que se desenvolva métodos capazes de mitigar tais efeitos.

Nos próximos anos, dentre os principais desafios da navegação por satélite pode-se também destacar a segurança cibernética espacial, os detritos espaciais e a crise mundial de 2020. Com a evolução da inteligência artificial, mais riscos cibernéticos podem surgir, fazendo com que os responsáveis pelos sistemas e fabricantes de receptores apresentem novas soluções de segurança cibernética, visando desenvolver defesa para falsificação de sinais (PSIAKI; HUYPHREYS, 2016). Como destacado anteriormente, muitos satélites serão lançados nos próximos anos, o que faz com que o gerenciamento de detritos espaciais seja de suma importância. Nosso planeta está cercado por milhares de satélites artificiais, que diariamente levam conectividade à Internet e serviços de localização, dentre outros, para pessoas de todo o mundo. Devido a isso, há um imenso número de detritos espaciais, que tornam o espaço ao redor da Terra um lugar perigoso e que, sem providências, estarão totalmente fora dos limites para futuras missões e lançamentos de satélites e tecnologia (ESAb, 2020). O choque e a consequente crise causada pelo vírus SARS-CoV-2 (“coronavírus”), está criando interrupções em todos os setores da economia mundial. Deve-se avaliar até que ponto haverá um impacto desta crise na economia do setor espacial e, conseqüentemente, no GNSS. No que foi possível observar até aqui, houve lançamentos de satélites adiados, cadeias de suprimentos sendo interrompidas, o acesso a questões financeiras que ameaçam a sobrevivência de startups e eventos científicos sendo cancelados (SPACENEWS, 2020).

Como tendência, tem-se ainda a utilização do GNSS na navegação aérea. Por muitos anos, tecnologias ditas tradicionais têm sido utilizadas para este fim (PAMPLONA, 2014). Nos últimos anos, entretanto, tem havido uma crescente demanda pelo uso do espaço aéreo. O uso de novas tecnologias visa proporcionar um uso mais econômico e otimizado deste espaço, substituindo auxílios de rádios instalados em solo (FELUX et al., 2013). O GNSS se apresenta como uma tecnologia mais econômica, que dispensaria boa parte da infraestrutura de solo, facilitaria a realização de pousos de precisão de uma aeronave em condições visuais degradadas e proporcionaria maior flexibilidade nos procedimentos de pouso. A nível mundial, o GNSS tem sido utilizado para navegação em rota e procedimentos de pouso de categoria não precisa. Para procedimentos de precisão, tem-se como opção a utilização do GBAS e SBAS, capazes de fornecer informações adicionais de correção de erros, integridade, continuidade e disponibilidade dos sinais. Em território brasileiro, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) estuda a viabilidade da utilização do GNSS nas atividades de navegação aérea de precisão. O maior desafio nesse sentido é a influência da camada ionosférica sobre os sinais GNSS (FEUERLE et al., 2017; YOON et al., 2017; 2019; PEREIRA, 2018; SILVA, 2020).

Desde o lançamento dos primeiros satélites de navegação no final da década de 1970 até os dias atuais, muitos avanços foram alcançados no uso do GNSS. Do GPS e GLONASS, lançados inicialmente com fins militares, tem-se hoje disponíveis quatro sistemas globais quase completos, com a possibilidade de lançamento de outro sistema pelo Reino Unido devido a sua retirada do bloco econômico da União Europeia (GPS WORLD, 2019), além dos diversos sistemas de aumento regionais já lançados e em desenvolvimento. Da acurácia métrica inicial do sistema, é possível hoje que se realize posicionamento com alta acurácia, em tempo real, e com um tempo relativamente curto de coleta de dados. O avanço no uso do GNSS permitiu também que atividades que vão muito além do posicionamento se tornassem possíveis, como a modelagem da atmosfera terrestre. Embora muito se conheça sobre o GNSS e muito se tenha avançado até aqui, diversas pesquisas ainda deverão ser realizadas a fim de aprimorar a tecnologia dos sistemas, e novas aplicações para os sinais deverão surgir nos próximos anos e décadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 303553/2017-0) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo 2016/24861-3). Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (processo 465648/2014-2), FAPESP (processo 2017/50115-0) e CAPES (processo 88887.137186/2017-00).

Contribuição dos Autores

Os autores PTSJ e CMS foram responsáveis pela concepção, pela conceptualização e revisão do artigo. Os autores PTSJ e PSOJ participaram na curadoria dos dados e realização dos experimentos. Os autores PTSJ, CMS e PSOJ realizaram a redação inicial. Os autores DBMA e JFGM auxiliaram na conceptualização, revisão e supervisão do desenvolvimento do artigo.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ABDELAZEEM, M.; ÇELIK, R. N.; EL-RABBANY, A. An efficient regional ionospheric model using combined GPS/BeiDou observations. **Journal of Spatial Science**, 62(2), p. 323-335, 2017. DOI. 10.1080/14498596.2016.1253512.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. **GPS solutions**, 15(3), p. 253-261, 2011. DOI. 10.1007/s10291-010-0187-3.
- ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. First Brazilian Real Time Network DGPS through the Internet: Development, Application and Availability Analyses. **Journal of Geodetic Science**, 2(1), p. 1-7, 2012. DOI. 10.2478/v10156-011-0018-7.
- ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; DE SOUZA, E. M.; GOUVEIA, T. A. F.; MAGÁRIO, J. A. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. **GPS solutions**, 20(4), p. 677-685, 2016. DOI. 10.1007/s10291-015-0477-x.
- AN, X.; MENG, X.; JIANG, W. Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination. **Satellite Navigation**, 1(1), p. 1-13, 2020. DOI. 10.1186/s43020-020-0009-x.
- ASHKENAZI, V.; HILL, C.J.; OCHIENG, W.Y.; NAGLE, J. Wide-Area Differential GPS: A Performance Study. **Navigation**, 40(3), p. 297-319, 1993. DOI. 10.1002/j.2161-4296.1993.tb02310.x.
- BAKULA, M. Network Code DGPS Positioning and Reliable Estimation of Position Accuracy. **Survey Review**, 42, p. 82-91, 2010. DOI. 10.1179/003962610X12572516251448.
- BANVILLE, S.; COLLINS, P.; ZHANG, W.; LANGLEY, R.B. Global and regional ionospheric corrections for faster PPP convergence. **Journal of the Institute of Navigation**, 61(2), p. 115-124, 2014. DOI. 10.1002/navi.57.
- BEIDOU NAVIGATION SATELLITE SYSTEM. **The BDS-3 Constellation Deployment Is Fully Completed Six Months Ahead of Schedule UNOOSA Sends a Congratulation Letter**. Disponível em <http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202006/t20200623_20692.html>. Acesso em: jul. 2020.
- BORRE, K.; AKOS, D. M.; BERTELSEN, N.; RINDER, P.; JENSEN, S. H. **A software defined GPS and Galileo receiver**. 1.ed. Boston: Birkhäuser, 2007.
- CAISSY, M.; AGROTIS, L. **IGS Real-time Working Group and IGS Real-time Pilot Project**. 2011.

- CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em receptores de uma frequência**. 191 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CANNON, M.E. High accuracy GPS semikinematic positioning: Modeling and results, **Navigation** 37(1), p. 53–64, 1990.
- CAO, W., O'KEEFE, K.; CANNON, M. E. Partial ambiguity fixing within multiple frequencies and systems. In: ION GNSS 2007, 2007, Forth Worth, **Proceedings...** p. 312-323.
- CELLMER, S., PAZIEWSKI, J.; WIELGOSZ, P. Fast and precise positioning using MAFA method and new GPS and Galileo signals. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, 10(4), 172. P. 393–400, 2013. DOI. 10.13168/AGG.2013.0038.
- CHEN, B.; GAO, C.; LIU, Y.; SUN, P. Real-time precise point positioning with a Xiaomi MI 8 android smartphone. **Sensors**, 19(12), p. 2835, 2019. DOI. 10.3390/s19122835.
- COLLINS, P.; BISNATH, S.; LAHAYE, F.; HÉROUX, P. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. **Navigation**, v. 57, n. 2, p. 123–135, 2010. DOI. 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x.
- DALBELO, L. F. A.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. H. DGPS em rede: implementação, resultados e perspectiva de implantação em tempo real utilizando o NTRIP. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, V COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2017, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente, 2017, p. 358-364.
- DEFRAIGNE, P.; AERTS, W.; CERRETTO, G.; SIGNORILE, G.; CANTONI, E.; SESIA, I.; TAVELLA, P.; CERNIGLIARO, A.; SAMPERI, A.; SLEEWAEGEN, J.M. Advances on the use of Galileo signals in time metrology: calibrated time transfer and estimation of UTC and GGTO using a combined commercial GPS-Galileo receiver. In: 45TH ANNUAL PRECISE TIME AND TIME INTERVAL SYSTEMS AND APPLICATIONS MEETING, 2013, Washington. **Proceedings...**, Bellevue, Washington, 2013. p. 256-262.
- EULER, H. J.; KEENAN, R.; ZEBHAUSER, B. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah. **Proceedings...**, 2001.
- EUROPEAN GNSS AGENCY (GSA). **Galileo services**. Disponível em <<https://www.gsa.europa.eu/galileo/services>>. Acesso em: jun. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Galileo constellation status**. Disponível em < <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>>. Acesso em: nov. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESAb). **Space Debris**. Disponível em < https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris>. Acesso em: jul. 2020.
- FALCONE, M.; HAHN, J.; BURGER, T. **Galileo**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 247-272.
- FEAIRHELLER, S.; CLARK, R. Other Satellite Navigation Systems. In: KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (Ed.). **Understanding GPS: Principles and Applications**, 2 ed. Artech House, Norwood, 2006. p. 595-634.
- FELUX, M.; CIRCIU, M.S.; LEE, J.; HOLZAFEL, Ionospheric Gradient Threat Mitigation in Future Dual Frequency GBAS. **International Journal of Aerospace Engineering**, 2017. DOI. 10.1155/2017/4326018.
- FEUERLE, T.; STANISAK, M.; SAITO, S.; YOSHINARA, T.; LIPP, A. GBAS interoperability and Multi-Constellation/Multi-Frequency Trials. In: ENRI INTERNATIONAL WORKSHOP ON ATM/CNS EIAWAC 2017), 2017, Tokyo.
- FOTOPOULOS, G.; CANNON, M. E. An overview of multi-reference station methods for cm-level positioning. **GPS solutions**, 4(3), p. 1-10, 2001.
- GAO, Y.; LI, Z.; MCLELLAN, J. F. Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation. In: ION GPS 1997, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1997.

- GAO, Y.; CHEN, K. Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 3, n. 1–2, p. 95–100, 2004.
- GAO, W.; GAO, C.; PAN, S. A method of GPS/BDS/GLONASS combined RTK positioning for middle-long baseline with partial ambiguity resolution. **Survey review**, 49(354), p. 212–220. 2017, DOI. 10.1179/1752270615Y.0000000047.
- GE, M.; DOUŠA, J.; LI, X.; RAMATSCHI, M.; NISCHAN, T.; WICKERT, J. A Novel Real-time Precise Positioning Service System: Global Precise Point Positioning With Regional Augmentation. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 11, n. 1, p. 2–10, 2012. DOI. 10.5081/jgps.11.1.2.
- GOAD, C. C.; REMONDI, B. W. Initial relative positioning results using the Global Positioning System. **Bulletin Geodesique**, 58(2), p.193-210, 1984.
- GPS: THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM. **Space segment**. Disponível em <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: nov. 2020.
- GPS WORLD. **UKspace 'manifesto' recommends post-Brexit UK GNSS**. 2019. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/uk-space-manifesto-recommends-post-brexit-uk-gnss/>>. Acesso em: jul. 2020.
- GRINTER, T.; ROBERTS, C. Real time precise point positioning: are we there yet. In: IGNSS SYMPOSIUM, 2013, Gold Coast, Queensland, Australia. **Proceedings...**, Gold Coast, 2013.
- GRUBER, T.; WILLBERG, M. Signal and error assessment of GOCE-based high resolution gravity field models. **Journal of Geodetic Science**, v. 9, n. 1, p. 71–86, 2019. DOI. 10.1515/jogs-2019-0008.
- HE, H., LI, J., YANG, Y., XU, J., GUO, H.; WANG, A. Performance assessment of single-and dual-frequency BeiDou/GPS single-epoch kinematic positioning. **GPS solutions**, 18(3), p. 393-403. 2014. DOI. 10.1007/s10291-013-0339-3.
- HEGARTY, C. J. The Global Positioning System (GPS). In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 197-218.
- HEIN, G.W. Status, perspectives and trends of satellite navigation. **Satellite Navigation**, 1(1), pp.1-12, 2020. DOI. 10.1186/s43020-020-00023-x.
- HEROUX, P, KOUBA, J. GPS precise point positioning using IGS orbit products. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy** .26(6–8), p. 573–578, 2001. DOI. 10.1016/S1464-1895(01)00103-X.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; REMONDI, B. W. The antenna exchange: One aspect of high-precision GPS kinematic survey. In GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying. Berlin, 1988, **Proceedings...**, p. 259-277, 1988.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GNSS –Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.
- IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: jul. 2020.
- INFORMATION AND ANALYSIS CENTER FOR POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING (IAC). **GLONASS Constellation Status**. Disponível em <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso em: nov. 2020.
- JEKELI, C. **Geometric Reference Systems in Geodesy**. Ohio State University: Lecture Note. 2002.
- JEKELI, C; MONTENBRUCK, O. Time and Reference Systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 25-58.
- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. Generation and performance analysis of GPS and GLONASS virtual data for positioning under different ionospheric conditions. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 25(2), e2019007, 1218

2019. DOI. 10.1590/s1982-21702019000200007.
- JIA Y.; BIAN L.; CAO Y.; MENG Y.; ZHANG L. Design and Analysis of Beidou Global Integrity System Based on LEO Augmentation. In: China Satellite Navigation Conference, 2020, Chengdu, China, **Proceedings...** DOI. 10.1007/978-981-15-3711-0_55.
- JULIEN, O., CANNON, M. E., ALVES, P.; LACHAPELLE, G. Triple frequency ambiguity resolution using GPS/Galileo. *European Journal of Navigation*, 2(2), p. 51-56, 2004.
- KEE, C.; PARKINSON, B. W.; AXELRAD, P. Wide area differential GPS. *Navigation*, 38(2), p. 123-145, 1991. 10.1002/j.2161-4296.1991.tb01720.x.
- KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, p.325-331, 1987. DOI. 10.1109/TAES.1987.310829.
- KOGURE, S.; GANESHAN, A. S.; MONTENBRUCK, O. Regional Systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 305-338.
- KOUBA, J., HÉROUX, P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. **GPS Solutions**. 5, p. 12-28, 2001. DOI. 10.1007/PL00012883.
- KOUBA, J.; LAHAYE, F.; TÉTREAU, P. Precise Point Positioning. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 723-752.
- LACHAPELLE, G.; ALVES, P. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.133-136, 2002.
- LANGLEY, R. B. Dilution of Precision. **GPS World**. 1999.
- LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 3-24.
- LAURICHESSE, D.; MERCIER, F. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP. In: 20TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2007, Fort Worth. **Proceedings...** Fort Worth, 2007, p. 839-848.
- LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J.-P. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. In: 23RD INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2010), 2010, Portland. **Proceedings...** Portland, 2010.
- LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J.-P.; BROCA, P.; CERRI, L. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination. **Navigation**, v. 56, n. 2, 2009. DOI. 10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x.
- LAURICHESSE, D., PRIVAT, A., 2015. An Open-source PPP Client Implementation for the CNES PPP-WIZARD Demonstrator In: 28TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2015), 2015, Dana Point. **Proceedings...** Dana Point, 2015, p.2780-2789.
- LEANDRO, R.; LANDAU, H.; NITSCHKE, M.; GLOCKER, M.; SEEGER, S.; CHEN, X.; DEKING, A.; BENTAHAR, M.; ZHANG, F.; FERGUSON, K.; STOLZ, R. RTX positioning: the next generation of cm-accurate real-time GNSS positioning. In: ION GNSS, 2011, Portland. **Proceedings...** v. 14601475, Portland, 2011.
- LI, J., YANG, Y., XU, J., HE, H.; GUO, H. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual-and triple-frequency observations. **GPS solutions**, 19(1), p. 5-13, 2015. DOI. 10.1007/s10291-013-0360-6.
- LI, T., ZHANG, H., GAO, Z., CHEN, Q.; NIU, X. High-accuracy positioning in urban environments using

- single-frequency multi-GNSS RTK/MEMS-IMU integration. **Remote sensing**, 10(2), p. 205, 2018. DOI. 10.3390/rs10020205.
- LI, X.; GE, M.; DOUŠA, J.; WICKERT, J. Real-time precise point positioning regional augmentation for large GPS reference networks. **GPS Solutions**, v. 18, n. 1, p. 61–71, 2014. DOI. 10.1007/s10291-013-0310-3.
- LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCH, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. **Scientific Reports**, 2015. DOI 10.1038/srep08328.
- LIU, J.; GU, D.; JU, B.; YAO, J.; DUAN, X.; YI, D. Basic performance of BeiDou-2 navigation satellite system used in LEO satellites precise orbit determination. **Chinese Journal of Aeronautics**, 27(5), pp.1251-1258, 2014. DOI. 10.1016/j.cja.2014.03.006.
- LIU, H.; SHU, B.; XU, L.; QIAN, C.; ZHANG, R.; ZHANG, M. Accounting for inter-system bias in DGNSS positioning with GPS/GLONASS/BDS/Galileo. **The Journal of Navigation**, 70(4), p.686, 2017a. DOI 10.1017/S0373463316000825.
- LIU, T.; YUAN, Y.; ZHANG, B.; WANG, N.; TAN, B.; CHEN, Y. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations. **Journal of Geodesy**, 91(3), p. 253-268, 2017b. DOI. 10.1007/s00190-016-0960-3.
- LOU, Y.; ZHENG, F.; GU, S.; WANG, C.; GUO, H.; FENG, Y. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models. **GPS solutions**, 20(4), p. 849-862, 2016. DOI. 10.1007/s10291-015-0495-8.
- MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 244f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.
- MERVART, L.; LUKES, Z.; ROCKEN, C.; IWABUCHI, T. Precise Point Positioning with ambiguity resolution in real-time. In: 21ST INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2008), 2008, Savannah. **Proceedings...** Savannah, 2008, p.397–405.
- MERVART, L.; ROCKEN, C.; IWABUCHI, T.; KANZAKI, M. Precise Point Positioning with Fast Ambiguity Resolution – Prerequisites, Algorithms and Performance. In: 26TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2013), 2013, Nashville. **Proceedings...** Nashville, 2013, p.1176–1185, 2013.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª edição. São Paulo: EditoraUnesp, 2008.
- MONTENBRUCK, O.; HAUSCHILD, A.; HESSELS, U. Characterization of GPS/GIOVE sensor stations in the CONGO network. **GPS solutions**, 15(3), p. 193–205, 2011. DOI. 10.1007/s10291-010-0182-8.
- MONTENBRUCK, O.; STEIGENBERGER, P.; PRANGE, L.; DENG, Z.; ZHAO, Q.; PEROSANZ, F.; ROMERO, I.; NOLL, C.; STURZE, A.; WEBER, G.; SCHMID, R.; MACLEOD, K.; SCHAER, S. The multi-GNSS experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – achievements, prospects and challenges. **Advances in Space Research**, v. 59, no 7, p. 1671-1697, 2017. DOI. 10.1016/j.asr.2017.01.011.
- NADARAJAH, N.; TEUNISSEN, P. J.; RAZIQ, N. BeiDou inter-satellite-type bias evaluation and calibration for mixed receiver attitude determination. **Sensors**, 13(7), p.9435-9463, 2013. DOI. 10.3390/s130709435.
- NADARAJAH, N.; TEUNISSEN, P. J.; SLEEWAEGEN, J. M.; MONTENBRUCK, O. The mixed-receiver BeiDou inter-satellite-type bias and its impact on RTK positioning. **GPS Solutions**, 19(3), p. 357-368. DOI. 10.1007/s10291-014-0392-6.
- ODIJK, D. Positioning Model. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 605-638.
- ODIJK, D., NADARAJAH, N., ZAMINPARDAZ, S.; TEUNISSEN, P. J. GPS, Galileo, QZSS and IRNSS differential ISBS: estimation and application. **GPS solutions**, 21(2), p. 439–450, 2017. DOI.

10.1007/s10291-016-0536-y.

- ODIJK, D.; TEUNISSEN, P. J. G. Characterization of between-receiver GPS-Galileo inter-system biases and their effect on mixed ambiguity resolution. **GPS Solutions**, 17(4), p. 521–533, 2013. DOI. 10.1007/s10291-012-0298-0.
- ODIJK, D.; WANNINGER, L. Differential positioning. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 753-780.
- ODOLINSKI, R., TEUNISSEN, P. J. G.; ODIJK, D. Combined GPS+ BDS for short to long baseline RTK positioning. **Measurement Science and Technology**, 26(4), 045801, 2015. DOI. 10.1088/0957-0233/26/4/045801
- OLIVEIRA JR, P. S.; MOREL, L.; FUND, F.; LEGROS, R.; MONICO, J. F. G.; DURAND, S.; DURAND, F. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. **GPS Solutions**, v. 21, p. 237-250, 2017. DOI. 10.1007/s10291-016-0518-0.
- OLIVEIRA JR, P. S.; F. G. MONICO, J.; MOREL, L. Mitigation of receiver biases in ionospheric observables from PPP with ambiguity resolution. **Advances in Space Research**, v. 01, p. 01, 2020. DOI. 10.1016/j.asr.2020.01.037.
- OLIVEIRA JR, P. S. **Definition and implementation of a new service for precise GNSS positioning**. Instrumentation and Detectors [physics.ins-det]. Tese de doutorado, cotutela: Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), 2017.
- PAMPLONA, D. A. **Mensuração dos Benefícios pela Introdução dos Procedimentos de Navegação Baseados em Performance (PBN)**. Dissertação (Mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos). Instituto de Tecnologia de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2014.
- PARKINS, A. Increasing GNSS RTK availability with a new single-epoch batch partial ambiguity resolution algorithm. **GPS solutions**, 15(4), p. 391–402, 2011. DOI. 10.1007/s10291-010-0198-0.
- PAZIEWSKI, J. Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. *Meas. Sci. Technol*, 31(091001), p. 091001, 2020. DOI 10.1088/1361-6501/ab8a7d.
- PAZIEWSKI, J.; SIERADZKI, R. Integrated GPS + BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: Signal analysis, methodology and performance assessment. **Advances in Space Research**, 60(12), p. 2561–2573, 2017. DOI. 10.1016/j.asr.2017.04.016.
- PAZIEWSKI, J.; WIELGOSZ, P. Accounting for Galileo – GPS inter-system biases in precise satellite positioning. **Journal of Geodesy**, 89(1), p. 81–93, 2015. DOI. 10.1007/s00190-014-0763-3.
- PERAL-ROSADO, D., JOSÉ, A., SALORANTA, J., DESTINO, G., LÓPEZ-SALCEDO, J. A.; SECO-GRANADOS, G. Methodology for simulating 5G and GNSS high-accuracy positioning. **Sensors**, 18, p. 3220, 2018. DOI. 10.3390/s18103220.
- PEREIRA, V. A. S. **Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil**. 305f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2018.
- PSIAKI, M. L.; HUMPHREYS, T. E. GNSS Spoofing and Detection. **Proceedings of the IEEE**, 104(6), p. 1258-1270, 2016. DOI. 10.1109/JPROC.2016.2526658.
- PULLEN, S. Ground based augmentation systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 905-932.
- RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. **Annals of Geophysics**, vol. 52, n. ¾, p. 417-422, 2009.
- RAQUET, J. **Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers**. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary. 1998.
- REMONDI, B. W. Global Positioning System carrier phase: description and use. **Bulletin géodésique**, 59(4), 361-377, 1985.
- REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A.; MONTENBRUCK, O. GLONASS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite**

- Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 219-246.
- RIZOS, C.; JANSSEN, V.; ROBERTS, C.; GRINTER, T. PPP versus DGNSS. **Geomatics World**, v. 20, n. 6, p. 18–20, 2012.
- ROVIRA-GARCIA, A.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; GONZALEZ-CASADO, G. A Worldwide Ionospheric Model for Fast Precise Point Positioning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 8, p. 4596–4604, 2015. DOI. 10.1109/TGRS.2015.2402598.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2^o ed. New York: Walter de Gruyter, 2003.
- SEEPERSAD, G.; BISNATH, S. Challenges in assessing PPP performance. **Journal of Applied Geodesy** 8(3), p. 205–222, 2014. DOI. 10.1515/jag-2014-0008.
- SHI, J.; GAO, Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. **GPS Solutions**, v. 18, n. 4, p. 519–528, 2014. DOI. 10.1007/s10291-013-0348-2.
- SILVA, W. C. **GBAS**: fundamentos, simulações e análises de disponibilidade em função do sigma vig. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2020.
- SPACENEWS. **Pandemic pushes SpaceX GPS 3 launch to late June**. 2020. Disponível em <<https://spacenews.com/spacex-launch-of-gps-satellite-delayed-due-to-pandemic/>>. Acesso em: jul. 2020.
- STÜRZE, A.; MERVART, L.; SÖHNE, W.; WEBER, G.; WÜBBENA, G. Real-Time PPP using open CORS Networks and RTCM Standards. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE CONTROL & GUIDANCE, 2012, Chengdu. **Anais...** Chengdu, 2012.
- TAKASU, T. **RTKLIB** ver. 2.4.2 Manual. 2013.
- TEGEDOR, J.; OVSTEDAL, O.; VIGEN, E. Precise orbit determination and point positioning using GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. **Journal of Geodetic Science**, 4(1), p. 2081–9943, 2014. DOI. 10.2478/jogs-2014-0008.
- TEUNISSEN, P. J. G.; KHODABANDEH, A. Review and principles of PPP-RTK methods. **Journal of Geodesy**, v. 89, n. 3, p. 217–240, 2015. DOI. 10.1007/s00190-014-0771-3.
- TEUNISSEN, P. J. G., ODOLINSKI, R.; ODIJK, D. Instantaneous BeiDou+ GPS RTK positioning with high cut-off elevation angles. **Journal of geodesy**, 88(4), p. 335-350, 2014. DOI. 10.1007/s00190-013-0686-4
- VOLLATH, U.; LANDAU, H.; CHEN, X.; DOUCET, K.; PAGELS, C. Network RTK Versus Single Base RTK – Understanding the Error Characteristics. In: ION GNSS 2002, Portland, OR. **Proceedings...** 2002.
- WALTER, T. Satellite based augmentation systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017. p. 339-361.
- WU, Q.; SUN, M.; ZHOU, C.; ZHANG, P. Precise point positioning using dual-frequency GNSS observations on smartphone. **Sensors**, 19(9), p. 2189, 2019. DOI. 10.3390/s19092189.
- WÜBBENA, G.; BAGGE, A.; SEEBER, G.; BODER, V.; HANKEMEIER, P. Reducing Distance Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. In: ION GPS 1996, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1996.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BAGGE, A. PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks. In: 18TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2005), 2005, Long Beach. **Proceedings...** Long Beach, 2005, p.13–16.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BAGGE, A. **PPP with ambiguity resolution (AR) using RTCM-SSR**. In: IGS WORKSHOP, 2014, Pasadena.
- YANG, Y. Chinese geodetic coordinate system 2000. **Chinese Science Bulletin**, 54(15), p. 2714-2721, 2009. DOI. 10.1007/s11434-009-0342-9.
- YANG, Y.; TANG, J.; MONTENBRUCK, O. Chinese Navigation Satellite Systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (Ed.) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer,

Berlin, 2017. p. 273-304.

- YOON, M.; GILLESPIE, J.; MATHUR, N.; COLE, R.; RODRIGUES, J.; SOUZA, D. E.; DOHERTY, P.; PRADIPTA, R. Equatorial Plasma Bubble Threat Parameterization to Support GBAS Operations in the Brazilian Region. **Navigation**. Journal of the Institute of Navigation, [s. l.], v. 64, n. 3, p. 309–321, 2017. DOI. 10.1002/navi.203.
- YOON, M.; KIM, D.; PULLEN, S.; LEE, J. Assessment and mitigation of equatorial plasma bubble impacts on category I GBAS operations in the Brazilian region. **Navigation**. Journal of the Institute of Navigation, [s. l.], v. 66, n. 3, p. 643–659, 2019. DOI. 10.1002/navi.328.
- ZHANG, W., CANNON, M.E.; JULIEN, O; ALVES, P. Investigation of combined GPS/Galileo cascading ambiguity resolution schemes. In: ION GPS/GNSS, 2003, Portland, **Proceedings...**, p. 2599–2610.
- ZHANG, Y., KUBO, N., CHEN, J., CHU, F. Y., WANG, H.; WANG, J. Contribution of QZSS with four satellites to multi-GNSS long baseline RTK. **Journal of Spatial Science**, 65(1), p. 41-60, 2020. DOI. 10.1080/14498596.2019.1646676.
- ZHAO, Q., WANG, Y., GU, S., ZHENG, F., SHI, C., GE, M., SCHUH, H. Refining ionospheric delay modeling for undifferenced and uncombined GNSS data processing. **Journal of Geodesy**, 93(4), p. 545-560, 2018. DOI. 10.1007/s00190-018-1180-9.
- ZHENG, F.; LOU, Y.; GU, S.; GONG, X.; SHI, C. Modeling tropospheric wet delays with national GNSS reference network in China for BeiDou precise point positioning. **Journal of Geodesy**, p. 1-16, 2017. DOI. 10.1007/s00190-017-1080-4.
- ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **Journal of Geophysical Research**, Res. Solid Earth 102, p. 5005–5017, 1997. DOI. 10.1029/96JB03860.

Biografia dos autores



Paulo de Tarso Setti Júnior nasceu em Itapira - SP no ano de 1994. Possui graduação em Engenharia Cartográfica (2017) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Presidente Prudente, com período sanduíche na Universidade da Flórida (EUA) e estágio científico na Universidade de Miami (EUA). Recebeu o título de mestre em Ciências Cartográficas (2019) também pela FCT/UNESP, com período sanduíche na Universidade de Nottingham (Reino Unido). É atualmente doutorando em *Science and Engineering* pela Universidade de Luxemburgo. Suas áreas de interesse incluem posicionamento multi-GNSS, refletometria GNSS e estimativa de parâmetros geofísicos a partir de dados GNSS.



Crislaine Menezes da Silva, nascida em Presidente Prudente - SP em 1988. Possui Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT, Presidente Prudente/SP (2015) e graduação em Licenciatura em Matemática pela mesma instituição (2012). Recebeu o *Outstanding Paper Award for Young Scientists* do COSPAR (2020) e é entusiasta da divulgação científica. Atualmente, doutoranda em Ciências Cartográficas pela FCT/UNESP com período sanduíche na Universidade de Tecnologia de Delft, Países Baixos. Suas áreas de interesse incluem solução das ambiguidades inteiras, posicionamento multi-GNSS e suas aplicações.



Paulo Sérgio de Oliveira Jr, originário de Nantes-SP, é engenheiro cartógrafo pela Unesp (Universidade Estadual Paulista), Presidente Prudente-SP. Durante a graduação, realizou intercâmbio na ESGT (*École Supérieure des Géomètres et Topographes*), Le Mans, França, e estágio no GRACE (*GNSS Research and Application Centre of Excellence*), Nottingham, UK. Mestre em Ciências Cartográficas (Unesp) e doutor em Geomática sob cotutela internacional (ESGT/Unesp). O doutorado foi desenvolvido em contexto industrial junto à empresa Hexagon Geosystems, provedora de serviços GNSS na Europa. Atualmente, é docente na UFPR (Universidade Federal do Paraná), Curitiba-PR, e atua com pesquisas envolvendo Geodésia e posicionamento GNSS em tempo real.



Daniele Barroca Marra Alves nasceu na cidade de Presidente Prudente - SP no ano de 1980. É professora Assistente Doutora do Departamento de Cartografia da Universidade Estadual Paulista - UNESP e membro do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Possui graduação em Matemática pela FCT - UNESP (2001). Finalizou o Mestrado em Ciências Cartográficas em 2004, o Doutorado em 2008 e o Pós-Doutorado em 2011, na mesma instituição. Desde 2012 é pesquisadora do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Suas principais áreas de atuação são a modelagem atmosférica, rádio ocultação e o posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*).



João Francisco Galera Monico, nasceu em Lupionópolis, PR em 1956. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Unesp (1982), Mestrado em Ciências Geodésicas pela UFPR (1988) e Doutorado em Geodésia Espacial pela *University of Nottingham* (1995). Possui experiência na área de Geodésia, principalmente em Geodésia Celeste, GNSS para Geodésia e Monitoramento da Atmosfera, Ajustamento de Observações e Controle de Qualidade em Geodésia. É autor do livro *Posicionamento pelo GNSS* e vários artigos. Coordenou e coordena vários projetos financiados pelas principais agências de fomentos do Brasil, em destaque o INCT GNSS NavAer. Atualmente é Pesquisador II na Unesp, em Presidente Prudente.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.