

JOÃO VITOR ESPINHOSA VIEIRA

**USO DE DADOS COMBINADOS MULTI-GNSS E SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA O POSICIONAMENTO POR PONTO**



JOÃO VITOR ESPINHOSA VIEIRA

**USO DE DADOS COMBINADOS MULTI-GNSS E SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA O POSICIONAMENTO POR PONTO**

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

**Orientadora: Dra. Daniele Barroca Marra Alves**

V658u

Vieira, João Vitor Espinhosa

Uso de dados combinados multi-GNSS e sua contribuição para o posicionamento por ponto / João Vitor Espinhosa Vieira. -- Presidente Prudente, 2025

93 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves

1. Posicionamento por Ponto. 2. Posicionamento multi-GNSS. 3. Ionosfera. I. Título.

### **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta dissertação promove avanços no uso de sistemas GNSS, contribuindo para maior precisão no monitoramento ambiental, infraestrutura e transporte. Alinhada aos ODS, fomenta a inovação tecnológica, o desenvolvimento sustentável e a integração científica em níveis nacional e internacional, fortalecendo a geotecnologia no Brasil.

### **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This dissertation advances the use of GNSS systems, contributing to greater accuracy in environmental monitoring, infrastructure, and transportation. Aligned with the SDGs, it fosters technological innovation, sustainable development, and scientific integration at national and international levels, strengthening geotechnology in Brazil.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Uso de dados combinados multi-GNSS e sua contribuição para o posicionamento por ponto preciso


**AUTOR: JOÃO VITOR ESPINHOSA VIEIRA**

**ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES (Participação Presencial)  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Prof. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER (Participação Virtual)  
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

  
Prof. Dr. HAROLDO ANTONIO MARQUES (Participação Presencial)  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Presidente Prudente, 19 de fevereiro de 2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Lucilene, por ter me proporcionado a base necessária para que eu pudesse me tornar o ser humano que sou hoje. Obrigado por todo o amor, apoio incondicional e por ser essa mulher tão forte.

À minha avó Ilda e ao meu avô Paulo (*in memoriam*), por nunca medirem esforços e sempre me apoiarem na concretização dos meus objetivos. Aos meus irmãos Bianca, Daniel e Camila, pela parceria e incentivo desde sempre. Ao meu padrasto Léo e aos meus tios Alexandre e Luciana, por todos os conselhos ao longo da minha vida. Aos meus fiéis companheiros, Belize e Laos, por terem acompanhado de perto (muitas vezes em cima do teclado) e me ajudado na conclusão desse trabalho.

As minhas grandes amigas, Glória e Allana, que desde a graduação compartilharam comigo grandes momentos em cervejadas, festas no Balancê ou ainda estudando por incansáveis horas na Biblioteca. Aos amigos que a UNESP me proporcionou, Sia, Beatriz, Mariana e Vitória, por todas as conversas e risadas ao longo da graduação.

Aos meus grandes amigos e irmãos que a vida me deu João Paulo, Reversi e João Roberto, pelos vários momentos de alegria compartilhados juntos nesses longos anos.

Aos professores Mauro, Edmur e Amorim (*in memoriam*), por todos os ensinamentos, conselhos e conversas que muitas vezes fugiram da esfera acadêmica e falaram sobre a vida. Ao curso de Engenharia Cartográfica, em especial as entidades EJECart e C.A.M.A., por terem me proporcionado a vivência de grandes experiências e contribuído para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos professores Haroldo, Claudia e Galera pelas valiosas contribuições. Aos membros do GEGE por todas as discussões. Ao Paulo, Valder e Zaupa, por todas as trocas durante nossas reuniões semanais. Em especial, agradeço à minha orientadora, Daniele, por toda a paciência, confiança e por ser exemplo. Obrigado pela oportunidade de fazer ciência e contribuir de alguma forma com a nossa sociedade.

À UNESP, pela formação e estrutura fornecida. Ao IBGE e IGS pelo fornecimento dos dados utilizados nessa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre.”*

(Paulo Freire)

## RESUMO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) vem sendo cada vez mais empregados em diversas atividades que necessitam de estimativas de posição. Além de ser composto pelo sistema norte-americano GPS (*Global Positioning System*) e pelo russo GLONASS (*GLOBAL NAVIGATION Satellite System*), fazem parte ainda do GNSS o já declarado operacional BeiDou (BDS - *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System*) e o europeu Galileo, que se encontra em fase final de implantação. Com a evolução desses sistemas tornou-se de interesse a utilização conjunta dos dados obtidos, melhorando a disponibilidade e acurácia do posicionamento. Ao longo dos anos, diversos métodos de posicionamento pelo GNSS surgiram, entre os quais pode ser citado o Posicionamento por Ponto (PP). Diversas são as fontes de erros envolvidas na estimação da posição pelo PP, tornando de extrema importância a correção, modelagem ou minimização destes erros. Nesse contexto, essa pesquisa buscou contribuir com o tema por meio da utilização de um *software* científico em desenvolvimento, que realiza o PP para os diferentes sistemas, possibilitando a investigação e avaliação dos benefícios do posicionamento multi-GNSS. Assim, na presente dissertação são apresentados os sistemas envolvidos no GNSS, os principais métodos de posicionamento, bem como a observável, erros e modelos matemáticos envolvidos no método PP. Dois experimentos foram realizados de modo a avaliar a acurácia do PP considerando os sistemas envolvidos no GNSS de forma autônoma e integrada, em estações do IGS (*International GNSS Service*) localizadas em diferentes latitudes, em dois períodos do ano de 2022 com atividade ionosférica distintas. Os resultados do experimento evidenciaram os benefícios do posicionamento multi-GNSS na estimativa da posição, com uma melhoria média de 23,76% em relação aos outros sistemas utilizados de forma autônoma. A combinação GPS e Galileo apresentou melhores resultados que a combinação multi-GNSS em 19,12% das estações selecionadas. Os piores resultados foram obtidos para o sistema BeiDou no mês de outubro, em estações presentes na região equatorial da ionosfera. Em contrapartida, os resultados mais promissores foram atingidos ao utilizar a combinação multi-GNSS durante o mês de junho, especialmente em regiões de elevadas latitudes.

**Palavras-chave:** Posicionamento por Ponto, posicionamento multi-GNSS, Ionosfera.

## ABSTRACT

The Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have been increasingly employed in various activities requiring position estimates. In addition to comprising the North American system GPS (Global Positioning System) and the Russian GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), the GNSS also includes the operational BeiDou (BDS - BeiDou Navigation Satellite Demonstration System) and the European Galileo, which is in its final implementation phase. With the evolution of these systems, there has been a growing interest in the joint use of the obtained data to improve the availability and accuracy of positioning. Over the years, various GNSS positioning methods have emerged, one of which is Point Positioning (PP). There are several sources of errors involved in PP position estimation, making it crucial to correct, model, or minimize these errors. In this context, this research aimed to contribute to the topic by using a developing scientific software that performs PP for different systems, allowing the investigation and evaluation of the benefits of multi-GNSS positioning. Thus, this dissertation presents the systems involved in GNSS, the main positioning methods, as well as the observables, errors, and mathematical models involved in the PP method. Two experiments were conducted to evaluate the accuracy of PP considering the GNSS systems autonomously and integratively, at International GNSS Service (IGS) stations located at different latitudes during two periods in the year 2022 with distinct ionospheric activity. The experiment results highlighted the benefits of multi-GNSS positioning in position estimation, with an average improvement of 23.76% compared to other autonomously used systems. The GPS and Galileo combination presented better results than the multi-GNSS combination in 19.12% of the selected stations. The worst results were obtained for the BeiDou system in October, in stations located in the equatorial region of the ionosphere. In contrast, the most promising results were achieved when using the multi-GNSS combination during June, especially in regions of high latitudes.

**Keywords:** Point Positioning, multi-GNSS positioning, Ionosphere.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Blocos de satélites GPS. ....	24
Figura 2 - Estações de controle do sistema GPS. ....	25
Figura 3 - Blocos de satélites GLONASS. ....	27
Figura 4 – Fluxograma do <i>software</i> utilizado.....	44
Figura 5 – Estações IGS. ....	45
Figura 6 - TEC para a estação RDSD nos dias 01 de junho (a) e 01 de outubro (b) de 2022. .	49
Figura 7 - TEC para a estação CUIB nos dias 01 de junho (a) e 01 de outubro (b) de 2022. .	50
Figura 8 - Número de satélites e PDOP para estação RDSD no DOY 152.....	51
Figura 9 - Número de satélites e PDOP para estação RDSD no DOY 274.....	51
Figura 10 - Número de satélites e PDOP para estação CUIB no DOY 152.....	52
Figura 11 - Número de satélites e PDOP para estação CUIB no DOY 274.....	52
Figura 12 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação RDSD para o DOY 152. ....	54
Figura 13 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação RDSD para o DOY 274. ....	55
Figura 14 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação CUIB para o DOY 152. ....	55
Figura 15 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação CUIB para o DOY 274. ....	56
Figura 16 – Número médio de satélites para as estações selecionadas no mês de junho. ....	61
Figura 17 – Número médio de satélites para as estações selecionadas no mês de outubro.....	62
Figura 18 - Número de satélites para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro. ....	63
Figura 19 - Número médio de satélites por sistema. ....	64
Figura 20 – PDOP para as estações selecionadas no mês de junho. ....	65
Figura 21 - PDOP para as estações selecionadas no mês de outubro.....	66
Figura 22 - PDOP para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.....	67
Figura 23 – PDOP médio por sistema. ....	68
Figura 24 – Número de épocas perdidas para as estações selecionadas no mês de junho. ....	69
Figura 25 - Número de épocas perdidas para as estações selecionadas no mês de outubro.....	70
Figura 26 – Número de épocas perdidas para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.....	71

Figura 27 – Número médio de épocas perdidas por sistema. ....	72
Figura 28 – RMS3D para as estações selecionadas no mês de junho. ....	73
Figura 29 – RMS3D para as estações selecionadas no mês de outubro. ....	76
Figura 30 – RMS3D média para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro. ....	78
Figura 31 – RMS3D média por sistema. ....	79
Figura 32 – Percentual de dias melhores GPS e Galileo em junho. ....	80
Figura 33 – Percentual de dias melhores GPS e Galileo em outubro. ....	81

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características dos sistemas GNSS. ....	22
Tabela 2 – Informações das estações IGS selecionadas. ....	44
Tabela 3 – Informações das estações IGS selecionadas. ....	47
Tabela 4 – Discrepância e desvio padrão 3D médio (metros) das estações RDSD e CUIB nos DOY 152 e 274. ....	57
Tabela 5 – RMS3D média (metros) para as estações RDSD e CUIB para os DOY 152 e 274. ....	58
Tabela 6 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações RDSD e CUIB para os DOY 152 e 274. ....	59
Tabela 7 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações selecionadas no mês de junho. ....	74
Tabela 8 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações selecionadas no mês de outubro. ....	77

## LISTA DE SIGLAS

BDT	<i>BeiDou Time</i>
CAS	<i>Chinese Academy of Sciences</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CGCS	<i>China Geodetic Coordinate System</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DIA	Detecção, Identificação e Adaptação
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
DOY	<i>Day of Year</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GAGAN	<i>GPS and GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GCS	<i>Ground Control Segment</i>
GDOP	<i>Geometric DOP</i>
GEGE	Grupo de Estudo em Geodésia Espacial
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GIOVE	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>GLObal NAtigation Satellite System</i>
GMS	<i>Ground Mission Segment</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GST	<i>Galileo System Time</i>
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>
HDOP	<i>Horizontal Dilution of Precision</i>
IAC	<i>Information and Analysis Center</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB	<i>Interchannel bias</i>

IGG	<i>Institute of Geodesy and Geophysics</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geo-Synchronous Orbit</i>
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOV	<i>In-Orbit Validation</i>
ISB	<i>Intersystem bias</i>
ISMR	<i>Ionospheric Scintillation Monitor Receivers</i>
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LEOP	<i>Launch and Early Operation</i>
LOCC	<i>LEOP Control Centers</i>
MEO	<i>Medium Altitude Earth Orbit</i>
MGEX	<i>The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project</i>
MVC	Matriz de Variância e Covariância
OCS	<i>Operational Control System</i>
P	<i>Precise or Protected</i>
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
PNT	Previsão Numérica de Tempo
PP	Posicionamento por Ponto
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Posicionamento por Ponto Simples
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PZ	<i>Parametry Zemli</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
SA	<i>Selective Availabitily</i>
SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SGL	Sistema Geodésico Local
SGS-85	<i>Sovietic Geodetic System 1985</i>
SP3	<i>The Standard Product 3</i>
TAI	Tempo Atômico Internacional
TDOP	<i>Time Dilution of Precision</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>

TGD	<i>Time Group Delay</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>
ZHD	<i>Zenith Hydrostatic Delay</i>
ZWD	<i>Zenith Wet Delay</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1. Caracterização do assunto .....	18
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Justificativa .....	20
1.4. Estrutura da dissertação .....	21
<b>2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO</b> .....	<b>22</b>
2.1. GPS .....	23
2.2. GLONASS .....	25
2.3. Galileo .....	28
2.4. BeiDou .....	30
<b>3. POSICIONAMENTO PELO GNSS</b> .....	<b>32</b>
3.1. Equação de Observação .....	32
3.2. Cálculo dos erros dos relógios dos satélites e tendência diferencial do código .....	34
3.3. Modelo Funcional .....	35
3.4. Modelo Estocástico .....	36
3.5. Diluição da Precisão .....	37
3.6. Controle de Qualidade .....	37
3.6.1. <i>Detecção</i> .....	38
3.6.2. <i>Identificação</i> .....	39
3.6.3. <i>Adaptação</i> .....	40
3.7. Erros envolvidos nas observáveis GNSS .....	40
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>42</b>
4.1. Experimento I .....	42
4.2. Experimento II.....	46
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>49</b>
5.1. Experimento I .....	49

<b>5.1.1. Resultados e discussões</b> .....	<b>49</b>
<b>5.1.2. Considerações</b> .....	<b>59</b>
<b>5.2. Experimento II</b> .....	<b>60</b>
<b>5.2.1. Resultados e discussões</b> .....	<b>60</b>
<b>5.2.2. Considerações</b> .....	<b>82</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>87</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Caracterização do assunto

O termo GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) se refere aos sistemas de posicionamento baseados no uso de satélites, dentre os quais destacam-se os sistemas GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal NAtigation Satellite System*), BeiDou e Galileo, bem como os sistemas de aumento (LANGLEY et al., 2017; SEEBER, 2003; MONICO, 2008). O GNSS apresenta inúmeras vantagens em relação a outros métodos de posicionamento, como a disponibilidade em condições climáticas adversas, a não necessidade de visibilidade entre as estações e a rapidez na obtenção das coordenadas de interesse. Estas vantagens fazem com que cada vez mais o GNSS seja empregado em atividades que necessitam de posicionamento (LANGLEY et al., 2017).

Desenvolvido a partir da década de 1970 pelos Estados Unidos, inicialmente para fins militares, o GPS está operacional desde 1995 e vem se modernizando desde então (<http://www.gps.gov/>). Por promover uma abrangência a nível global, tornou-se um meio de posicionamento utilizado pelo mundo todo (MONICO, 2008). O GLONASS, por sua vez, foi desenvolvido pela antiga União Soviética e também se tornou operacional no ano de 1995. A falta de investimentos e manutenção dos satélites fizeram com que o sistema passasse por um período de degradação no final da década de 1990 e início dos anos 2000. Entretanto, após esse período de degradação, se iniciou em 2001 um projeto para o restabelecimento, manutenção e modernização do sistema. Assim, em 2011 o GLONASS voltou a contar com constelação completa, com 24 satélites operacionais, obtendo novamente cobertura global (FEAIRHELLER e CLARK, 2006).

Integram ainda o GNSS os sistemas Galileo e BeiDou, desenvolvidos pela União Europeia e China, respectivamente. O sistema BeiDou foi declarado operacional em junho de 2020, após completar sua constelação global de satélites (BDS, 2021). Já o sistema Galileo tinha previsão de estar com sua constelação operacional completa até o fim de 2020, mas os planos foram adiados e o sistema encontra-se em fase final de implementação (ESA, 2023).

Devido à intensa busca por melhorias no que concerne a tecnologia GNSS, a tendência no meio acadêmico e comercial tem sido a utilização dos diversos sistemas em conjunto. A interoperabilidade entre os sistemas traz diversas vantagens como a obtenção de um maior número de observações para o ajustamento, melhor cobertura global,

minimização de erros sistemáticos aos quais os sistemas estão sujeitos e uma melhor geometria dos satélites (SETTI JR et al., 2016; LANGLEY et al., 2017).

A realização do posicionamento combinado vem se evidenciando em trabalhos internacionais (DUONG et al., 2019; WU et al., 2021; LI et al., 2021). No entanto, no Brasil as pesquisas relacionadas a esse tema ainda são escassas e poucos são os trabalhos publicados (MARQUES et al., 2018; SETTI JR et al., 2020; OLIVEIRA JR et al., 2020; SOUZA et al., 2022). Portanto, a presente pesquisa busca contribuir com o tema, por meio da utilização de um *software* científico de Posicionamento por Ponto (PP) e investigação e avaliação dos benefícios do posicionamento integrado dos sistemas GNSS (posicionamento multi-GNSS). É importante ressaltar que o *software* foi desenvolvido em linguagem C/C++ pelos membros do GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), e realiza o PP considerando diferentes constelações e frequências, com uso de observações de pseudodistância e efemérides precisas (SETTI JR., 2019).

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi investigar os benefícios da integração de dados multi-GNSS no PP, a partir de uma análise da acurácia do posicionamento em diferentes localidades e em períodos distintos. Para tanto, foi necessário atingir-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo dos sistemas que compõem o GNSS; do PP e dos fatores que afetam as observações GNSS;
- Aprimorar o *software* científico em desenvolvimento, por meio da implementação da leitura dos arquivos SP3 mais recentes disponibilizados pelo IAC (*Information and Analysis Center*), assim como a leitura de arquivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) das estações do IGS (*International GNSS Service*), dando sequência ao que vem sendo desenvolvido pelo grupo de estudos;
- Realizar avaliações relacionadas a diferentes combinações de sistemas em diferentes condições atmosféricas presentes nas Américas e Antártida, de modo a observar os impactos na acurácia da solução PP;
- Contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico nacional e internacional.

### 1.3. Justificativa

A utilização dos sistemas GNSS em conjunto é atualmente um dos principais temas abordados em eventos científicos e revistas internacionais na área de navegação por satélite. A maioria dos receptores e *softwares* comerciais já realiza o rastreamento e processamento de dados dos quatro sistemas. Entretanto, no Brasil as pesquisas relacionadas a essa temática ainda são bastante escassas, principalmente no que se refere ao uso dos sistemas Galileo e BeiDou, bem como dos novos sinais GPS, havendo muito a ser desenvolvido, sendo assim de extrema importância que sejam realizados estudos nesse sentido. O uso conjunto dos sistemas GPS e Galileo foi alvo de investigações recentes e os achados descritos no estudo de Souza, Zaupa, Silva e Stafocher (2023) revelaram que essa combinação resultou em uma melhoria de 2% na precisão vertical em comparação com a abordagem multi-GNSS. Em vista desses resultados, a presente pesquisa optou por selecionar a combinação de GPS e Galileo como foco de análise, comparando-a com os processamentos autônomos e com a combinação multi-GNSS (utilização conjunta dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou).

Ademais, um ponto que justifica essa pesquisa, é o fato do sistema BeiDou ter sido declarado operacional nos últimos anos, assim como a fase final de operacionalização do sistema Galileo, que permitirá a realização de análises comparativas entre os diferentes sistemas de forma equiparável.

Para a realização do posicionamento a partir do GNSS, diversos métodos podem ser empregados. O PP surge como uma ótima opção que apresenta como principal vantagem, diferentemente do posicionamento relativo, o fato de que o usuário necessita de apenas um receptor para realizar o posicionamento.

Entre as maiores fontes de influência na propagação dos sinais GNSS está a atmosfera, na qual a ionosfera se destaca como umas das maiores fontes de degradação e erros (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008). Como o comportamento da ionosfera não é constante, sua influência pode variar de acordo com as estações do ano, ciclos solares, localização geográfica, entre outros, fatores esses que devem ser analisados em pesquisas que abordam a obtenção da posição.

Portanto, ressalta-se a importância do trabalho desenvolvido, pois aborda um tema bastante atual, de grande relevância e relativamente novo no cenário nacional. Além disso, o trabalho está vinculado ao projeto INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) (Processo CNPq: 465548/2014-2) e Políticas Públicas (Processo FAPESP:

2017/50115-0) “Tecnologia GNSS no suporte à Navegação Aérea”, parceria entre a UNESP (Universidade Estadual Paulista), o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica) e o IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço), ao projeto PQ CNPq da orientadora e é continuidade do projeto desenvolvido por Setti Jr. (2019).

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

A dissertação é composta de cinco capítulos, estruturados conforme descrição a seguir. No capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica de modo a contextualizar o tema abordado. São descritos os principais sistemas envolvidos no GNSS, a evolução desses ao longo dos anos, assim como o status atual de suas respectivas constelações de satélites. No capítulo 3 são expostos os principais métodos de posicionamento pelo GNSS, com uma abordagem mais detalhada do PP, descrevendo a observável, erros e modelos matemáticos envolvidos neste método. O capítulo 4 discorre de forma detalhada sobre a metodologia adotada nos dois experimentos realizados, incluindo um detalhamento acerca do *software* científico em desenvolvimento, sendo apresentadas suas funcionalidades atuais. O capítulo 5 expõe os resultados obtidos, as análises feitas acerca dos resultados, bem como as considerações gerais em relação aos experimentos. Já no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e recomendações para pesquisas futuras.

## 2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

Os sistemas de navegação global por satélite começaram a ser desenvolvidos na década de 1970, visando a determinação da posição, velocidade e tempo de um usuário instantaneamente, independentemente da localização deste no globo ou das condições atmosféricas do local (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

O GPS e o GLONASS surgem como os pioneiros desta tecnologia, tendo sido desenvolvidos de maneira concomitante e independente, e foram os primeiros a dispor de constelação completa. Além destes, integram também o GNSS o sistema BeiDou, operacional desde junho de 2020, e o sistema Galileo, que se encontra em fase final de implantação. O GNSS compreende ainda os sistemas de aumento baseados em satélites (SBAS - *Satellite-Based Augmentation System*), como o norte-americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) e o indiano GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*), e em estações terrestres (GBAS – *Ground-Based Augmentation System*) (LANGLEY et al., 2017). A Tabela 1 apresenta de forma resumida as principais características dos quatro sistemas globais de navegação por satélite.

Tabela 1 - Características dos sistemas GNSS.

<b>Características</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>Galileo</b>	<b>BeiDou</b>
Desenvolvido por	EUA	União Soviética/Rússia	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	11h58min	11h15min	14h04min	12h53min
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
Sistema de referência	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000
Sistema de tempo	GPST	UTC (SU)	GST	BDT
Modelo Ionosférico	Klobuchar	-	NeQuick G	BDGIM

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

## 2.1. GPS

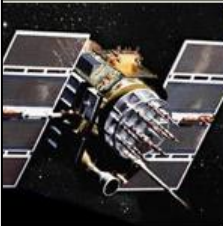
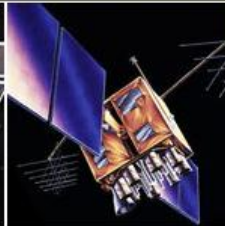
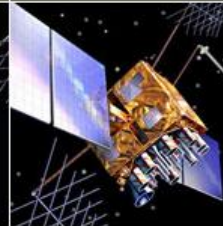
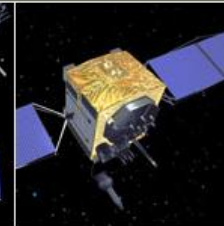
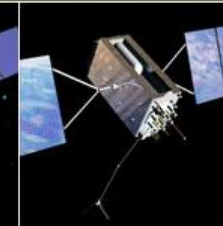
Desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, o GPS surgiu com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas (SEEBER, 2003). Por conta da alta acurácia do sistema e do desenvolvimento da tecnologia dos receptores GPS, diversas áreas da comunidade civil demonstraram interesse no uso desta tecnologia, para diversos fins como a navegação, agricultura, aviação, posicionamento geodésico, entre outros (MONICO, 2008).

Sua configuração consiste em 24 satélites em órbitas de aproximadamente 20.200 km de altitude, distribuídos em seis planos orbitais com inclinação de 55° em relação ao Equador. A disposição destes satélites foi elaborada para permitir que pelo menos quatro satélites sejam vistos simultaneamente em qualquer lugar da Terra, 24 horas por dia (SEEBER, 2003).

No decorrer dos anos, o sistema GPS passou por projetos de modernização, os quais buscaram melhorias nos blocos de satélites e nos centros de controle. Cinco gerações de satélites GPS já foram lançadas, cada qual trazendo melhorias no desempenho do sistema. Uma das principais melhorias ocorridas foi a desativação da SA (*Selective Availability*) a partir de 02 de maio de 2000, a qual degradava os sinais transmitidos para uso civil como forma de segurança (MONICO, 2008). Além desta, houve ainda a adição de mais sinais para uso civil, visto que inicialmente o sistema possuía apenas as portadoras L1 e L2, sendo que esta última transmitia apenas o código P (*Precise or Protected* - Preciso ou Protegido) exclusivo para uso dos militares norte-americanos e alguns usuários autorizados (SEEBER, 2003). Outra modernização se deu com a transmissão do segundo sinal civil da portadora L2, denominado L2C, a partir do bloco IIR-M. Além disso, no bloco de satélites IIF começou a ser transmitida uma terceira portadora, denominada L5, com o terceiro sinal civil L5C. A nova geração, denominada

GPS III, já conta com seis satélites em órbita e apresenta o quarto sinal civil na portadora L1, o L1C. A Figura 1 apresenta os blocos de satélites desenvolvidos até então com suas respectivas quantidades atualmente operacionais. O sistema GPS conta nos dias de hoje com 31 satélites em órbita (FSA, 2023).

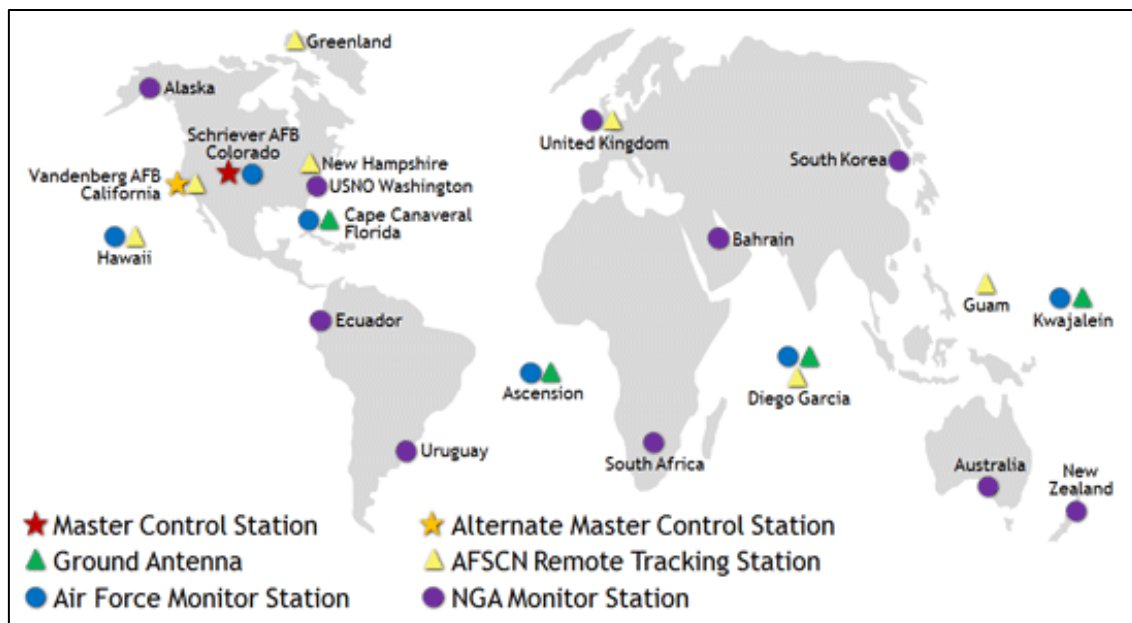
Figura 1 - Blocos de satélites GPS.

LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIIF
0 operational	6 operational	7 operational	12 operational	6 operational

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

A estação de controle central do sistema fica localizada no Colorado, EUA. Além da estação central, o segmento de controle do GPS é formado por uma rede global de estações de monitoramento e antenas terrestres. As estações monitoras rastreiam os sinais GPS, a partir de seus receptores de alta precisão, e enviam as observações para a estação central. A estação central é responsável por processar os dados recebidos e gerar estimativas de posição, velocidade, parâmetros de relógio para cada satélite, além de previsões desses valores para um determinado número de dias posteriores. Com isso, os dados gerados são transmitidos diariamente para os satélites da constelação através da estação central (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). A distribuição das estações de controle GPS é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Estações de controle do sistema GPS.



Fonte: <<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>>.

O sistema utiliza a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), na qual todos os satélites transmitem na mesma frequência, mas sendo identificados pelo seu respectivo código, denominado PRN (*Pseudo Random Noise*). As informações relativas à posição dos satélites são disponibilizadas por meio das efemérides, que apresentam as coordenadas dos satélites transformadas em elementos keplerianos, os quais demandam um menor espaço de memória (MONICO, 2008). Com relação as efemérides precisas (ultra-rápidas, rápidas e finais), elas reúnem os dados de diversos centros de análise para a produção dos arquivos e são de responsabilidade do IGS.

O sistema de referência adotado pelo GPS é o WGS-84 (*World Geodetic System 1984*) (HEGARTY, 2017). O sistema de tempo do GPS é baseado em relógios atômicos das estações de controle, tendo como origem o dia 06 de janeiro de 1980, 0h UTC (*Universal Time Coordinated*). A diferença entre o tempo GPS e o TAI (Tempo Atômico Internacional) é de 19 segundos, não sendo incrementado pelos saltos de segundos (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

## 2.2. GLONASS

Desde a década de 1970, o GLONASS vem sendo desenvolvido pela Federação Russa, antiga União Soviética. De modo similar ao GPS, o sistema foi desenvolvido com o objetivo de obtenção de coordenadas tridimensionais, medidas de velocidade e de

tempo, sejam quais forem as condições climáticas em qualquer lugar do planeta ou próximo a ele. O GLONASS também teve como finalidade inicial o uso militar, mas essa utilização foi expandida posteriormente para uso civil, devido à ampla gama de aplicações da tecnologia (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

O segmento espacial do sistema em sua concepção original é composto por 27 satélites em órbita, sendo 24 operacionais e 3 de reserva. Estes satélites são distribuídos em três planos orbitais com inclinação de  $64,8^\circ$  e separados  $120^\circ$ , cada qual com oito satélites igualmente espaçados, em uma órbita com altitude de aproximadamente 19.100 km (SEEBER, 2003; REVNIVYKH et al., 2017). Por conta do ângulo de inclinação maior que o do GPS, a constelação GLONASS pode fornecer melhor cobertura para altas latitudes. O período orbital do sistema é de 11h15min44s (Tempo Sideral). Com a constelação de satélites do sistema completa, entre seis e onze satélites são visíveis em qualquer ponto da Terra (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Assim como o GPS, o GLONASS obteve sua constelação completa no ano de 1995. Contudo, a falta de investimentos e manutenção dos satélites da constelação, fizeram com que o sistema passasse por um período de degradação no final da década de 1990 e início dos anos 2000 (FEAIRHELLER e CLARK, 2006). Porém, após esse período de degradação do sistema teve início, a partir de 2001, um plano de restabelecimento da cobertura global e modernização do GLONASS, com o lançamento de novas gerações de satélites e estações de monitoramento espalhadas pelo globo. Com isso, em 2011 o GLONASS reestabeleceu sua constelação de 24 satélites operacionais, obtendo novamente cobertura global. Atualmente a constelação conta com 26 satélites em órbita, dos quais 24 estão operacionais (FSA, 2023).

Em sua concepção original, o sistema GLONASS de maneira distinta do GPS, se utiliza da técnica conhecida como FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite tem sua própria frequência, sendo a identificação do satélite dada em geral pelo seu canal (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Com a chegada da geração GLONASS-K1, os satélites começaram a transmitir uma nova portadora L3, CDMA, além dos sinais FDMA já utilizados nas gerações anteriores. Inicialmente, era previsto que a nova geração de satélites do sistema, GLONASS-K2, tivesse sua produção iniciada em 2014 (GPS WORLD, 2021a). Por conta de problemas burocráticos com a importação de componentes do novo satélite, a produção foi adiada e teve seu início somente no final de 2018. O lançamento do primeiro satélite GLONASS-K2 foi realizado em agosto de 2023, o qual conta com os sinais CDMA também nas portadoras L1, L2 e L5 (GPS

WORLD, 2023). A Figura 3 demonstra os blocos de satélites até então desenvolvidos para o GLONASS com seus respectivos períodos de implantação.

Figura 3 - Blocos de satélites GLONASS.



Capacidades	Glonass	Glonass-M	Glonass-K	Glonass-K2
Tempo de implantação	1982-2005	2003-2016	2011-2018	2017+

Fonte: Adaptado de <[https://www.glonass-iac.ru/en/about\\_glonass/](https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/)>.

De maneira análoga ao GPS, o sistema russo apresenta as informações relativas às órbitas dos satélites através das efemérides transmitidas e precisas. As efemérides transmitidas do GLONASS, ao invés de elementos keplerianos, utilizados nas efemérides GPS, fornecem as posições, velocidades e acelerações dos satélites, causadas pelas perturbações gravitacionais do sol e da lua. Já a respeito das efemérides precisas GLONASS, essas são produzidas e disponibilizadas desde 1998 e seguem o mesmo formato das efemérides precisas GPS, sendo disponibilizadas também pelo IGS.

O segmento de controle do sistema GLONASS é composto por um sistema central, por uma central responsável pela sincronização do tempo GLONASS e pelas estações de rastreamento. O controle central do sistema se encontra na cidade de Moscou e as estações de monitoramento, inicialmente encontradas apenas no território da antiga União Soviética, estão sendo expandidas para outros países do globo desde 2013 como parte do projeto de modernização do sistema.

O sistema de referência inicialmente adotado pelo GLONASS foi o SGS-85 (*Sovietic Geodetic System 1985*), o qual foi refinado para o SGS-90, com mesma definição. Posteriormente, o sistema de referência utilizado nas efemérides transmitidas foi alterado para o PZ-90 (*Parametry Zemli 1990*), sistema de referência adotado atualmente pelo GLONASS. O sistema de tempo é relacionado ao UTC, mas devido à diferença de fusos entre Moscou e Greenwich, apresenta uma diferença constante de três horas. Tal relação já considera os saltos de segundos, porém existe um termo que deve

ser inserido na relação, devido ao uso de diferentes relógios para monitoramento das escalas de tempo. O valor dessa diferença  $\tau_c$  é fornecido nos arquivos de navegação GLONASS e é esperado que seja em torno de 1 milissegundo (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

### 2.3. Galileo

Uma ação conjunta entre a comissão europeia, ESA (*European Space Agency*) e a indústria europeia, vem desenvolvendo desde 1990 um sistema de navegação próprio, denominado Galileo (SEEBER, 2003). A ideia do desenvolvimento de uma solução própria da Europa para o GNSS se deu quando o governo norte-americano não autorizou outras nações a participarem da construção e manutenção do GPS (MONICO, 2008). O Galileo, diferentemente do GPS e GLONASS, que foram desenvolvidos para fins militares, surge como a primeira alternativa completamente civil aos satélites de posicionamento.

Em 2005, foi iniciada a implantação do sistema Galileo com o lançamento do primeiro satélite, o GIOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element*) (GIOVE A). Esse satélite, em conjunto com o satélite GIOVE B lançado em 2008, serviram como teste para as tecnologias empregadas, como os relógios atômicos utilizados e geração dos sinais de navegação. Além disso, esses satélites asseguraram as frequências designadas para o sistema (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). Ambos os satélites foram desativados em 2012 após cumprirem com êxito suas missões.

A fase posterior, denominada IOV (*In-Orbit Validation*), teve início com o lançamento de dois satélites em 2011 e outros dois em 2012, e teve como objetivo promover validações iniciais do sistema e da rede de estações terrestres, utilizando para tal uma constelação reduzida em locais de teste. Em março de 2013 se deu a primeira determinação de posição a partir da constelação Galileo, sendo que desde então as mensagens de navegação do Galileo vêm sendo transmitidas continuamente. Apesar de terem servido para validação da órbita, esses satélites atualmente integram a constelação operacional do sistema (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017).

Em sua concepção, quando o sistema estiver totalmente implantado, seu segmento espacial contará com 30 satélites, com 24 operacionais e 6 reservas, distribuídos em três órbitas circulares, com inclinação de  $56^\circ$  em relação ao Equador e altitude de aproximadamente 23222 km. O período orbital é de 14 horas e 4 minutos, sendo assim, a

constelação de satélites volta a ocupar a mesma posição após 10 dias. Assim como o GPS, os sinais do sistema Galileo são transmitidos por meio da técnica CDMA (MONICO, 2008).

O segmento de controle do Galileo é composto pelo GCS (*Ground Control Segment*), o qual é responsável pelo controle da constelação, e pelo GMS (*Ground Mission Segment*), responsável pelas tarefas relativas aos serviços do sistema. O GCS coordena e controla os satélites e é formado por uma rede global de estações de modo a promover cobertura global. Já o GMS realiza o rastreamento e monitoramento dos sinais Galileo, além de gerar mensagens de navegação e distribuição dessas aos satélites. O GCS fica localizado em Oberpfaffenhofen na Alemanha, enquanto o GMS fica localizado em Fucino na Itália. Outros dois centros integram o segmento de controle e são responsáveis pelo controle dos satélites desde o lançamento até que atinjam as órbitas de interesse. Esses dois centros são denominados LOCC (*Launch and Early Operation (LEOP) Control Centers*) (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017).

Assim como o GPS, as informações relativas à posição dos satélites e relógios do sistema Galileo são disponibilizadas nas efemérides transmitidas, as quais dispõem as coordenadas dos satélites em elementos keplerianos. Já as efemérides precisas Galileo são produzidas e disponibilizadas pelo MGEX (*The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project*).

O sistema Galileo oferece uma gama abrangente de serviços de posicionamento: o *Open Service* (OS) constitui o serviço fundamental, proporcionando posicionamento de forma gratuita nas bandas E1, E5a e E5b; O *High Accuracy Service* (HAS) acrescenta um terceiro sinal criptografado na banda E6, disponível para uso comercial. O *Public Regulatory Service* (PRS) é um serviço restrito destinado exclusivamente a usuários autorizados pelo governo europeu; O Serviço de Busca e Resgate (*Search and Rescue Service – SAR*) opera em apoio ao COSPAS-SARSAT, fornecendo uma resposta eficiente em situações de emergência e reforçando a infraestrutura global de busca e resgate.

O sistema de referência adotado pelo Galileo é o GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*), o qual está alinhado ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) em relação à origem, escala, orientação e taxas de variação (ESA, 2011; FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). O Galileo adota como sistema de tempo o GST (*Galileo System Time*), o qual é gerado a partir de relógios atômicos pelo segmento de controle e que pode ser definido como idêntico ao sistema de tempo GPS.

O sistema atualmente conta com 28 satélites em órbita, sendo 23 operacionais (GSC, 2023). Os últimos satélites Galileo foram lançados em dezembro de 2021, no denominado *Galileo Launch 11*, o qual é o primeiro de uma série de 6 lançamentos, com dois satélites por lançamento, a serem realizados nos próximos anos (EUSPA, 2023). Notícias recentemente divulgadas, indicam que os próximos dois lançamentos do sistema europeu serão realizados em 2024, pela empresa SpaceX, e devem partir de solo norte-americano, o que será um marco para o sistema, já que será a primeira vez que um satélite Galileo será lançado a partir de um território não europeu (SPACE, 2023).

#### 2.4. BeiDou

Na década de 1980 a China iniciou o desenvolvimento do seu próprio sistema de posicionamento, denominado BeiDou ou Compass. O desenvolvimento do sistema se deu em três fases. A primeira delas, a qual recebeu o nome de *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System*, ocorreu entre os anos de 2000 a 2003, com o lançamento de três satélites geoestacionários (GEO - *Geostationary Earth Orbit*) para a demonstração do sistema. A segunda fase se deu com a implantação regional do sistema, tendo início no ano de 2004 e se tornando operacional em 2012. Essa fase é composta por 5 satélites GEO, 5 de órbita geossíncrona (IGSO - *Inclined Geo-Synchronous Orbit*) e outros 4 de órbita terrestre média (MEO - *Medium Altitude Earth Orbit*), totalizando 14 satélites (YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). A terceira e última fase, composta pela constelação BDS-3, foi finalizada em junho de 2020, tornando o sistema global (BDS, 2021).

Os satélites deste sistema são distribuídos em três planos orbitais com inclinação de  $55^\circ$  e com altitude de 21500 km (BEIDOU, 2015). O sistema conta atualmente com 29 satélites MEO operacionais em órbita (FSA, 2023).

O segmento de controle do BeiDou, denominado OCS (*Operational Control System*), tem como principais funções o estabelecimento e manutenção do sistema de referência adotado, o CGCS2000 (*China Geodetic Coordinate System 2000*), a manutenção do sistema de tempo, determinação das órbitas transmitidas e previsões, predição dos atrasos dos relógios, monitoramento, processamento e predição dos atrasos ionosféricos, assim como a determinação e transmissão de mensagens de navegação para os satélites. O OCS é composto por uma estação central e por estações monitoras do tipo A, que são utilizadas para monitoramento das órbitas e atraso ionosférico, e do tipo B, as

quais são responsáveis pelo serviço de aumento BeiDou e integridade, sendo a maior parte destas estações localizadas em território chinês.

Assim como nos sistemas GPS e Galileo, as informações de posição dos satélites e relógios BeiDou são disponibilizadas por meio das efemérides transmitidas, sendo as coordenadas dos satélites expressas em elementos keplerianos. As efemérides precisas BeiDou são produzidas e disponibilizadas pelo MGEX. O BeiDou adota o sistema de tempo BDT (*BeiDou Time*), que tem como origem às 0h UTC do dia 1 de janeiro de 2016, apresentando um *offset* constante de 33 segundos em relação ao TAI (JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

### 3. POSICIONAMENTO PELO GNSS

A partir da constelação de satélites artificiais GNSS, o usuário pode determinar a posição, o tempo e a velocidade de um receptor, estando este estático ou em movimento, com alta acurácia (MONICO, 2008). Dependendo do método utilizado, o posicionamento pode ser classificado de diferentes formas. Se as coordenadas são obtidas em relação ao geocentro tem-se o posicionamento absoluto, ou por ponto. Já quando as coordenadas são determinadas em relação a um referencial materializado tem-se o posicionamento relativo. As classificações podem ainda ser relacionadas ao estado do objeto ao ter as coordenadas determinadas, podendo ser estático quando o objeto está em repouso ou cinemático quando o objeto se encontra em movimento. Além disso, podem ainda ter relação ao processamento, podendo ser pós-processado ou em tempo real, quando as coordenadas são obtidas após ou no instante da coleta, respectivamente (KAPLAN e HEGARTY, 2006).

Também conhecido por posicionamento absoluto, o método de Posicionamento por Ponto surge como uma alternativa ao posicionamento relativo, necessitando de apenas um receptor ao nível de usuário para ser realizado. Neste método as coordenadas são obtidas em relação ao geocentro e a posição é obtida instantaneamente a partir de observações de pseudodistância, das posições dos satélites e do sistema de tempo transmitidos nas efemérides (MONICO, 2008; MARQUES, 2012).

É importante citar que o método PP implementado no *software* utilizado neste trabalho, faz o uso de efemérides precisas e realiza a correção dos efeitos atmosféricos, proporcionando maior precisão que o Posicionamento por Ponto Simples (PPS) convencional. O método PP é objeto de estudo do presente trabalho, sendo apresentado mais detalhes sobre ele nos próximos tópicos.

#### 3.1. Equação de Observação

Por meio dos códigos gerados nos satélites e receptor tem-se as medidas de distância entre ambos. O receptor replica o código produzido pelo satélite e essa réplica gerada é o tempo de propagação do sinal no trajeto percorrido entre esses dois pontos. A distância é determinada por meio da multiplicação do tempo de propagação do sinal e a velocidade da luz. Essa observável recebe o nome de pseudodistância, por conta do não sincronismo entre os relógios responsáveis pela geração do código do satélite e sua réplica no receptor.

A equação da pseudodistância de um satélite  $s$ , o qual é rastreado por um receptor  $r$ , considerando o instante de observação  $t$ , frequência  $j$  e constelação  $S$ , pode ser dada por (ODIJK, 2017):

$$P_r^S(t) = \rho_r^S(t, t - \tau_r^S) + T_r^S + c[dt_r(t) + d_{r,j}^S(t) + \Delta d_{r,j}^S(t)] - c[dt^S(t - \tau_r^S) + d_j^S(t - \tau_r^S)] + \mu_j^S I_r^S(t) + \varepsilon_{P_{r,j}}^S, \quad (3.1)$$

em que:

$P_r^S$  – observação de pseudodistância (m);

$\rho_r^S$  – distância geométrica entre o satélite e o receptor (m);

$\tau_r^S$  – tempo de propagação do sinal (s);

$T_r^S$  – atraso de propagação na atmosfera neutra (m);

$c$  – velocidade da luz no vácuo (m/s);

$dt_r$  – erro do relógio do receptor (s);

$d_{r,j}^S$  – tendência do código no *hardware* do receptor (s);

$\Delta d_{r,j}^S$  – tendência intercanal do código (s);

$dt^S$  – erro do relógio do satélite (s);

$d_j^S$  – tendência do código no *hardware* do satélite (s);

$\mu_j^S$  – coeficiente ionosférico;

$I_r^S$  – atraso ionosférico (m);

$\varepsilon_{P_{r,j}}^S$  – erros aleatórios na medida do código (m).

A tendência do código no *hardware* do receptor ( $d_{r,j}^S$ ) é única para cada constelação, mesmo quando os sinais são rastreados em bandas que apresentam sobreposição, como é o caso da L1 GPS e E1 Galileo. Quando considerada, essa tendência é comumente denominada de ISB (*Intersystem bias*). No contexto da constelação GLONASS, que emprega a técnica FDMA, as observações de pseudodistância são adicionalmente afetadas pela tendência intercanal do código  $\Delta d_{r,j}^S$  (ICB – *Interchannel bias*) (ODIJK, 2017).

O atraso ionosférico de primeira ordem é calculado para uma frequência específica:  $I_{r,j}^S = \mu_j^S I_r^S(t)$ . Geralmente,  $I_r^S$  representa o atraso na primeira frequência, estabelecendo o coeficiente ionosférico para uma frequência dada  $j$ , como segue:

$$\mu_j^S = \left( \frac{f_1^S}{f_j^S} \right)^2. \quad (3.2)$$

As pseudodistâncias medidas de cada satélite em cada uma das épocas são arquivadas no receptor, sendo o arquivo de saída padrão, que contém essas observáveis, denominado RINEX. Esse arquivo permite o armazenamento das observáveis rastreadas e medidas dos diferentes satélites e sistemas GNSS em diferentes épocas.

### 3.2. Cálculo dos erros dos relógios dos satélites e tendência diferencial do código

No contexto do PP, é fundamental determinar os erros nos relógios dos satélites. Quando se empregam efemérides precisas, a primeira correção necessária devido ao deslocamento do relógio do satélite em relação ao receptor é a correção relativística ( $\Delta t_{rel}$ ), conforme definido por (KOUBA, 2009):

$$\Delta t_{rel} = -\frac{2}{c^2} \overline{X}_s \overline{V}_s, \quad (3.3)$$

em que  $\overline{X}_s$  representa a posição e  $\overline{V}_s$  é a velocidade do satélite.

Quando são empregadas as efemérides precisas, uma correção adicional é aplicada ao erro do relógio, associada à tendência diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*), uma correção similar ao *Time Group Delay* (TGD) quando as efemérides transmitidas são utilizadas. Isso se deve ao fato de que as observações de pseudodistância apresentam erros sistemáticos relacionados aos atrasos internos causados pelo *hardware*, impactando o processo de geração, transmissão e processamento dos sinais (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014). Por conta dessa tendência, inacessível diretamente, usualmente o erro do relógio é definido em relação à combinação linear *ion-free* de dupla frequência para: L1/L2 P(Y) GPS, G1/G2 P GLONASS, E1/E5a Galileo e B1/B2 BeiDou (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014).

Assim, a tendência do código do *hardware* do satélite  $d_j^s$  é definida como:

$$d_{P1}^s = \frac{1}{\alpha - 1} DCB_{P1P2}; \quad (3.4)$$

$$d_{P2}^s = \frac{\alpha}{\alpha - 1} DCB_{P1P2}, \quad (3.5)$$

em que  $\alpha = f_1^2/f_2^2$ , constante relativa às frequências.

Para situações como a utilização do código L1 C/A GPS, é necessário implementar uma correção adicional que relaciona a tendência de *hardware* entre os códigos P1 e C/A, conforme exposto por (ODIJK, 2017):

$$d_j^s = d_{P1}^s - d_{C1}^s = DCB_{1C}. \quad (3.6)$$

O mesmo princípio delineado na equação (3.6) deve ser aplicado a outras frequências e sistemas, assim como à tendência do código no *hardware* do receptor.

### 3.3. Modelo Funcional

Em geral, quando quatro ou mais satélites são rastreados simultaneamente por um receptor e são coletadas suas observações de pseudodistância, é possível a determinação da sua posição tridimensional. Nesse contexto, cada leitura feita pelo receptor contribui para a formulação de uma equação integrante do sistema de equações do método paramétrico, fundamentada na equação de pseudodistância (3.1).

Durante o processo de ajustamento das observações de pseudodistância, é essencial estimar não apenas a posição, mas também o erro no relógio do receptor no momento da recepção. Na prática, o erro do relógio estimado compreende uma combinação do erro intrínseco do relógio e do atraso de *hardware* do receptor, uma vez que ambas as componentes não podem ser dissociadas, assim (ODIJK, 2017):

$$dt_{r,j}^s(t) = dt_r(t) + d_{r,j}^s. \quad (3.7)$$

Para a realização do posicionamento se faz necessário o conhecimento da órbita ( $X^s$ ,  $Y^s$  e  $Z^s$ ) e do erro do relógio do satélite no instante de transmissão do sinal ( $t^t$ ), além da correção e estimação dos efeitos sistemáticos envolvidos nas medidas. A distância geométrica é dada pela diferença das coordenadas do satélite (no instante de transmissão) e do receptor ( $X_r$ ,  $Y_r$  e  $Z_r$ ) por (MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s(t^t) - X_r)^2 + (Y^s(t^t) - Y_r)^2 + (Z^s(t^t) - Z_r)^2}. \quad (3.8)$$

Assim, a linearização da equação de pseudodistância, considerando o receptor  $r$  e o satélite  $s$  é dada por (MONICO, 2008; MARQUES, 2012; ODIJK, 2017):

$$E\{\Delta PD_r^s\} = -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta X_r) - \frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta Y_r) - \frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta Z_r) + c(dt_{r,j}^s), \quad (3.9)$$

em que:

$\Delta PD_r^s$  – representa a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor  $L$  para pseudodistância);

$(\rho_r^s)^0$  – se refere à distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados;

$E\{.\}$  - representa o operador de esperança matemática.

Os termos ( $\Delta X_r$ ,  $\Delta Y_r$ ,  $\Delta Z_r$  e  $dt_{r,j}^S$ ) contidos na Equação (3.9) se referem às correções dos parâmetros incógnitos (coordenadas da estação e erro do relógio do receptor). A diferença entre a pseudodistância observada e a pseudodistância calculada, pode ser representada por  $L = L_0 - L_b$ .

A Equação (3.9) linearizada pode ser escrita em forma matricial por:

$$E[\Delta PD_r^S] = AX = \begin{bmatrix} -\frac{X^S - X_r^0}{(\rho_r^S)^0} & -\frac{Y^S - Y_r^0}{(\rho_r^S)^0} & -\frac{Z^S - Z_r^0}{(\rho_r^S)^0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ c(dt_{r,j}^S) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10), por razões numéricas, os fatores  $c$  (velocidade da luz) e  $dt_{r,j}^S$  ficam juntos em um só produto. As três primeiras colunas da matriz  $A$  contêm os cossenos diretores para o vetor satélite-receptor e assim, todos os coeficientes dessa matriz devem ter valores menores ou iguais a 1.

Quando se emprega mais de um sistema para o posicionamento, o erro no relógio do receptor é expresso em relação a um dos sistemas para todas as observações, e a tendência entre os sistemas no receptor ( $\Delta d_{r,j}^{G,S}$ ) é introduzida como novos parâmetros a serem calculados durante o ajustamento. Se o erro no relógio do receptor é especificado em relação ao sistema  $S$ , então o erro no relógio para um sistema  $G$  será determinado da seguinte maneira (ODJIK, 2017):

$$dt_{r,j}^G(t) = dt_{r,j}^S(t) + \Delta d_{r,j}^{G,S}. \quad (3.11)$$

Assim, a quantidade de parâmetros a serem estimados corresponde a  $3 + i$ , onde  $i$  representa o número de sistemas empregados.

### 3.4. Modelo Estocástico

A maioria dos erros presentes nas observações GNSS está associada ao ângulo de elevação dos satélites em relação ao plano do observador. Para mitigar tais erros, é possível estabelecer modelos estocásticos fundamentados no ângulo de elevação dos satélites, geralmente formulados a partir de funções trigonométricas e exponenciais. Uma das funções amplamente empregadas é a função seno, expressa por:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2}{\text{sen}^2\theta}, \quad (3.12)$$

em que  $\theta$  representa o ângulo de elevação do satélite e  $\sigma^2$  é a variância a priori das observações. Como valor a priori, Cai et al. (2015) e Kazmierski et al. (2018) sugerem a utilização de um desvio padrão de 0,30 m.

### 3.5. Diluição da Precisão

O cálculo da diluição da precisão (DOP – *Dilution of Precision*) no caso do posicionamento por ponto é realizado com base na MVC propagada para o SGL (Sistema Geodésico Local) (MARQUES, 2012).

O DOP ajuda na indicação da precisão dos resultados obtidos, indicando a qualidade da geometria dos satélites acima do horizonte no momento da coleta (LANGLEY, 1999). O DOP posicional (PDOP) pode ser interpretado como sendo o inverso do volume de um tetraedro formado pelas posições do receptor e dos quatro satélites observados (MONICO, 2008). Quando esse volume é maximizado ocorre a melhor geometria, culminando num PDOP mínimo.

Os diferentes tipos de DOP são dados por (BORRE, K. et al., 2007; MONICO, 2008):

$$\text{Geométrico: } GDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{cdt_r}^2} = \sqrt{tr(\Sigma_X)}; \quad (3.13)$$

$$\text{Horizontal: } HDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}; \quad (3.14)$$

$$\text{Posição: } PDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} = \sqrt{tr(\Sigma_{enu})}; \quad (3.15)$$

$$\text{Tempo: } TDOP = \sigma_{cdt_r}; \quad (3.16)$$

$$\text{Vertical: } VDOP = \sigma_u. \quad (3.17)$$

Os valores de DOP permitem analisar quais configurações de satélites são melhores, sendo verificado na prática que a geometria ideal é alcançada quando o valor do PDOP é inferior a 5 ou 6 (LANGLEY, 1999; BORRE, et al., 2007).

### 3.6. Controle de Qualidade

O controle de qualidade trata-se de um sistema amplo e complexo, o qual visa melhorar e assegurar a qualidade de um determinado projeto em todas suas etapas. É por meio do controle de qualidade que pode ser verificada a consistência das observações no

modelo empregado, detectando os erros grosseiros presentes para que o modelo possa ser adaptado.

Usualmente, o controle de qualidade é dividido nas seguintes etapas: detecção, identificação e adaptação, denominadas DIA (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001).

- Detecção: o modelo de observação é testado com o intuito de diagnosticar possíveis erros nas observações;
- Identificação: visa encontrar a possível fonte do erro responsável pela rejeição no processo de detecção. Para tal, deve ser realizada uma busca dentre todos os candidatos e é executada para cada observação individualmente;
- Adaptação: é feita a adaptação do modelo de observação adotado visando eliminar a influência dos erros identificados.

### 3.6.1. Detecção

Para a verificação da validade da solução obtida, a estatística Qui-quadrado pode ser utilizada através de um teste estatístico, conhecido como teste Qui-quadrado (GEMAEL, 1994), Teste Global do Modelo, ou ainda como teste n-dimensional (TEUNISSEN, 1985). Esse teste é baseado na variância a priori ( $\sigma_0^2$ ) e a variância a posteriori ( $\hat{\sigma}_0^2$ ) obtida no ajustamento com  $m$  observações e  $n$  parâmetros:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{m - n}, \quad (3.18)$$

onde  $V$  representa o vetor de resíduos e  $P$  a matriz peso.

Assim, por meio do teste são formuladas a hipótese nula e a hipótese alternativa:

$$H_0: E\{\hat{\sigma}_0^2\} = \sigma_0^2; \quad (3.19)$$

$$H_1: E\{\hat{\sigma}_0^2\} > \sigma_0^2. \quad (3.20)$$

Essas hipóteses descrevem que, na hipótese básica  $H_0$ , os fatores de variância a posteriori e a priori são estatisticamente iguais, contra uma hipótese alternativa  $H_1$ , que supõe que a variância a posteriori é maior que a variância a priori. Para a validação de uma das hipóteses, o valor calculado é comparado por:

$$T = \chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (m - n), \quad (3.21)$$

que tem distribuição Qui-quadrado, com  $(m-n)$  graus de liberdade, com os valores teóricos da distribuição Qui-quadrado.

A hipótese básica não é rejeitada, o nível de significância  $\alpha$ , no teste estatístico, se:

$$T < \chi_{m-n, 1-\alpha}^2. \quad (3.22)$$

Caso contrário, o resultado obtido indica que existem problemas no ajustamento. Assim, uma vez que tenha sido detectado algum erro, a identificação deste deve ser realizada.

### 3.6.2. Identificação

Essa etapa pode ser realizada com base no teste *data snooping* desenvolvido por Baarda, por meio do cálculo das correções normalizadas ( $W$ ) dadas por (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998):

$$W = \frac{C^T P C}{\sqrt{C^T P \Sigma_V P C}}, \quad (3.23)$$

onde o vetor  $C$  representa a redundância parcial,  $P$  é a matriz dos pesos e  $\Sigma_V$  a MCV dos resíduos.

O vetor  $C$  é  $n$ -dimensional e contém elementos unitários para as observações a serem testadas e zero para as outras posições. O numerador da Equação (3.23) representa o resíduo transformado e o denominador o erro estimado. Quando a MVC das observações apresenta estrutura diagonal, a Equação (3.23) pode ser dada por:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}}, \quad (3.24)$$

onde  $w_i$  é a correção normalizada da  $i$ -ésima observação,  $v_i$  representa o resíduo e  $\sigma_{v_i}$  é o desvio padrão do respectivo resíduo, levando em consideração que a MVC dos resíduos é calculada com o fator de variância a priori.

A estatística  $w_i$  tem como distribuição a raiz quadrada da distribuição F com graus de liberdade igual a 1 e  $\infty$ , ou seja,  $\sqrt{F_\alpha(1, \infty,)} = N_{\frac{\alpha}{2}}(0,1) = \sqrt{\chi_{\alpha,1}^2}$ . Então (TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001):

$$w_i \sim N_{\frac{\alpha}{2}}(0,1). \quad (3.25)$$

Com isso, é formulada a hipótese básica, em que a observação  $i$  não contém erro, e a hipótese alternativa, que supõe o oposto:

$$H_0: \nabla_i = 0; \quad (3.26)$$

$$H_1: \nabla_i \neq 0. \quad (3.27)$$

A hipótese básica não é rejeitada a um nível de significância  $\alpha_0$  se:

$$-\sqrt{\chi_{\alpha_0,1}^2} < w_i < \sqrt{\chi_{\alpha_0,1}^2}. \quad (3.28)$$

Caso contrário, a observação  $i$  contém erro e alguma adaptação no modelo deve ser realizada. Mais de um resíduo pode exceder os valores críticos, visto que o teste é realizado para cada observação separadamente. Neste caso, a observação que contém a maior estatística é excluída.

### 3.6.3. Adaptação

A etapa da adaptação pode ser realizada de diversas maneiras (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998). A maneira mais simples de eliminar tal influencia se dá a partir da exclusão da observação do modelo matemático e posterior repetição do ajustamento.

## 3.7. Erros envolvidos nas observáveis GNSS

Diversas são as fontes de erro que afetam as observáveis GNSS. Essas fontes de erro podem estar relacionadas com os satélites e receptores, com a propagação do sinal na atmosfera ou ainda com efeitos geofísicos na estação terrestre (MARQUES, 2012). A maior parte destes erros pode ser eliminada, minimizada e até mesmo evitada. Dentre os que expressam maior magnitude, estão a atmosfera neutra e ionosfera, pertencentes à atmosfera terrestre e que causam atrasos na propagação dos sinais.

A atmosfera neutra<sup>1</sup> é a camada compreendida entre a superfície terrestre até por volta de 50 km de altura. Essa camada causa o denominado atraso de propagação na

---

<sup>1</sup>Os efeitos que os sinais GNSS estão sujeitos ao ultrapassar a camada neutra são comumente denominados de troposféricos, ou ainda efeitos de propagação troposféricos. Entretanto essa denominação simplifica a realidade, pois apesar do maior efeito no sinal ser causado pelos gases e vapor d'água presentes nos primeiros quilômetros de atmosfera neutra, ou seja, na troposfera (superfície até 15-18 km), esse efeito é resultado da soma da refração ao atravessar toda a camada neutra (cerca de 50km) que gera o atraso no sinal (GOUVEIA, 2019).

atmosfera neutra, o qual influencia na propagação dos sinais emitidos pelo satélite em função do ângulo de elevação e da densidade da atmosfera (SAPUCCI, 2001). Esse atraso pode ser dividido em duas componentes, uma hidrostática e outra úmida.

O erro causado pela componente hidrostática (*ZHD – Zenith Hydrostatic Delay*) é maior, com ordem de grandeza de 2,3 m no zênite e tem sua variação conforme a temperatura, pressão atmosférica e altitude. No Posicionamento por Ponto essa componente pode ser estimada por meio de modelos empíricos, como os de Hopfield e Saastamoinen (HOPFIELD, 1969; HOPFIELD, 1971; HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 1997). Já a componente úmida (*ZWD - Zenith Wet Delay*) tem magnitude menor, mas é altamente variável no espaço-tempo, sendo inserida como um parâmetro a ser determinado no ajustamento, fazendo uso de uma função de mapeamento  $m_f$ . A acurácia da solução no ajustamento pode ser aumentada quando são injuncionadas informações mais precisas do atraso de propagação na atmosfera neutra, as quais podem vir de modelos PNT (Previsão Numérica de Tempo) ou de modelagens locais ou regionais (SAPUCCI, 2001; GOUVEIA, 2019).

Com relação à ionosfera, camada compreendida entre aproximadamente 50 e 1000 km de altura, tem-se o atraso ionosférico, causado quando o sinal transmitido pelo satélite atravessa essa camada. A refração ionosférica vai depender do índice de refração do meio e da frequência empregada. O efeito advindo da refração é proporcional ao TEC (*Total Electron Content*), o qual varia no espaço e tempo em função de fatores como a localização geográfica, estação do ano, campo geomagnético, ciclos solares, entre outras anomalias e irregularidades (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003; MONICO, 2008; HOBIGER e JAKOWSKI, 2017).

Quando são utilizados receptores de dupla frequência no PP, os efeitos de primeira ordem do atraso ionosférico são normalmente eliminados por meio da utilização da combinação *ion-free* das observações. Contudo, a utilização desta combinação acaba amplificando ruídos das observáveis originais. Para que isso seja evitado, ou ainda no caso do PP em simples frequência, a saída é a utilização das observáveis originais no ajustamento, livres de combinação. Nessa situação, o erro ionosférico pode ser estimado por meio de modelos como os de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987) e NeQuick (RADICELLA, 2009), mapas ionosféricos locais, regionais ou globais, ou pela modelagem regional por uma rede (SEEBER, 2003).

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada nos experimentos realizados nesta pesquisa. O intuito dos experimentos foi de analisar os resultados obtidos no PP por meio da utilização dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, tanto de forma autônoma quanto combinada. Em ambos os experimentos, foram utilizados dados de estações da rede IGS, distribuídas ao longo da América do Sul, América Central e América do Norte. É importante mencionar que uma das estações escolhidas no segundo experimento não está localizada nas Américas, mas sim na Antártida. Contudo, devido à sua posição na mesma faixa de longitude das demais estações, foi incluída na análise para avaliação dos resultados na região mais ao sul do planeta. O primeiro experimento abordou de maneira mais detalhada os dados obtidos em duas estações localizadas em hemisférios opostos, em dois dias diferentes: um em junho e outro em outubro de 2022. O segundo experimento expandiu essa abordagem para 34 estações e um período de dois meses de dados.

### 4.1. Experimento I

Para realização dos experimentos descritos nesta e na próxima subseção, foi utilizado um *software* que vem sendo desenvolvido em linguagem C/C++ pelos membros do GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), que realiza o PP considerando diferentes constelações e frequências, com uso de observações de pseudodistância e efemérides precisas (SETTI JR., 2019). Em um primeiro momento, o *software* realiza a leitura do arquivo RINEX, versão 3, o qual contém as observações de pseudodistância e fase da onda portadora das frequências e sistemas disponíveis referentes à estação de interesse.

Anteriormente, para a obtenção das coordenadas e erro do relógio dos satélites, o *software* realizava a leitura das efemérides precisas GNSS disponibilizadas pelo CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Entretanto, dando continuidade no aprimoramento do *software*, foi implementada nessa pesquisa uma rotina para leitura das efemérides precisas GNSS do IAC disponibilizadas em <ftp://gssc.esa.int/gnss/products> pela ESA (*European Space Agency*), centro de dados global associado ao MGEX (*The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project*), em formato SP3 (*The Standard Product 3*). Optou-se pela utilização das efemérides precisas SP3 do IAC, visto que fornecem dados dos últimos satélites BeiDou lançados, os quais tornaram o sistema globalmente

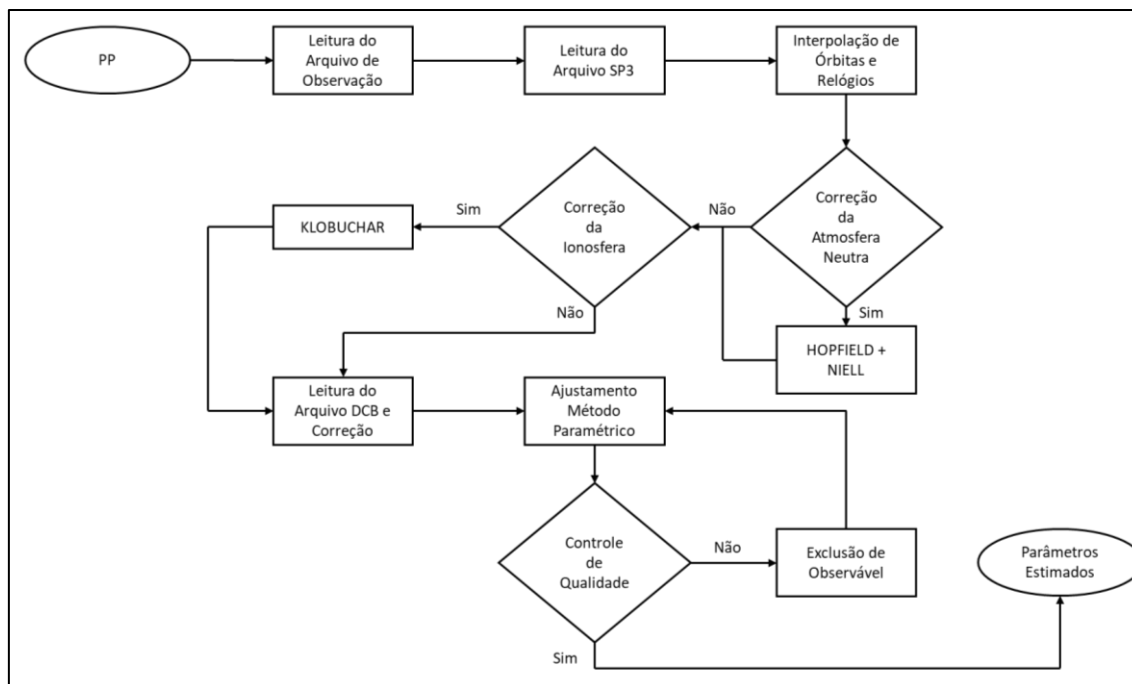
operacional. No arquivo as coordenadas dos satélites estão associadas ao ITRF 2014 e o erro do relógio dos sistemas é dado com relação ao tempo GPS.

Na sequência, o *software* realiza a leitura dos arquivos com os valores diários de DCBs (*Differential Code Bias*), os quais são disponibilizados em <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb> pelo IGG (*Institute of Geodesy and Geophysics*) da CAS (*Chinese Academy of Sciences*), em Wuhan, centro também associado ao MGEX. Os arquivos em questão apresentam os valores de DCB das diferentes frequências do GNSS, os quais são necessários para correção de vieses no erro do relógio do satélite.

Em seguida, o *software* efetua a correção do atraso ionosférico. No caso do posicionamento em simples frequência, o erro ionosférico pode ser estimado por meio dos modelos Klobuchar ou NeQuick G.

Na etapa posterior, inicia-se o processamento dos dados GNSS no PP pelo método paramétrico a partir da estimativa das coordenadas e erro do relógio do receptor. É o usuário quem define os sistemas e frequências que serão utilizados nos processamentos, bem como se será ou não aplicada as correções tanto do atraso ionosférico, quanto do atraso de propagação na atmosfera neutra. O modelo de Hopfield (HOPFIELD, 1969; HOPFIELD, 1971) é o adotado caso opte-se pela correção do atraso de propagação da atmosfera neutra.

Em relação ao controle de qualidade, o *software* utiliza o método DIA com nível de significância de 5%. Os resultados dos processamentos são impressos em arquivos com as coordenadas estimadas do receptor, erro do relógio (em relação ao sistema de tempo GPS), os desvios padrão em coordenadas cartesianas e componentes locais, o número de satélites de cada sistema utilizados no ajustamento, bem como todos os tipos de DOP e resíduos de cada satélite, época por época. Além disso, é possível calcular as discrepâncias entre os valores ajustados e os valores de referência quando a estação tem coordenadas conhecidas. Por padrão, a máscara de elevação empregada é de  $10^\circ$  e o ajustamento só é realizado quando o PDOP é inferior ou igual a 6,0. A Figura 4 ilustra o fluxograma que descreve a execução do *software* empregado, destacando suas principais capacidades de processamento.

Figura 4 – Fluxograma do *software* utilizado.

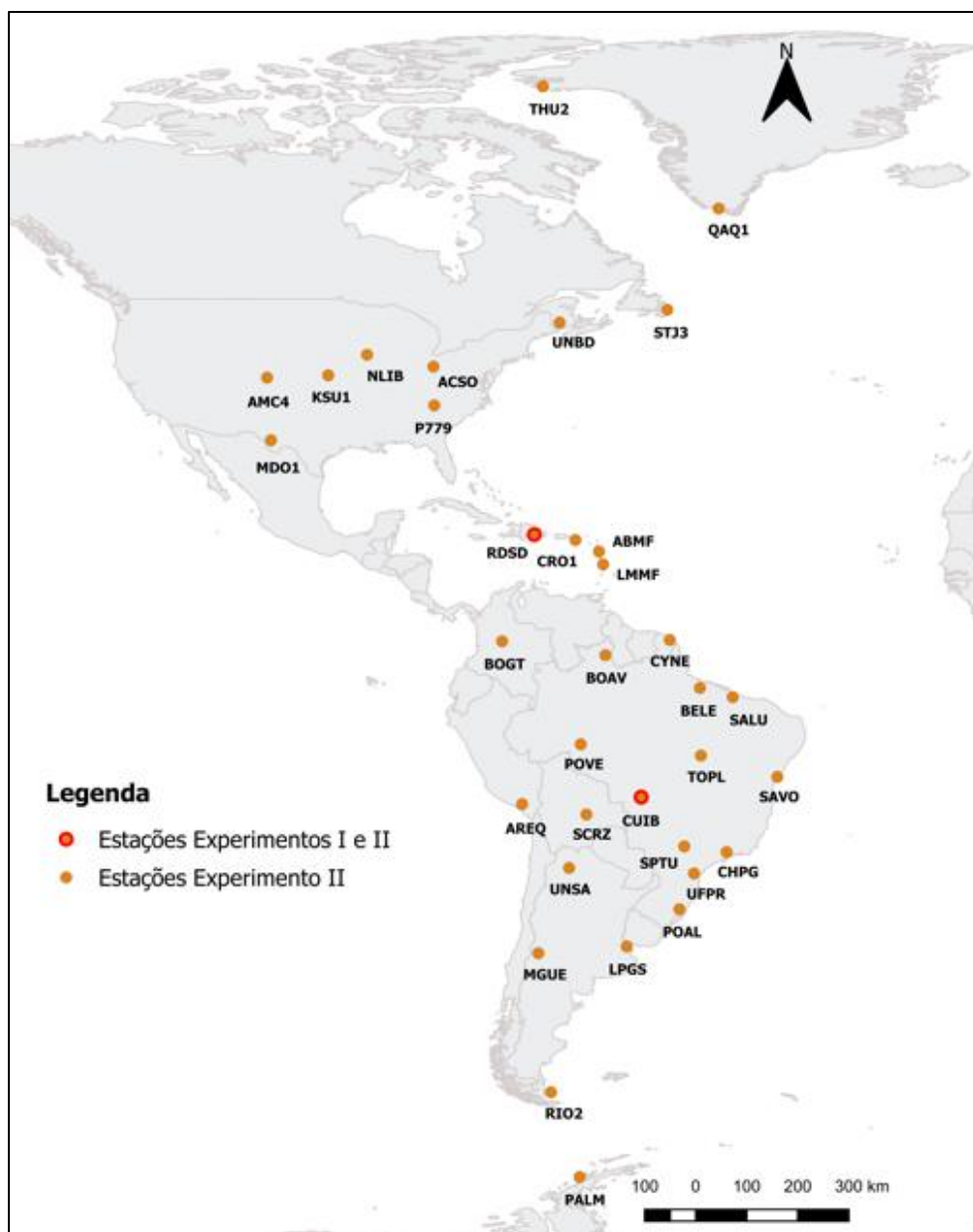
Fonte: Adaptado de SETTI JÚNIOR (2019).

Para a realização do primeiro experimento foram selecionados dados das estações RDSD (hemisfério norte) e CUIB (hemisfério sul), pertencentes à rede IGS. Ambas as estações possuem receptores multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) e disponibilizam os dados no formato RINEX 3. As principais informações destas estações podem ser verificadas na Tabela 2, assim como sua localização aproximada na Figura 5.

Tabela 2 – Informações das estações IGS selecionadas.

Nome	Cidade	País ou Região	Hemisfério	Latitude (°)	Longitude (°)
CUIB	Cuiabá	Brasil	Sul	-15,56	-56,07
RDSD	Santo Domingo	República Dominicana	Norte	18,46	-69,91

Figura 5 – Estações IGS.



Fonte: O autor (2023).

Para os processamentos, foram escolhidos os dias 01 de junho e 01 de outubro, que correspondem, respectivamente, aos Dias do Ano (DOY – *Day of Year*) 152 e 274 de 2022. Foram selecionados os dias de junho e outubro, visto que são meses caracterizados por baixa e alta atividade ionosférica, respectivamente. O período de processamento foi de 24 horas, com início às 00h UTC (*Universal Time Coordinated*).

O *software* foi utilizado para a leitura dos arquivos de observação para os dias selecionados, com intervalo amostral de 30 segundos. Foi realizada ainda a leitura dos

arquivos das efemérides precisas, bem como a interpolação dos valores obtidos para o mesmo intervalo amostral de 30 segundos dos arquivos de observação.

O modelo de Hopfield foi adotado para a correção dos efeitos da atmosfera neutra no posicionamento. Em relação aos efeitos da ionosfera, foi empregado o modelo Klobuchar. Foi estabelecida uma máscara de elevação de  $10^\circ$  e um limite de PDOP de 6.

Os resultados obtidos foram comparados com as coordenadas oficiais das estações, disponibilizadas pelo IGS em ITRF2020, transformadas para SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geodésico das Américas) e atualizadas para a época de processamento dos dados. Assim, pode-se calcular as discrepâncias e desvios padrão tridimensionais entre os valores ajustados e os valores de referência. A partir dessas resultantes foi calculada a Raíz do Erro Quadrático Médio Tridimensional (RMS3D - *Root Mean Square error 3D*).

Nos processamentos, tanto autônomos quanto combinados, foram utilizadas as observações de pseudodistância GPS L1 C/A, GLONASS L1 C/A, Galileo E1 e BeiDou B1. As discussões dos resultados se deram em termos do número de satélites utilizados, PDOP e RMS3D das coordenadas estimadas para os dias selecionados.

## 4.2. Experimento II

Neste segundo experimento, buscou-se expandir a abordagem realizada no primeiro. Para tal, foram utilizadas 34 estações da rede IGS, distribuídas ao longo da América do Sul, América Central e América do Norte, sendo 17 estações pertencentes ao hemisfério norte e outras 17 estações contidas no hemisfério sul. O período de dados foi expandido para dois meses completos, selecionando para isso o mês de junho (30 dias) e outubro (31 dias) de 2022. O período dos dados, intervalo amostral, formato dos arquivos, modelos para correção dos efeitos da atmosfera neutra e ionosfera, e demais configurações de processamentos, foram as mesmas utilizadas no primeiro experimento. Para a execução dos processamentos pelo PP, utilizou-se novamente o *software* desenvolvido, cujo funcionamento é resumido na seção 4.1.

Todas as estações escolhidas possuem receptores multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) e disponibilizam os dados no formato RINEX 3. As informações das estações selecionadas podem ser verificadas na Tabela 3, enquanto suas respectivas localizações aproximadas podem ser visualizadas na Figura 5 na sessão anterior.

Tabela 3 – Informações das estações IGS selecionadas.

<b>Nome</b>	<b>Cidade</b>	<b>País ou Região</b>	<b>Hemisfério</b>	<b>Latitude (°)</b>	<b>Longitude (°)</b>
ABMF	Les Abymes	Guadalupe	Norte	16,26	-61,53
ACSO	Delaware	Estados Unidos	Norte	40,23	-82,98
AMC4	Colorado Springs	Estados Unidos	Norte	38,80	-104,52
AREQ	Arequipa	Peru	Sul	-16,47	-71,49
BELE	Belém	Brasil	Sul	-1,41	-48,46
BOAV	Boa Vista	Brasil	Norte	2,85	-60,70
BOGT	Bogotá	Colômbia	Norte	4,64	-74,08
CHPG	Cachoeira Paulista	Brasil	Sul	-22,68	-45,00
CRO1	Christiansted	Ilhas Virgens Americanas	Norte	17,76	-64,58
CUIB	Cuiabá	Brasil	Sul	-15,56	-56,07
CYNE	Caiena	Guiana Francesa	Norte	4,82	-52,37
KSU1	Manhattan	Estados Unidos	Norte	39,10	-96,61
LMMF	Le Lamentin	Martinica	Norte	14,59	-61,00
LPGS	La Plata	Argentina	Sul	-34,91	-57,93
MDO1	Fort Davis	Estados Unidos	Norte	30,68	-104,01
MGUE	Malargüe	Argentina	Sul	-35,78	-69,40
NLIB	North Liberty	Estados Unidos	Norte	41,77	-91,57
P779	Rosman	Estados Unidos	Norte	35,20	-82,87
PALM	Estação Palmer	Antártida	Sul	-64,78	-64,05
POAL	Porto Alegre	Brasil	Sul	-30,07	-51,12
POVE	Porto Velho	Brasil	Sul	-8,71	-63,90
QAQ1	Qaqortoq	Groenlândia	Norte	60,72	-46,05
RDSO	Santo Domingo	República Dominicana	Norte	18,46	-69,91
RIO2	Rio Grande	Argentina	Sul	-53,79	-67,75
SALU	São Luís	Brasil	Sul	-2,59	-44,21
SAVO	Salvador	Brasil	Sul	-12,94	-38,43
SCRZ	Santa Cruz de la Sierra	Bolívia	Sul	-17,80	-63,16
SPTU	Tupã	Brasil	Sul	-21,93	-50,49
STJ3	St. John's	Canadá	Norte	47,60	-52,68
THU2	Base Aérea de Thule	Groenlândia	Norte	76,54	-68,83
TOPL	Palmas	Brasil	Sul	-10,17	-48,33
UFPR	Curitiba	Brasil	Sul	-25,45	-49,23
UNBD	Fredericton	Canadá	Norte	45,95	-66,64
UNSA	Salta	Argentina	Sul	-24,73	-65,41

Os resultados foram discutidos no que tange ao número de satélites rastreados pelas estações, número de épocas perdidas nos processamentos, PDOP e RMS3D das

coordenadas estimadas para os dias selecionados, além da comparação dos resultados obtidos para os sistemas GPS e Galileo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

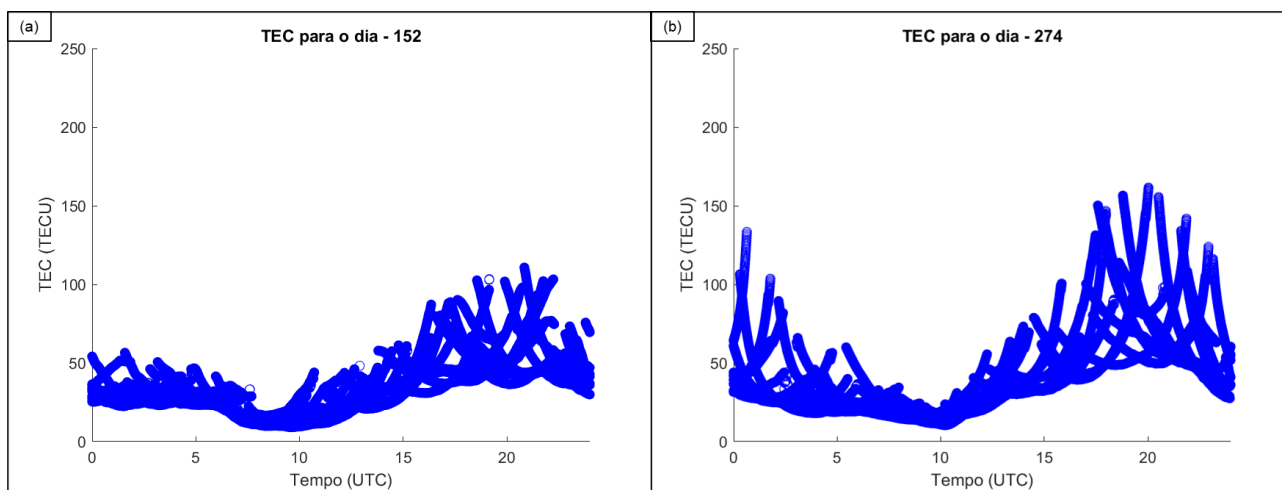
O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos descritos na seção 4, suas respectivas análises e discussões, bem como as considerações.

### 5.1. Experimento I

#### 5.1.1. Resultados e discussões

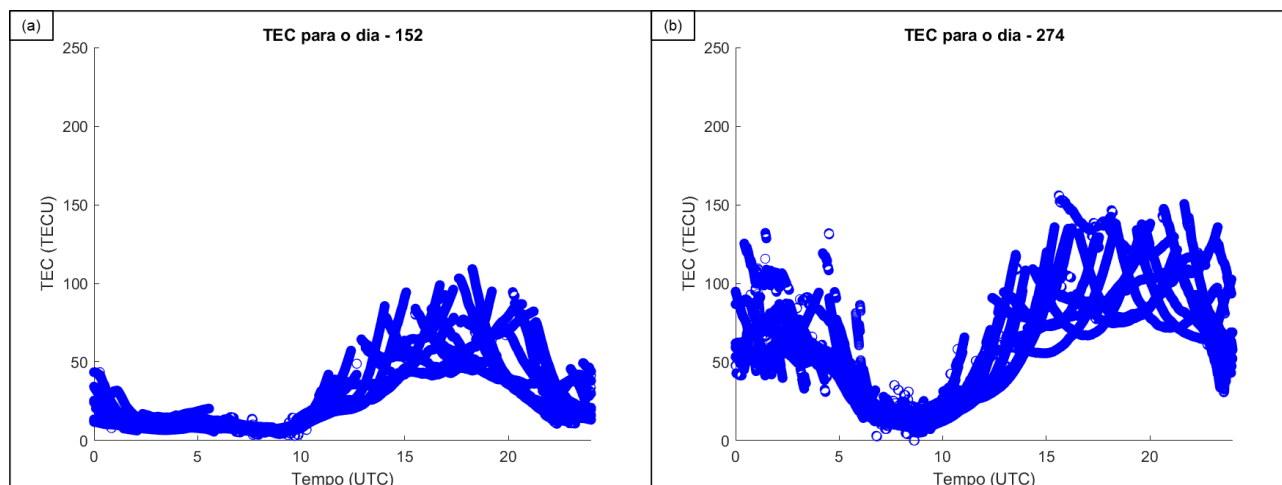
De modo a caracterizar a ionosfera das regiões abordadas, foram calculados os valores de TEC das estações RDSD e CUIB, apresentando seu comportamento ao decorrer dos dias selecionados (Figuras 6 e 7). Os valores de TEC foram obtidos através da metodologia descrita em Setti Júnior et al. (2021).

Figura 6 - TEC para a estação RDSD nos dias 01 de junho (a) e 01 de outubro (b) de 2022.



Fonte: O autor (2023).

Figura 7 - TEC para a estação CUIB nos dias 01 de junho (a) e 01 de outubro (b) de 2022.

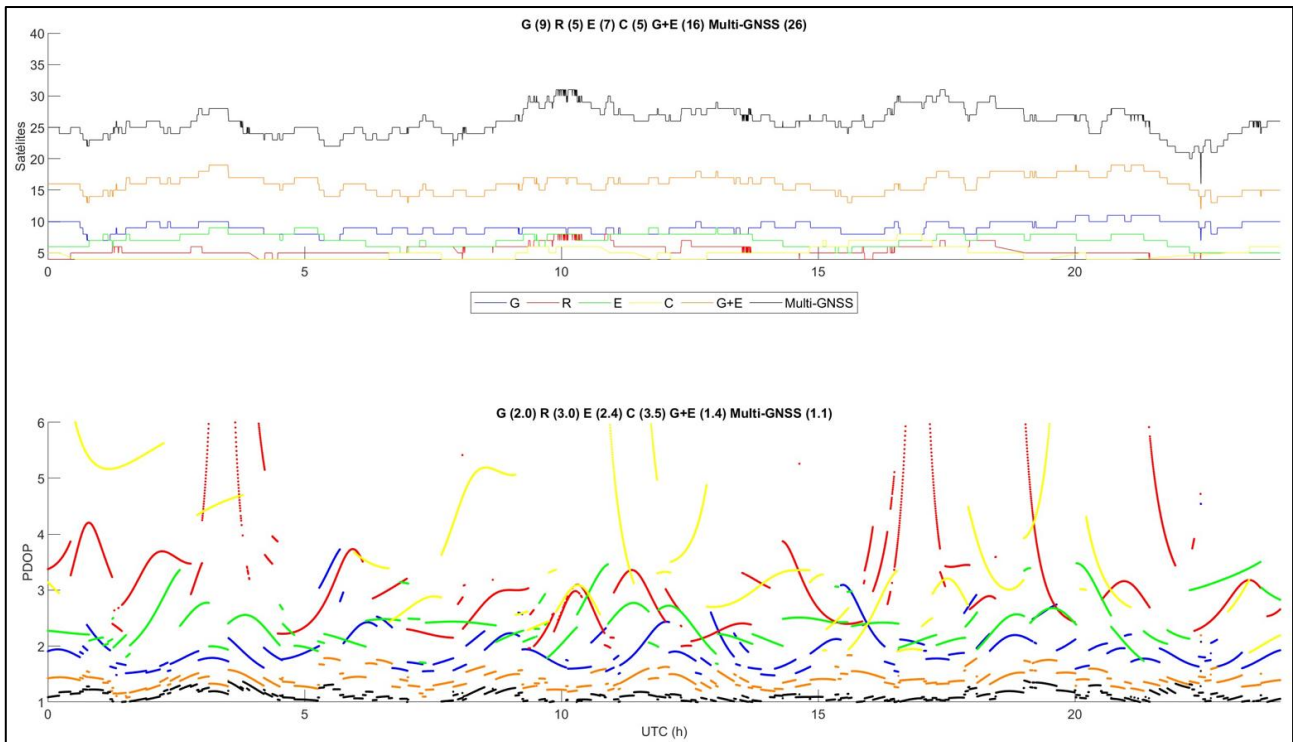


Fonte: O autor (2023).

Nas Figura 6 e 7 é possível notar o comportamento da ionosfera ao longo dos dois dias analisados para as duas estações, sendo os menores valores de densidade eletrônica encontrados durante o período noturno e os maiores valores no período vespertino, com pico por volta das 19 horas UTC. Considerando o período do ano, fica evidente que os valores de TEC são maiores no DOY 274 em ambas as estações, algo que era esperado, visto que a atividade ionosférica no mês de outubro é mais acentuada que em junho. Comparando o TEC obtido para as duas estações, nota-se resultados maiores para a estação CUIB, localizada no hemisfério sul. As Figuras 8 e 9 (RDSD), assim como as Figuras 10 e 11 (CUIB), apresentam o número de satélites e PDOP época a época, respectivamente, para os dias 01 de junho e 01 e outubro, para as constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. O PDOP também é apresentado para as combinações GPS e Galileo e multi-GNSS.

Figura 8 - Número de satélites e PDOP para estação RDSD no DOY 152.

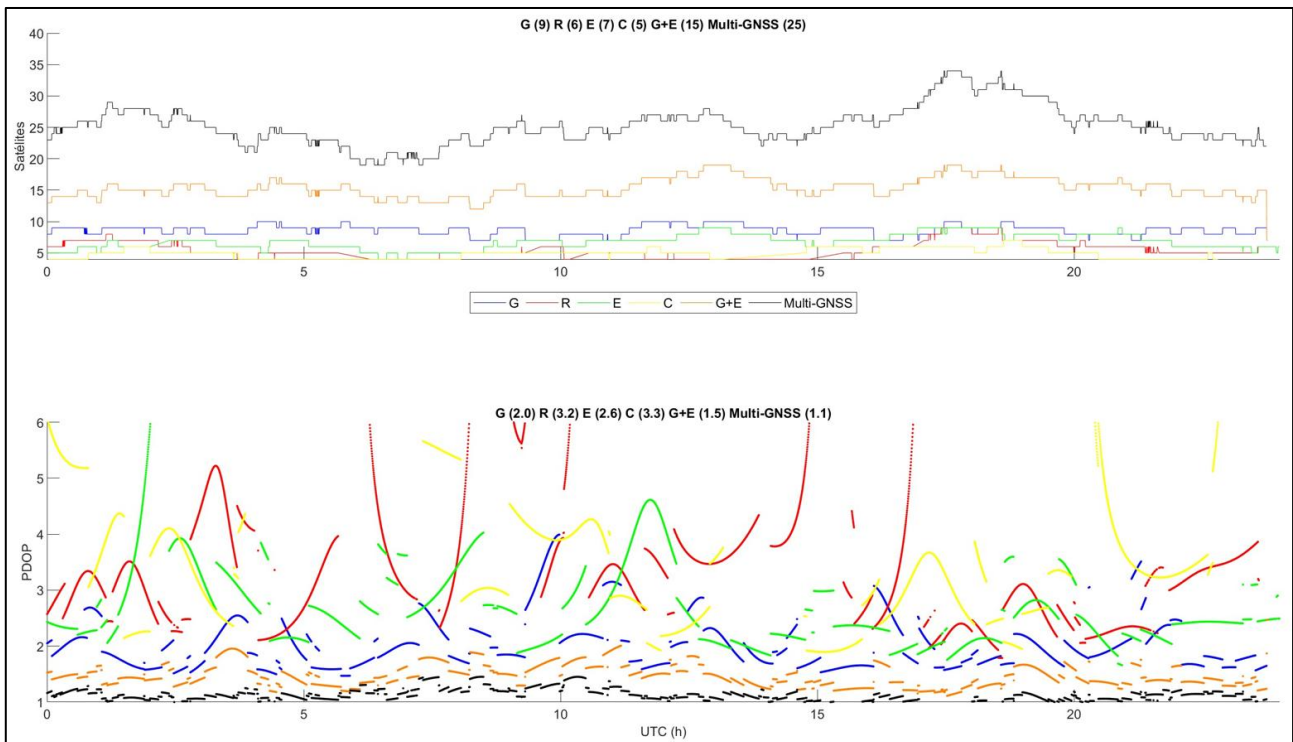
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

Figura 9 - Número de satélites e PDOP para estação RDSD no DOY 274.

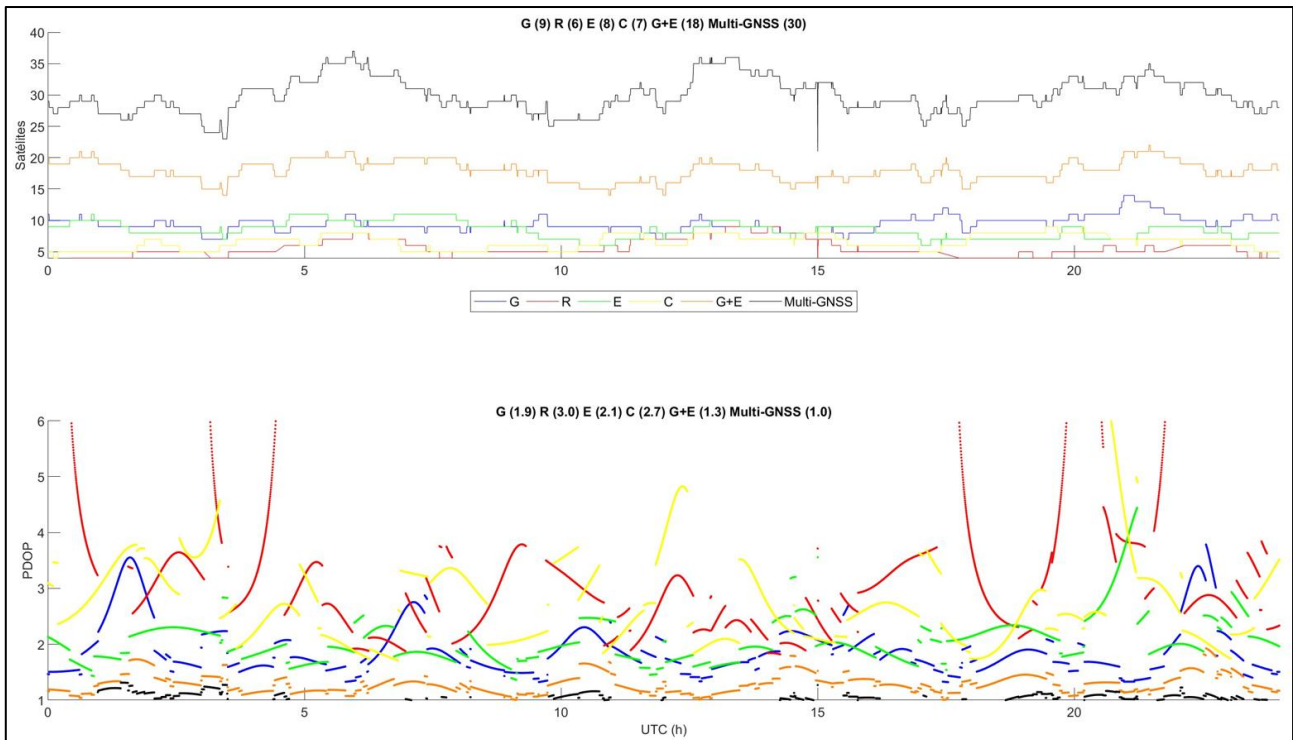
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

Figura 10 - Número de satélites e PDOP para estação CUIB no DOY 152.

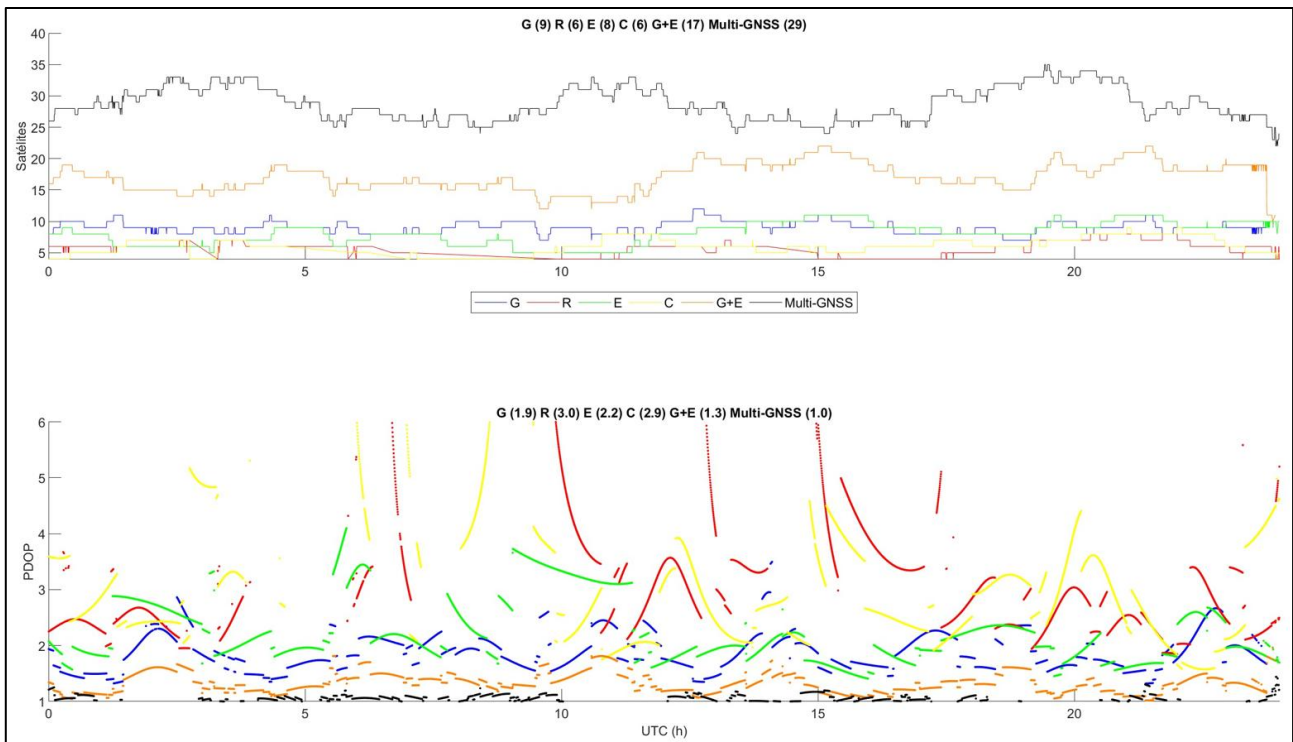
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

Figura 11 - Número de satélites e PDOP para estação CUIB no DOY 274.

GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

Analisando as Figuras 8, 9, 10 e 11, no que tange ao número de satélites, percebe-se de maneira geral uma constância nos resultados, sem grandes variações nos dias analisados. Apesar de resultados bem próximos aos de RDSD, verifica-se que a estação CUIB teve uma média maior de satélites em ambos os dias (8 satélites no DOY 152 e 7 satélites no DOY 274). Na comparação entre os sistemas, nota-se que a maior média de satélites se deu para o sistema GPS (9 satélites) e a pior média para o GLONASS (6 satélites).

No que se refere ao PDOP, é possível observar a mesma regularidade nos resultados para os dias de interesse. Além disso, quando se compara os resultados obtidos para as estações selecionadas, constata-se que CUIB também teve menores valores de PDOP (2,01 em média). Evidencia-se ainda que a combinação multi-GNSS obteve os menores valores de PDOP (1,06 em média), em ambos os dias, enquanto isso, a constelação BeiDou teve os maiores valores (3,12 em média).

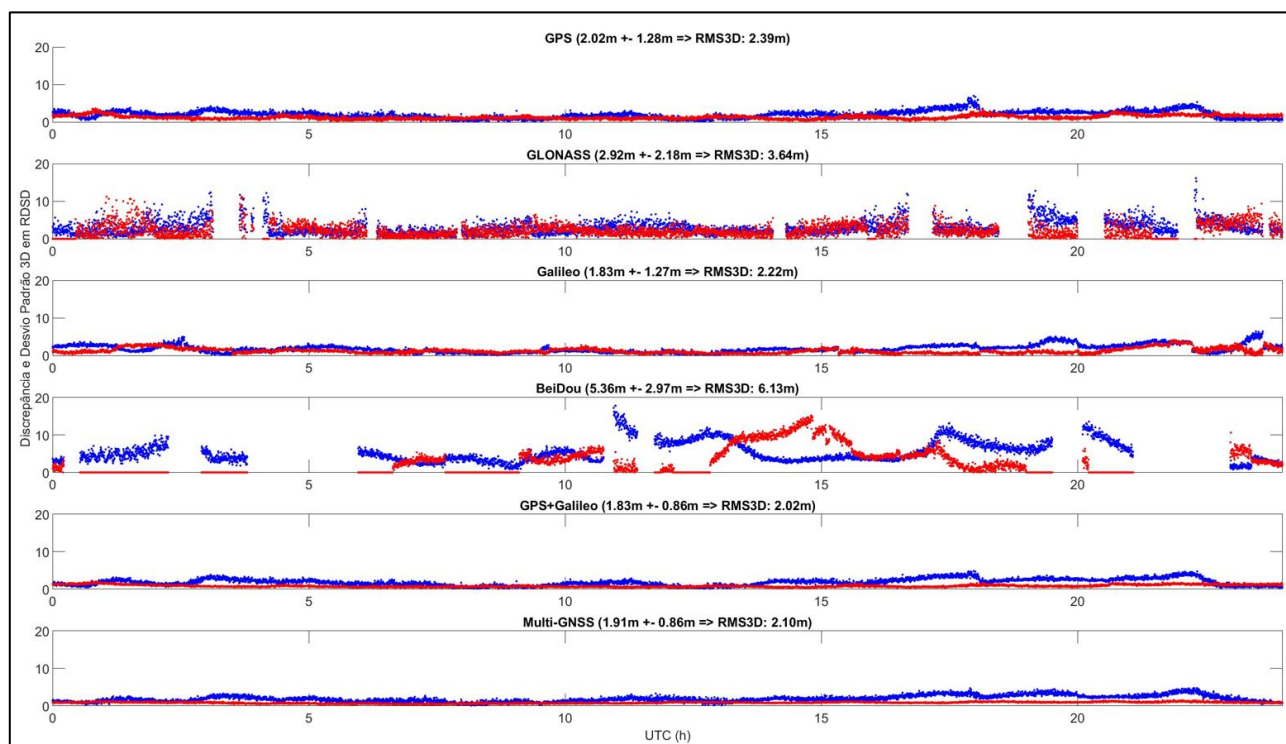
Observando separadamente os resultados obtidos para o dia 01 de junho, verifica-se que o maior número de satélites nos processamentos autônomos foi obtido para a constelação GPS com 9 satélites em média, enquanto a pior média foi de 6 satélites para as constelações GLONASS e BeiDou. Nos processamentos combinados, essa média subiu para 17 satélites com a combinação GPS e Galileo e para 28 satélites no processamento multi-GNSS. Comparando as estações de interesse e considerando os quatro sistemas autônomos de satélites, apesar de resultados muito similares, a melhor média de satélites no geral foi obtida para CUIB, com 8 satélites em média, enquanto RDSD apresentou uma média de 7 satélites. No que se refere ao PDOP, a estação CUIB apresentou uma média geral de 1,98, enquanto RDSD obteve resultados pouco piores, com um valor médio geral de 2,24. Já em relação ao PDOP dos diferentes sistemas e combinações de sistemas, os melhores valores médios foram adquiridos pela combinação multi-GNSS, com uma média de 1,06. Por outro lado, a constelação BeiDou apresentou a pior média do PDOP para as estações selecionadas, com 3,11.

Com relação ao dia 01 de outubro, o comportamento do número médio de satélites não apresentou grandes variações em relação a junho. Tanto CUIB quanto RDSD apresentaram uma média geral de 7 satélites, considerando os quatro sistemas. Referente aos diferentes sistemas nos processamentos autônomos, novamente a melhor média foi obtida para a constelação GPS, com 9 satélites, enquanto a pior foi das constelações GLONASS e BeiDou, com 6 satélites. As combinações GPS e Galileo e multi-GNSS, obtiveram novamente 17 e 28 satélites em média, respectivamente. Analisando o PDOP

e considerando os resultados de forma geral, outra vez a estação CUIB trouxe valores pouco melhores, com uma média de 2,05, enquanto RDSD obteve uma média de 2,30. Além disso, a combinação multi-GNSS novamente apresentou os melhores resultados de PDOP, com uma média de 1,07, assim como BeiDou obteve os piores, com uma média de 3,13.

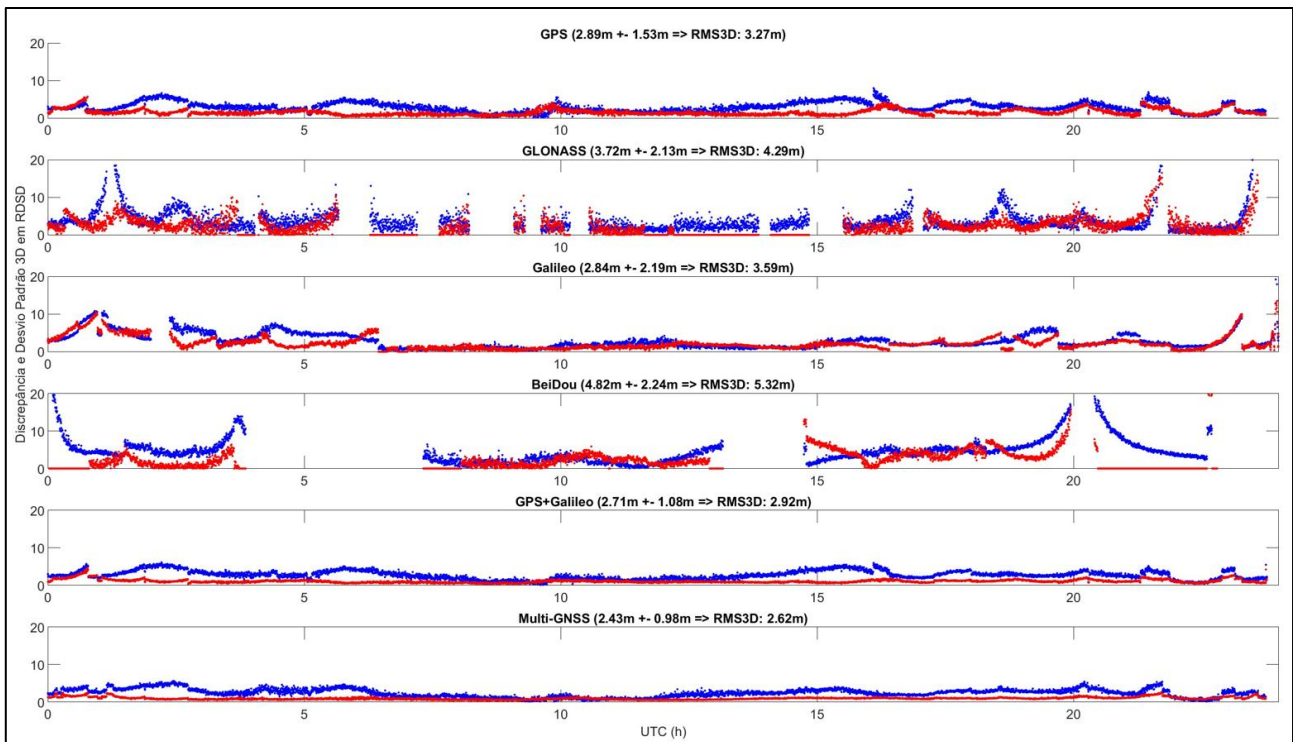
Analisando de maneira mais ampla, tanto o número de satélites quanto o PDOP, é possível observar a similaridade dos resultados para os dois dias de interesse, porém com valores pouco melhores para o dia de junho. As Figuras 12 e 13 (RDSD), assim como as Figuras 14 e 15 (CUIB), apresentam a discrepância e desvio padrão 3D, respectivamente, para os dias 01 de junho e 01 de outubro.

Figura 12 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação RDSD para o DOY 152.



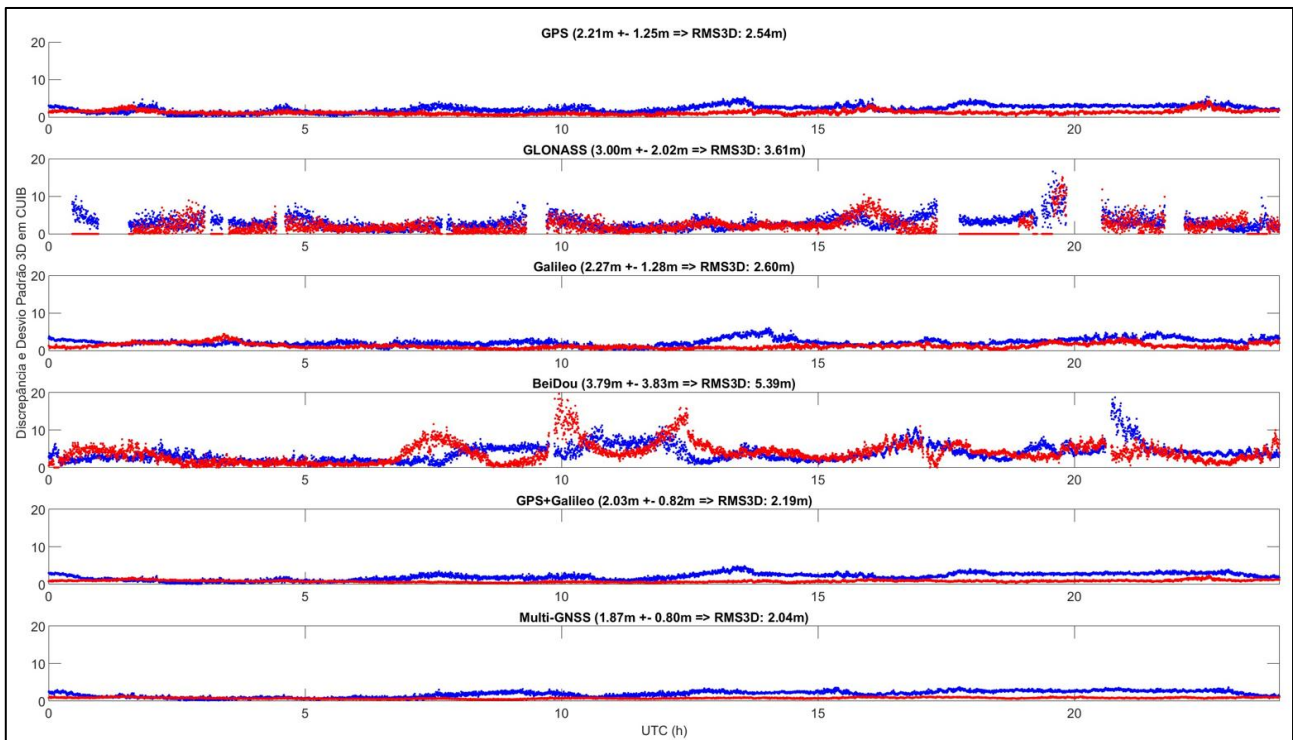
Fonte: O autor (2023).

Figura 13 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação RSDS para o DOY 274.



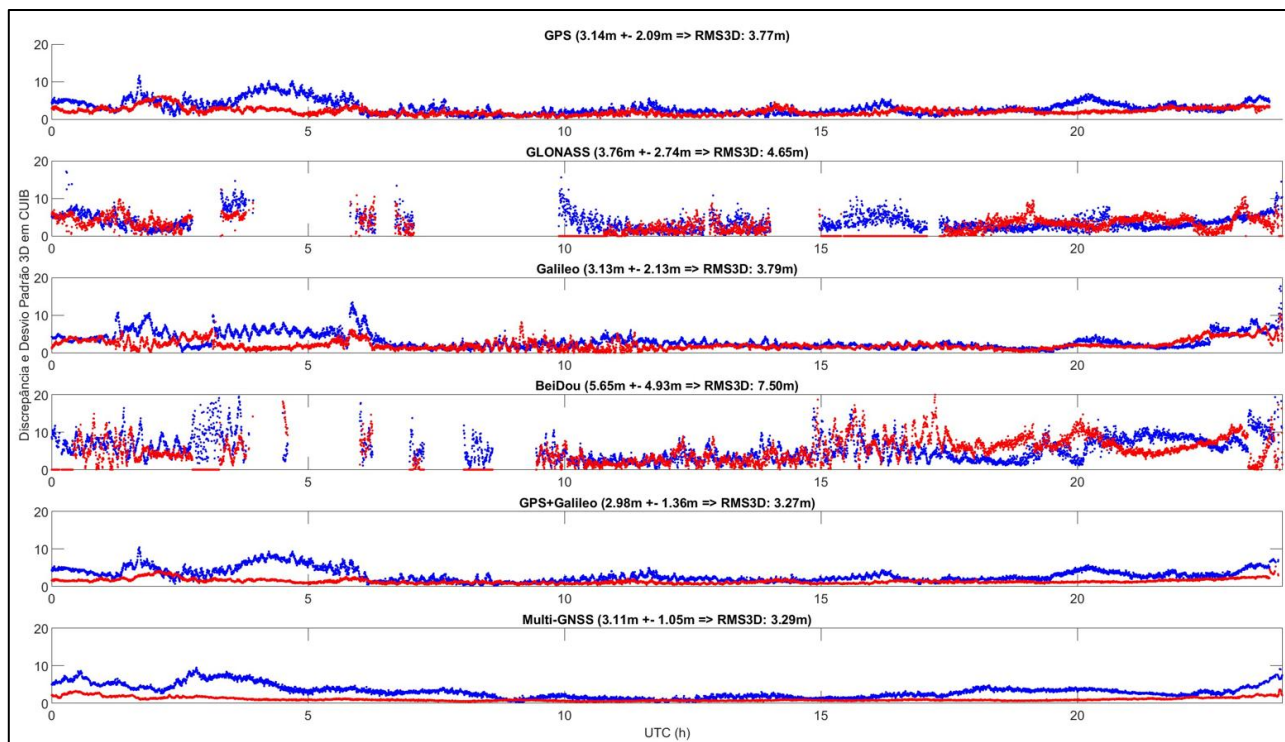
Fonte: O autor (2023).

Figura 14 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação CUIB para o DOY 152.



Fonte: O autor (2023).

Figura 15 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D da estação CUIB para o DOY 274.



Fonte: O autor (2023).

Ao analisar os gráficos apresentados nas Figuras 12 e 13, relacionados à estação RDSD, é evidente que, no dia 01 de junho, os resultados exibem uma maior uniformidade e consistência, tanto na discrepância quanto no desvio padrão, se comparados com o dia 01 de outubro, no qual, são perceptíveis as oscilações nos resultados obtidos. Em ambos os dias, é possível observar uma quantidade expressiva de épocas sem dados, tanto para o sistema GLONASS quanto para BeiDou. Isso se justifica pelo número insuficiente de satélites do sistema na época excluída (menos de 4 satélites), valores de PDOP superiores a 6, ou ainda a exclusão da época durante o controle de qualidade. Uma análise mais aprofundada dos resultados, considerando cada sistema e suas combinações, revela, em ambas as datas, uma maior uniformidade e menores valores para as combinações GPS e Galileo ( $2,27 \pm 0,97$  m) e multi-GNSS ( $2,17 \pm 0,92$ ), com resultados bastante similares, mas melhores para essa última. Já nos processamentos autônomos, o sistema Galileo ( $1,83 \pm 1,27$  m) apresentou resultados melhores que GPS ( $2,02 \pm 1,28$  m) no dia 01 de junho, porém, o mesmo não ocorreu em outubro, quando o sistema norte-americano ( $2,89 \pm 1,53$  m) obteve os melhores valores que o europeu ( $2,84 \pm 2,19$  m). Em contrapartida, o sistema BeiDou apresentou os piores resultados, tanto em junho ( $5,36 \pm 2,97$  m) quanto outubro ( $4,82 \pm 2,24$  m).

No que diz respeito aos resultados obtidos para a estação CUIB, conforme retratados nas Figuras 14 e 15, nota-se que o mesmo padrão observado na estação RDSB se repete, com resultados ainda mais regulares e valores mais baixos em 01 de junho. Entretanto, um aspecto notável em relação à estação CUIB é a redução da quantidade de épocas sem dados nos processamentos autônomos dos sistemas GLONASS e BeiDou em 01 de junho, ao passo que se observa um aumento significativo dessas ausências em outubro. A semelhança nos resultados entre as duas estações estende-se à análise dos valores obtidos para cada sistema e suas combinações na estação CUIB. Novamente, as combinações GPS e Galileo ( $2,51 \pm 1,09$  m), assim como multi-GNSS ( $2,49 \pm 0,93$  m), trazem os melhores resultados, nos dois dias analisados. Em contraste, nos processamentos autônomos, o sistema GPS se destaca como o que oferece os resultados mais consistentes ( $2,68 \pm 1,67$  m), enquanto BeiDou se mostra menos eficaz nesse aspecto ( $4,72 \pm 4,38$  m). A Tabela 4 apresenta uma análise mais detalhada em relação a discrepância e desvio padrão para as estações RDSB e CUIB nos dias de interesse.

Tabela 4 – Discrepância e desvio padrão 3D médio (metros) das estações RDSB e CUIB nos DOY 152 e 274.

DOY	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou		GPS+Galileo		Multi-GNSS	
	RDSB	CUIB	RDSB	CUIB	RDSB	CUIB	RDSB	CUIB	RDSB	CUIB	RDSB	CUIB
152	$2,02 \pm$	$2,21 \pm$	$2,92 \pm$	$3,00 \pm$	$1,83 \pm$	$2,27 \pm$	$5,36 \pm$	$3,79 \pm$	$1,83 \pm$	$2,03 \pm$	$1,91 \pm$	$1,87 \pm$
	1,28	1,25	2,18	2,02	1,27	1,28	2,97	3,83	0,86	0,82	0,86	0,80
274	$2,89 \pm$	$3,14 \pm$	$3,72 \pm$	$3,76 \pm$	$2,84 \pm$	$3,13 \pm$	$4,82 \pm$	$5,65 \pm$	$2,71 \pm$	$2,98 \pm$	$2,43 \pm$	$3,11 \pm$
	1,53	2,09	2,13	2,74	2,19	2,13	2,24	4,93	1,08	1,36	0,98	1,05

Os valores expressos na Tabela 4 expõem de maneira geral resultados menores no dia 01 de junho para as duas estações, tanto de discrepância quanto de desvio padrão, com uma média geral, considerando todos os processamentos, de  $2,59 \pm 1,62$  m. Já em outubro, a média aumenta para  $3,43 \pm 2,04$  m. No comparativo entre as estações selecionadas, considerando ambos os dias, foram obtidos menores valores para RDSB, com uma média de  $2,94 \pm 1,63$  m, enquanto CUIB alcançou em média  $3,08 \pm 2,03$  m. Analisando as diferentes constelações, o sistema BeiDou foi o que apresentou os piores resultados, em ambos os dias, com uma média de  $4,91 \pm 3,49$  m. Em contrapartida, a combinação multi-GNSS alcançou os menores valores em junho e em outubro, com um resultado médio de  $2,33 \pm 0,92$  m. A Tabela 5 apresenta a RMS3D média obtido para cada configuração de sistemas nos dias escolhidos e estações de interesse.

Tabela 5 – RMS3D média (metros) para as estações RDSD e CUIB para os DOY 152 e 274.

DOY	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou		GPS+Galileo		Multi-GNSS	
	RDSD	CUIB	RDSD	CUIB	RDSD	CUIB	RDSD	CUIB	RDSD	CUIB	RDSD	CUIB
152	2,39	2,54	3,64	3,61	2,22	2,60	6,13	5,39	2,02	2,19	2,10	2,04
274	3,27	3,77	4,29	4,65	3,59	3,79	5,32	7,50	2,92	3,27	2,62	3,29

Analisando a Tabela 5 no dia 01 de junho, nota-se uma similaridade para os resultados de ambas as estações, com RMS3D média geral, considerando todos os processamentos autônomos e combinados, de 3,08 m para RDSD e 3,06 m para CUIB. Em relação aos sistemas utilizados, BeiDou alcançou os piores resultados para ambas as estações, apresentando um resultado médio de 5,76 m, enquanto a combinação multi-GNSS obteve os menores valores de RMS3D, com uma média de 2,07 m. A combinação GPS e Galileo (2,11 m) trouxe resultados muito próximos ao da combinação multi-GNSS (2,07 m). No comparativo entre os processamentos autônomos, o sistema Galileo apresentou uma média de 2,41 m, resultado um pouco menor do que o obtido para o sistema GPS, com 2,47 m em média.

No dia 01 de outubro, a semelhança nos valores obtidos para as duas estações se mantém, com a exceção do processamento BeiDou de CUIB, que apresentou um resultado muito superior em relação a RDSD, o que elevou o resultado médio dessa estação. A RMS3D média obtido foi de 4,38 m para CUIB e de 3,67 m para RDSD. Assim como em junho, o sistema BeiDou foi o que apresentou os piores resultados em outubro, com uma média de 6,41 m. Já o sistema GPS apresentou os menores valores considerando os processamentos autônomos, com uma média de 3,52 m. Na comparação dos processamentos combinados, novamente o multi-GNSS alcançou os menores valores de RMS3D, com 2,96 m, enquanto a combinação GPS e Galileo obteve uma média de 3,10 m.

De forma geral, a estação RDSD apresentou a melhor média de RMS3D, com 3,38 m, enquanto CUIB alcançou uma média de 3,72 m. O dia de junho trouxe uma menor média em relação ao dia de outubro, com 3,07 m e 4,02 m, respectivamente. A combinação multi-GNSS teve a menor média geral, com 2,51 m, enquanto o sistema BeiDou teve a pior, com 6,09 m. A Tabela 6 traz as porcentagens de melhorias obtidas com a utilização da combinação multi-GNSS em relação aos outros sistemas e combinação.

Tabela 6 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações RSDS e CUIB para os DOY 152 e 274.

DOY	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou		GPS+Galileo	
	RSDS	CUIB	RSDS	CUIB	RSDS	CUIB	RSDS	CUIB	RSDS	CUIB
152	12,1%	19,7%	42,3%	43,5%	5,4%	21,5%	65,7%	62,2%	-4,0%	6,8%
274	19,9%	12,7%	38,9%	29,2%	27,0%	13,2%	50,8%	56,1%	10,3%	-0,6%

A partir da análise das porcentagens enunciadas na Tabela 6, é possível notar que a combinação multi-GNSS traz melhorias significativas em todos os processamentos autônomos. Já em relação a combinação GPS e Galileo, essa melhoria somente não ocorre para a estação RSDS no DOY 152 e para CUIB no DOY 274. As porcentagens de melhorias mais significativas se deram em relação ao sistema BeiDou, com uma média de melhoria de 63,9% em junho e de 53,4% em outubro. Os menores percentuais de melhorias se deram em relação à combinação GPS e Galileo, com um resultado médio de 1,4% e 4,8%, respectivamente para junho e outubro. Comparando as melhorias nas estações selecionadas, os percentuais médios ficaram muito próximos, com 26,8% para RSDS e 26,4% para CUIB. Considerando os dias analisados, os percentuais foram muito próximos, sendo de 27,5% para junho e 25,8% para outubro.

### 5.1.2. Considerações

No experimento realizado, buscou-se analisar a performance do PP utilizando observações de pseudodistância de diferentes constelações, tanto de forma autônoma quanto combinada. Para isso, foram selecionadas duas estações do IGS em hemisférios distintos e dois dias de meses com alta e baixa influência da ionosfera.

Considerando os diferentes sistemas utilizados de forma autônoma, os melhores resultados foram obtidos para o sistema GPS, que também apresentou a melhor média de satélites e os menores valores de PDOP. Os resultados do sistema Galileo ficaram bem próximos aos obtidos pelo sistema norte-americano, sendo em algumas configurações até melhores. Já o sistema BeiDou não obteve o mesmo êxito, apresentando os piores resultados nos processamentos. Além disso, o sistema chinês obteve os maiores valores de PDOP e a segunda pior média do número de satélites, perdendo apenas para o sistema GLONASS neste quesito.

Na utilização de sistemas de forma combinada, foram obtidos os melhores resultados de posicionamento, assim como os menores valores de PDOP. De forma geral,

a combinação multi-GNSS apresentou resultados melhores que a combinação GPS e Galileo, apresentando em média um percentual de melhoria de 26,6% em relação às outras configurações.

No comparativo entre os dias analisados, o dia 01 de junho foi o que apresentou os melhores valores de posicionamento, o que é justificado pela menor influência da ionosfera nesse mês. O PDOP e número de satélites dos sistemas permaneceu constante independentemente do dia analisado, como esperado. Com relação às estações utilizadas, a maior média de satélites e conseqüentemente menores valores de PDOP, se deram para a estação CUIB. Porém, considerando os resultados de posicionamento, a estação RDSD apresentou valores cerca de 9% menores que os alcançados para a estação CUIB, o que pode ser justificado pela localização dessa última, que está presente na região equatorial, a mais afetada pelos efeitos da ionosfera. O Experimento II ampliou a área de estudo, considerando um maior número de estações e dias analisados.

## **5.2. Experimento II**

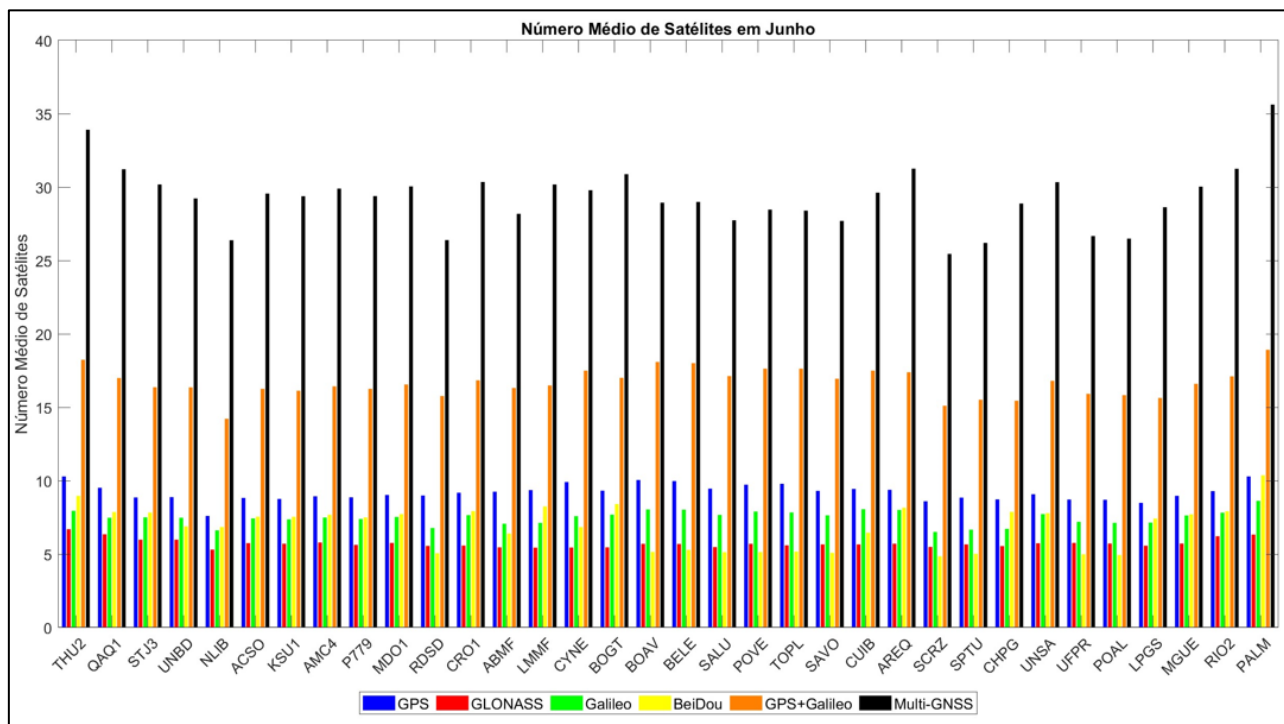
### **5.2.1. Resultados e discussões**

A Figura 16 apresenta o número médio de satélites obtidos para as estações selecionadas no segundo experimento no mês de junho. As estações foram organizadas, de modo que a primeira, da esquerda para a direita, representa a estação de maior latitude, ou seja, mais ao norte do globo, enquanto a última representa a de menor latitude, no extremo sul.

Nota-se, a partir da análise da Figura 16, que em geral as maiores médias de satélites são obtidas para as estações em latitudes extremas, já que das 5 melhores médias, 4 estão nessas regiões: PALM (Antártida), THU2 (Groenlândia), RIO2 (Argentina) e QAQ1 (Groenlândia). A única exceção é a estação AREQ (Peru), que está localizada em uma região mais próxima ao equador geomagnético. Considerando os processamentos autônomos e combinados de maneira individualizada, a melhor média em junho, de 10 satélites, foi obtida para a estação PALM com o sistema BeiDou. Já a pior média, de 5 satélites, se deu para a estação SCRZ (Bolívia), também com a utilização do sistema BeiDou. Considerando os processamentos de forma geral, a melhor média continuou sendo para a estação PALM, com 9 satélites, enquanto a pior média também voltou a ser da estação SCRZ, com 6 satélites. Em relação aos sistemas utilizados de forma individual,

o GPS foi o que apresentou a maior média, com 9 satélites, enquanto o sistema GLONASS alcançou uma média de apenas 6 satélites.

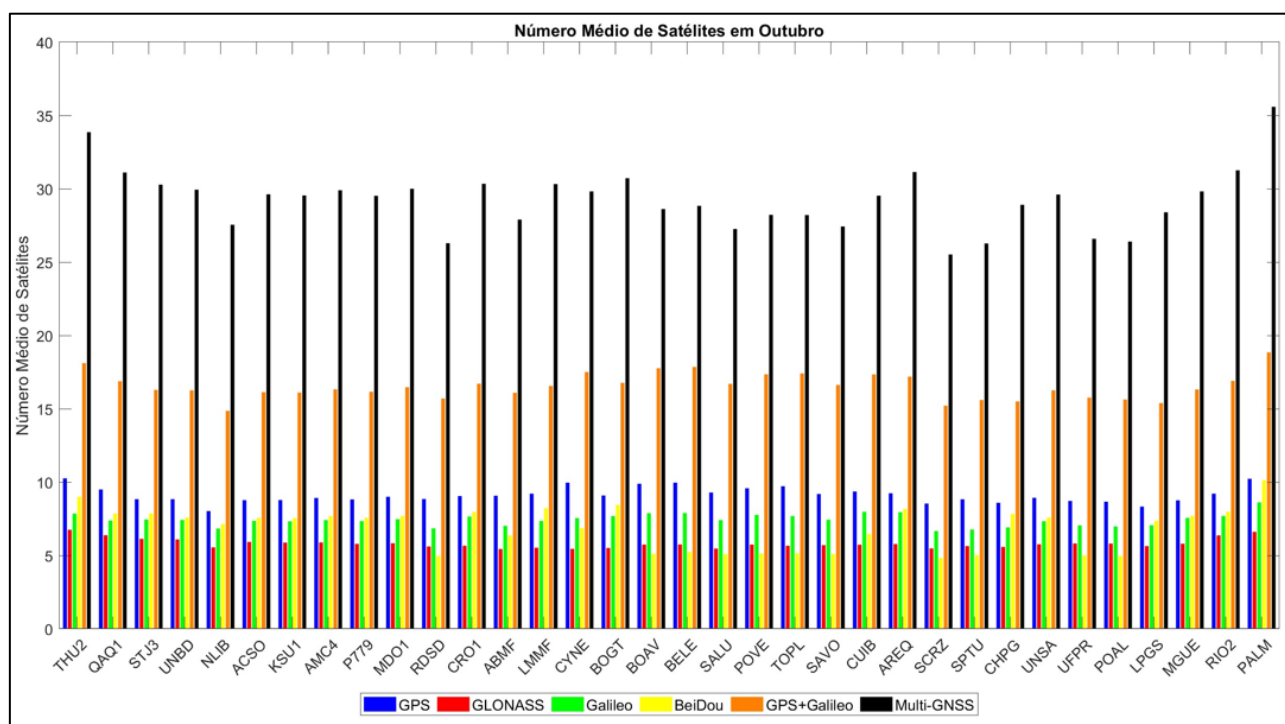
Figura 16 – Número médio de satélites para as estações selecionadas no mês de junho.  
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo).



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 17 é apresentado o número médio de satélites considerando o mês de outubro, no qual verifica-se um comportamento muito similar ao mês de junho, com as maiores médias sendo obtidas para as estações PALM, THU2, RIO2, AREQ e QAO1. Verifica-se que no mês de outubro, a maior média de satélites, considerando os processamentos dos sistemas de forma individualizada, se deu para a estação THU2 com o sistema GPS, alcançando 10 satélites. Já a menor média ocorreu novamente para a estação SCRZ com a utilização do sistema BeiDou, obtendo uma média de 5 satélites. Assim como em junho, no mês de outubro a maior e menor média geral, considerando todos os processamentos, foram alcançadas pelas estações PALM e SCRZ, respectivamente. Considerando todas as estações e analisando os sistemas utilizados, as maiores e piores médias de satélites foram atingidos, respectivamente, para os sistemas GPS (9 satélites) e GLONASS (6 satélites).

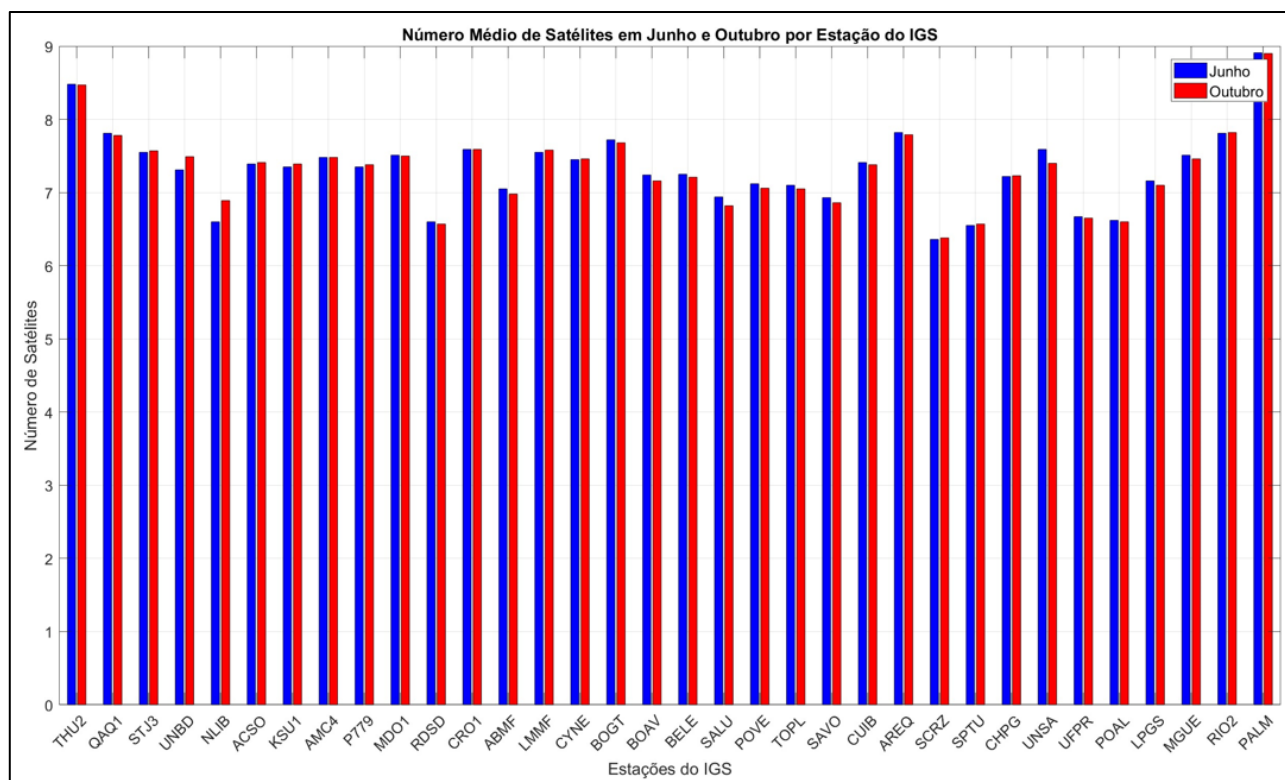
Figura 17 – Número médio de satélites para as estações selecionadas no mês de outubro.  
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo).



Fonte: O autor (2023).

A Figura 18 apresenta o número médio de satélites rastreados pelas estações IGS de interesse, realizando a comparação entre os meses de junho e outubro e considerando apenas os processamentos autônomos. Através da sua visualização, se faz evidente a proximidade das médias obtidas em junho e outubro, independente da estação e região em que essa se encontra. As médias gerais obtidas para junho e outubro foram de 7 satélites.

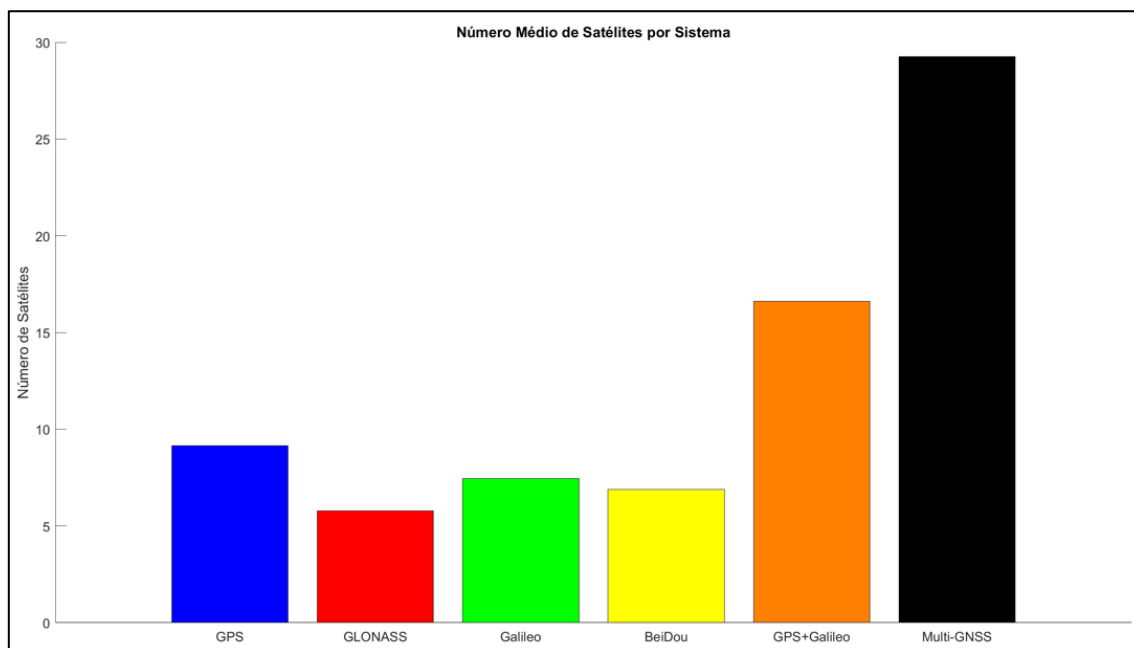
Figura 18 - Número de satélites para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.



Fonte: O autor (2023).

A Figura 19 traz uma análise comparativa do número médio de satélites rastreados pelos diferentes sistemas GNSS. Nota-se que as análises anteriormente realizadas são reforçadas, visto que o sistema GPS apresenta a maior média de satélites no geral, com 9 satélites, seguido dos sistemas Galileo e BeiDou. Já as menores médias se confirmam para o sistema GLONASS, o qual alcançou 6 satélites em média.

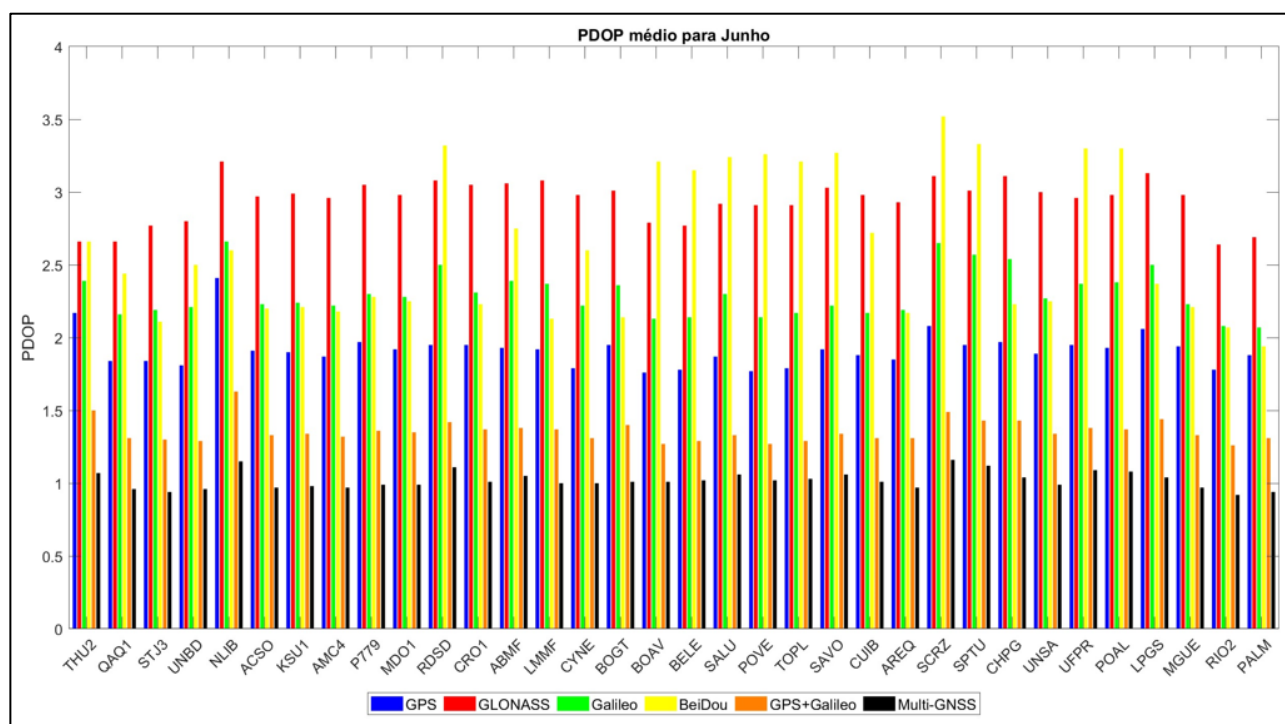
Figura 19 - Número médio de satélites por sistema.



Fonte: O autor (2023).

Outro fator analisado no experimento foi o PDOP médio obtido para cada uma das estações, sistemas e meses de interesse. A Figura 20 expõe o PDOP obtido em junho, quando o sistema GLONASS foi o que apresentou maiores valores médios de PDOP na maioria das estações de interesse, obtendo uma média de 2,95. Já a combinação multi-GNSS foi a responsável pela menor média do PDOP entre as configurações de sistemas analisados, 1,02. Em algumas estações, os valores médios de PDOP foram maiores para o sistema BeiDou, superando o sistema russo. A combinação GPS e Galileo apresentou resultados médios de PDOP relativamente próximos aos obtidos com a combinação multi-GNSS, com uma média de 1,36. Nota-se ainda, analisando as estações utilizadas, que a menor média do PDOP foi obtida para a estação RIO2 para a combinação multi-GNSS (0,92), enquanto a maior média foi alcançada pela estação SCRZ para o sistema BeiDou (3,52). As estações RIO2 e SCRZ também obtiveram, respectivamente, a menor (1,79) e maior (2,34) média geral para o PDOP.

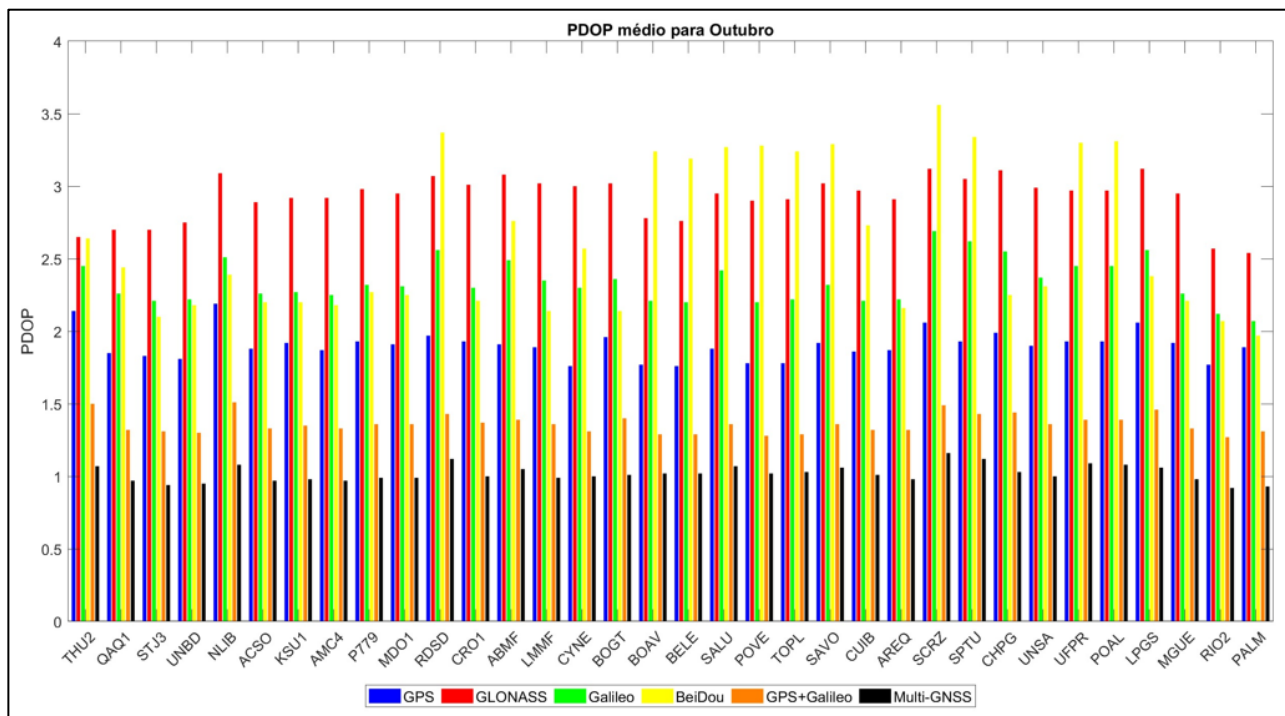
Figura 20 – PDOP para as estações selecionadas no mês de junho.  
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

A Figura 21, com os resultados de outubro, apresenta um comportamento do PDOP bastante similar ao mês de junho, com os maiores valores sendo obtidos para o sistema GLONASS na maior parte das estações, com um PDOP médio de 2,92. A combinação multi-GNSS apresentou mais uma vez os menores valores do PDOP em todas as estações analisadas, alcançando 1,02 em média. Entre os sistemas autônomos, os menores valores foram obtidos para o sistema GPS. Assim como em junho, as estações RIO2 e SCRZ, mais uma vez apresentaram a menor e pior média geral do PDOP, respectivamente 1,79 e 2,35. Ademais, outra vez o melhor resultado foi alcançado pela estação RIO2 com a combinação multi-GNSS (0,92) e o pior para a estação SCRZ com o sistema BeiDou (3,56).

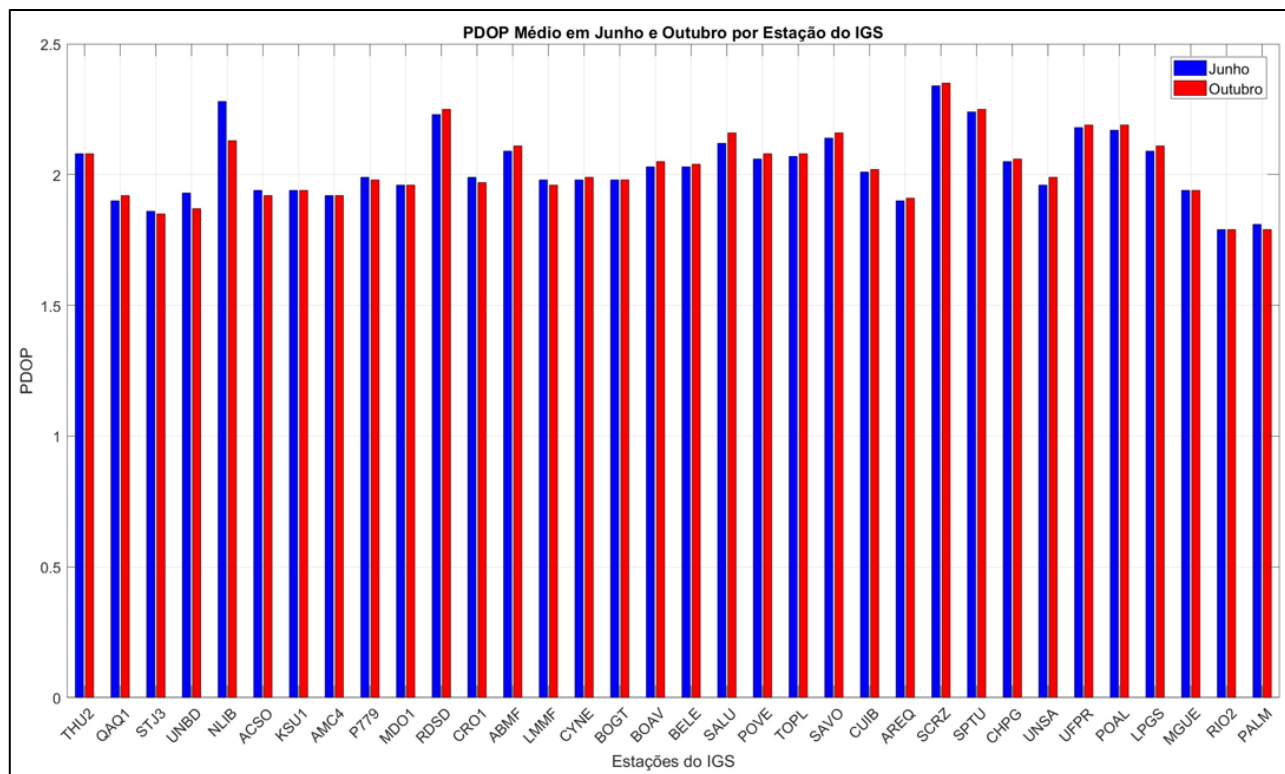
Figura 21 - PDOP para as estações selecionadas no mês de outubro.  
GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



Fonte: O autor (2023).

A Figura 22 exibe a comparação dos valores médios do PDOP das estações IGS entre os meses de junho e outubro, sendo possível notar que a maioria das estações apresentou variações muito pequenas no PDOP médio entre junho e outubro, evidenciando consistência nos resultados ao longo desses meses. Isso se comprova através do PDOP médio final obtido para os meses, de 2,03 para ambos.

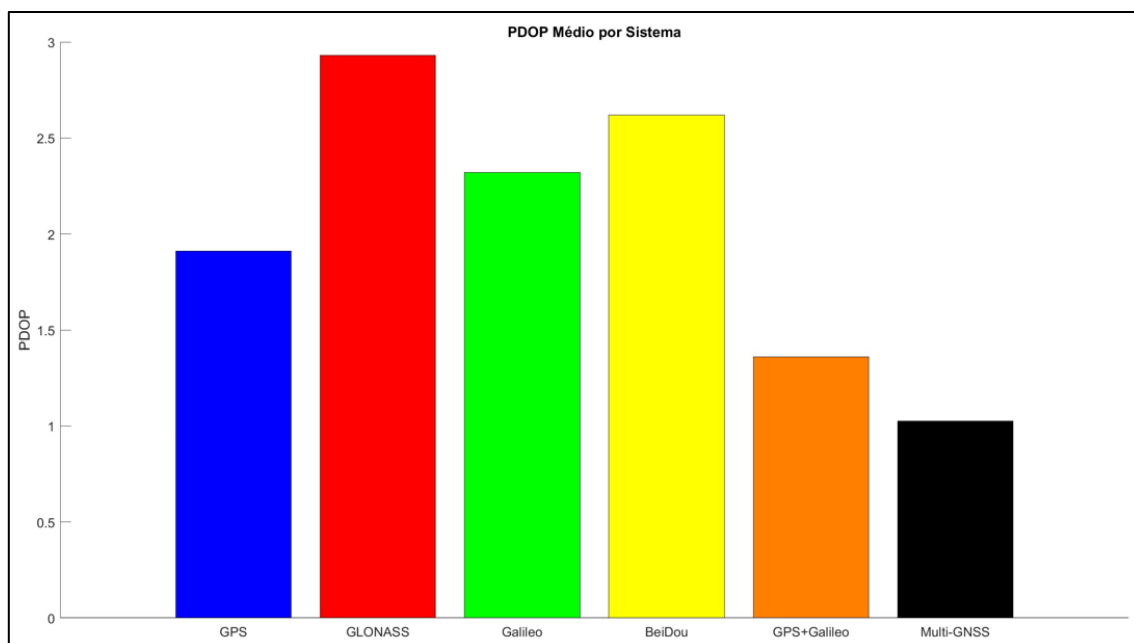
Figura 22 - PDOP para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 23, são apresentados os valores médios de PDOP, agora comparando os diferentes sistemas e combinações utilizados. Analisando a figura, o sistema GLONASS apresenta o maior valor médio de PDOP (2,93), indicando uma pior geometria de satélites, que é diretamente impactada pelo número de satélites disponíveis no instante da medição. O sistema BeiDou também mostra valores médios relativamente altos de PDOP, sendo em média 2,62. O sistema GPS, assim como a combinação GPS e Galileo, apresentaram valores médios de PDOP abaixo de 2, sendo respectivamente, 1,91 e 1,36. A combinação multi-GNSS alcançou os menores valores médios de PDOP (1,02), sugerindo a melhor geometria de satélites possível entre as configurações analisadas.

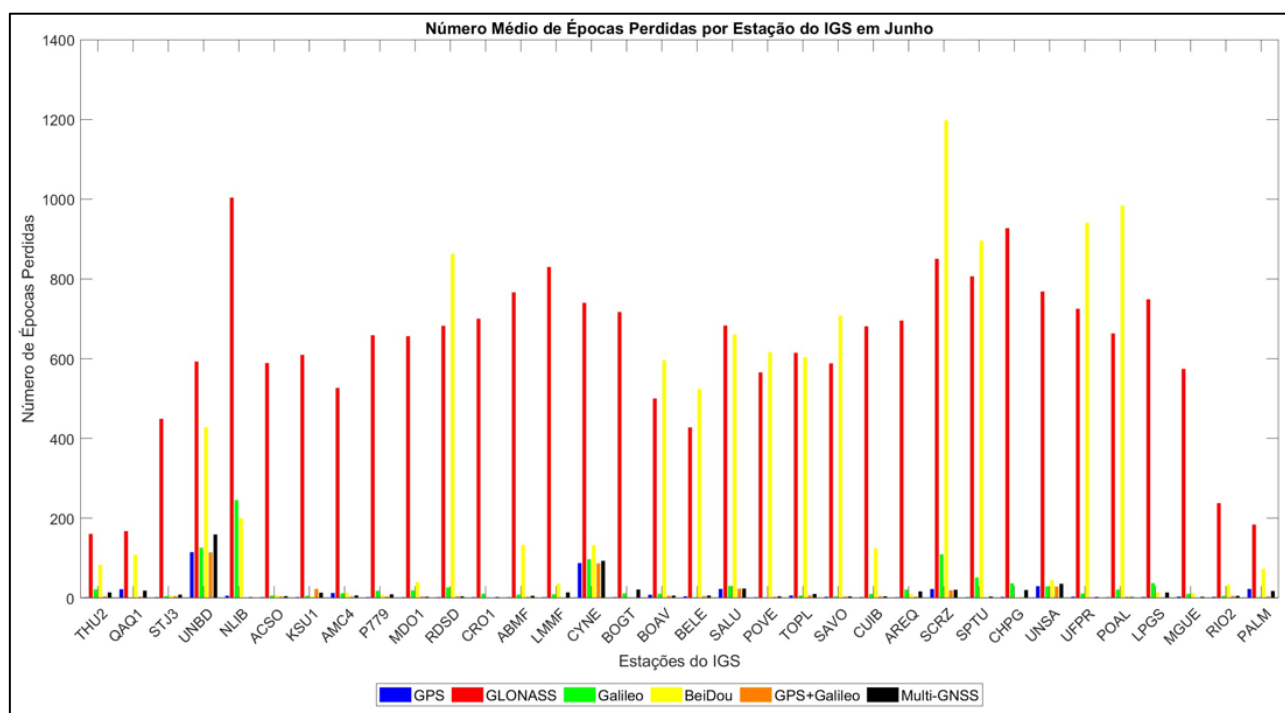
Figura 23 – PDOP médio por sistema.



Fonte: O autor (2023).

Outro parâmetro analisado nesse experimento foi o número de épocas nas quais não foram obtidos resultados de posicionamento, denominadas épocas perdidas. Nessas épocas não são obtidas as coordenadas de interesse devido a alguns fatores, entre os quais pode ser citada a indisponibilidade de observações naquela época, o número de satélites inferior a 4, o PDOP superior ao limiar de 6, ou ainda a exclusão da época pelo método DIA. A Figura 24 apresenta o número de épocas perdidas em cada dia analisado no mês de junho, considerando as estações e sistemas utilizados no experimento.

Figura 24 – Número de épocas perdidas para as estações selecionadas no mês de junho. GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).



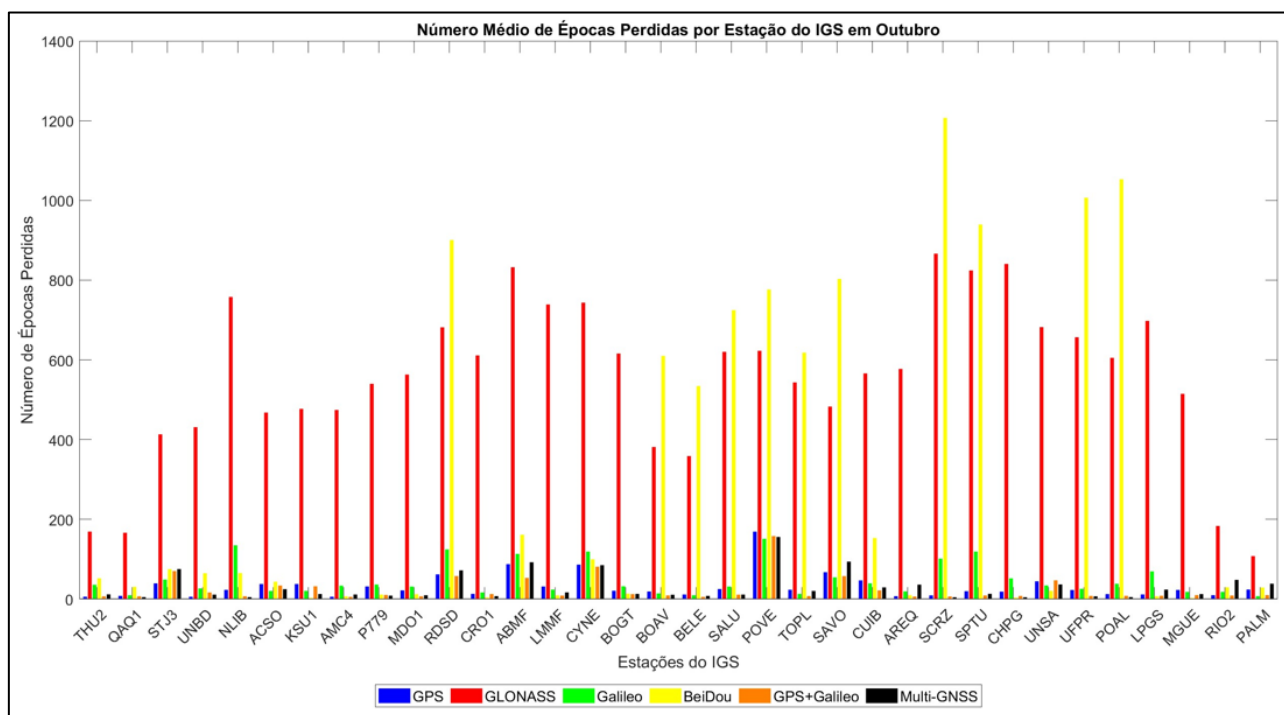
Fonte: O autor (2023).

Ao examinar a Figura 24, é evidente que, no mês de junho, os sistemas GLONASS e BeiDou destacam-se por apresentarem as maiores médias de épocas perdidas, revelando uma significativa discrepância em relação aos demais sistemas e combinações analisados, com um percentual médio de épocas perdidas por dia de 21,54% e 10,32%, respectivamente. Importante notar que o alto índice de épocas perdidas do sistema GLONASS é uma constante em todas as estações que compõem o experimento, ao passo que o sistema BeiDou exhibe resultados mais heterogêneos. Verifica-se também que a combinação GPS e Galileo obteve o menor percentual médio de épocas perdidas, 0,40%. Nota-se ainda que o menor percentual médio de épocas perdidas se dá para a estação BOGT com o sistema BeiDou (0,01%). Já o maior percentual médio ocorre para a estação SCRZ, também com o sistema BeiDou (41,59%). Considerando o resultado geral de cada estação, verifica-se que a menor porcentagem média de épocas perdidas é obtida para a estação THU2 (1,66%), enquanto a maior é alcançada para a estação SCRZ (12,85%).

A Figura 25 exibe a quantidade média de épocas perdidas por dia, desta vez no mês de outubro, considerando as estações e sistemas empregados no experimento. A sua análise, demonstra que o número médio de épocas perdidas em outubro tem comportamento bastante similar ao mês de junho, evidenciando novamente os altos

índices de épocas perdidas para os sistemas GLONASS e BeiDou. Outra semelhança se dá na constância dos resultados, visto que novamente em todas as estações analisadas o sistema GLONASS apresentou um número expressivo de épocas perdidas em relação aos demais sistemas, apresentando a maior porcentagem média de épocas perdidas (19,22%). Em contrapartida, a combinação GPS e Galileo apresentou novamente a menor porcentagem média de épocas perdidas por dia (0,85%). Além disso, o maior percentual médio de épocas perdidas se deu novamente para a estação SCRZ com o sistema BeiDou (41,91%), enquanto o menor ocorreu para a estação MGUE (0,09%), também para o sistema BeiDou. Em relação ao percentual médio obtido para as estações de interesse, considerando todos os processamentos (autônomos e combinados), SCRZ mais uma vez apresentou a maior porcentagem média de épocas perdidas (12,71%), enquanto a estação PALM, trouxe a menor porcentagem média nesse quesito (1,26%).

Figura 25 - Número de épocas perdidas para as estações selecionadas no mês de outubro. GPS (azul); GLONASS (vermelho); Galileo (verde); BeiDou (amarelo); GPS+Galileo (laranja); e multi-GNSS (preto).

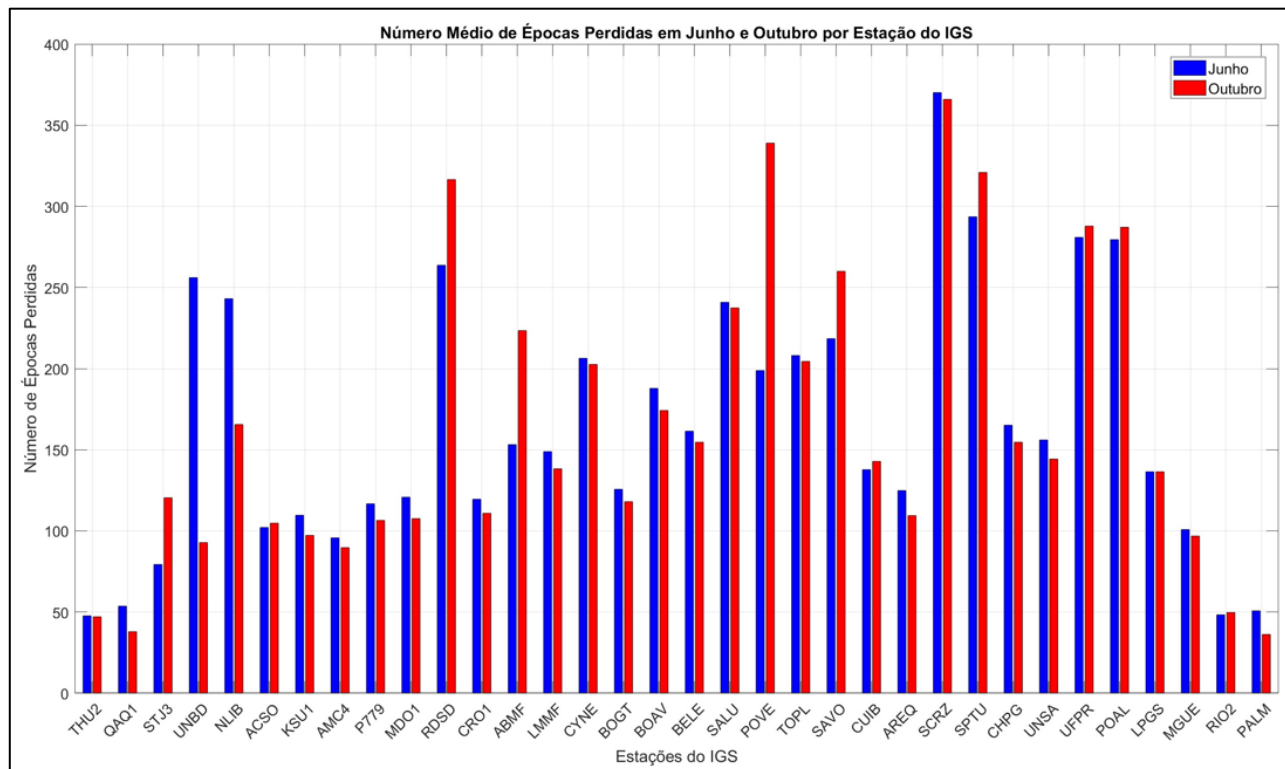


Fonte: O autor (2023).

A Figura 26 proporciona uma visualização comparativa das épocas perdidas nos dois meses analisados no experimento para cada uma das estações. Nota-se, que na maioria das estações utilizadas os resultados de junho e outubro são bastante similares, apresentando, respectivamente, um percentual médio de épocas perdidas de 5,72% e

5,70%. Essa proximidade dos resultados indica que o número de épocas perdidas para cada sistema e estação independe da época do ano.

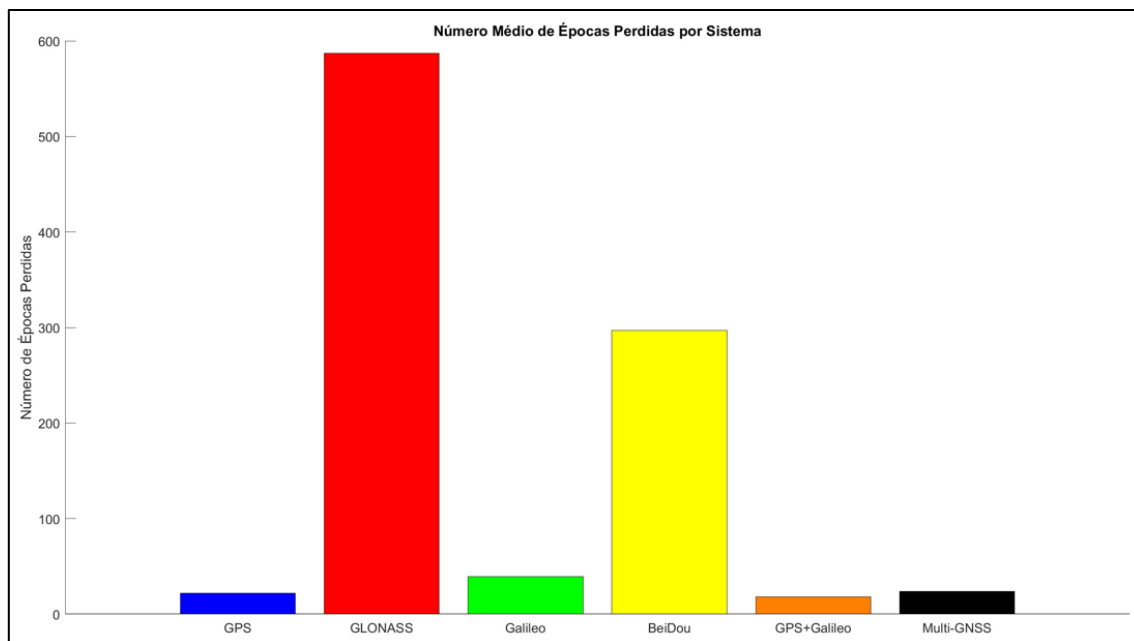
Figura 26 – Número de épocas perdidas para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.



Fonte: O autor (2023).

A observação do número médio de épocas perdidas para cada um dos sistemas pode ser verificada na Figura 27. Ao analisar a média da quantidade de épocas perdidas para os diferentes sistemas e combinações empregados no experimento, destaca-se o elevado índice observado nos sistemas GLONASS e BeiDou, com valores notoriamente discrepantes em comparação com os demais sistemas. A maior porcentagem média de épocas perdidas foi obtida para o sistema GLONASS (20,38%), enquanto a menor foi alcançada pela combinação GPS e Galileo (0,62%).

Figura 27 – Número médio de épocas perdidas por sistema.



Fonte: O autor (2023).

A RMS3D também foi analisada no experimento, sendo os valores obtidos para o mês de junho, para as diferentes estações e sistemas, apresentados na Figura 28. Primeiramente, nota-se de modo geral que o sistema BeiDou apresentou os maiores valores de RMS3D para a maioria das estações, apresentando uma média 4,67 m. Já as combinações multi-GNSS e GPS e Galileo apresentaram os melhores valores nesse quesito, com uma RMS3D média de 2,19 m e 2,28 m, respectivamente. Entre os sistemas autônomos, o norte-americano GPS foi o que apresentou os menores valores de RMS3D, 2,63 m em média. Nota-se ainda, que as estações presentes nas regiões de latitudes altas, como por exemplo as estações THU2, QAQ1, STJ3, UNBD e RIO2 apresentaram resultados menores de RMS3D do que a grande maioria das estações presentes em regiões de latitudes médias. De modo geral, o melhor resultado obtido para a RMS3D se deu para a estação STJ3 com a combinação multi-GNSS, apresentando uma média de 1,45 m. Em contrapartida, a estação NLIB, com a utilização do sistema BeiDou, apresentou uma RMS3D média de 6,31 m, sendo o pior resultado desse mês. A melhor média da RMS3D também foi obtida para a estação STJ3 (2,23 m), enquanto a pior média foi alcançada pela estação P779 (4,10 m).

Figura 28 – RMS3D para as estações selecionadas no mês de junho.



Fonte: O autor (2023).

De modo a verificar as melhorias obtidas através da utilização da combinação multi-GNSS, que alcançou os menores valores de RMS3D em junho, foi calculado o percentual de melhorias em relação aos demais sistemas e combinação. Esses resultados podem ser verificados na Tabela 7.

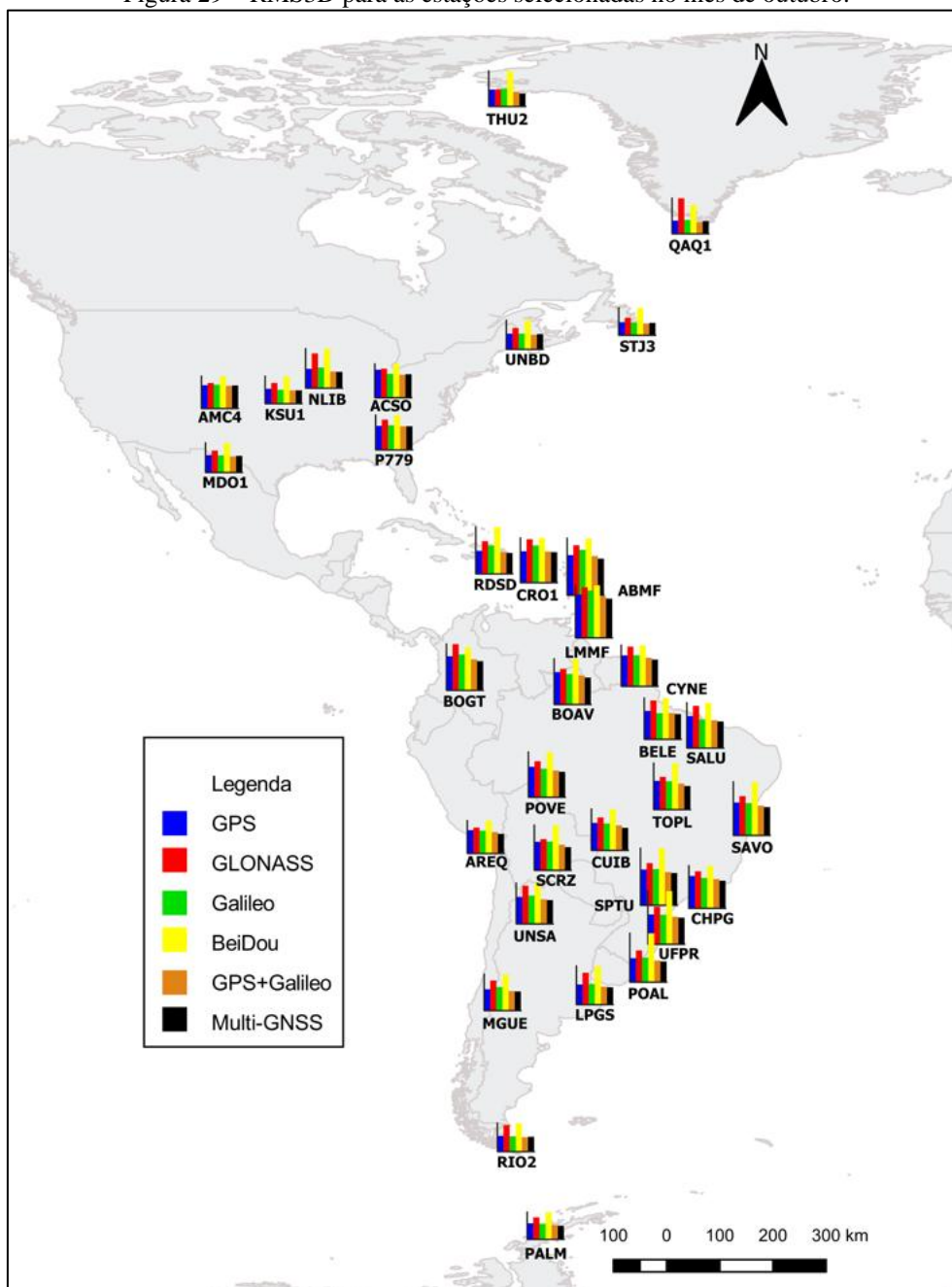
Tabela 7 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações selecionadas no mês de junho.

Nome	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	GPS+Galileo
ABMF	19,77%	35,67%	22,71%	53,42%	7,46%
ACSO	6,17%	13,37%	3,58%	32,95%	1,13%
AMC4	6,98%	7,51%	9,86%	31,03%	2,74%
AREQ	12,99%	41,91%	30,45%	61,05%	2,43%
BELE	21,19%	49,73%	12,68%	59,30%	3,12%
BOAV	19,77%	42,82%	17,86%	57,58%	5,91%
BOGT	19,52%	51,09%	26,55%	50,97%	6,91%
CHPG	13,57%	50,29%	27,12%	54,26%	1,15%
CRO1	16,49%	31,55%	19,54%	44,52%	6,54%
CUIB	22,35%	39,17%	20,23%	57,47%	8,89%
CYNE	13,79%	47,78%	23,37%	53,60%	2,44%
KSU1	23,11%	36,58%	22,01%	62,00%	7,91%
LMMF	20,38%	35,87%	25,44%	47,12%	8,66%
LPGS	15,85%	53,38%	26,60%	56,96%	2,36%
MDO1	18,33%	32,12%	21,15%	50,12%	7,24%
MGUE	4,71%	25,53%	13,46%	37,80%	-1,43%
NLIB	23,56%	55,22%	27,92%	59,90%	5,95%
P779	8,44%	24,07%	8,44%	35,74%	3,61%
PALM	-5,51%	52,23%	2,55%	30,21%	-13,56%
POAL	20,00%	46,81%	28,83%	62,34%	4,76%
POVE	24,21%	55,58%	11,16%	58,57%	7,73%
QAQ1	8,60%	56,07%	11,46%	55,03%	-10,39%
RDSO	18,51%	33,04%	16,73%	54,56%	4,98%
RIO2	-0,95%	46,06%	19,39%	45,08%	-11,58%
SALU	24,54%	53,60%	18,58%	60,61%	5,07%
SAVO	22,55%	43,95%	20,82%	58,32%	6,99%
SCRZ	25,60%	45,50%	33,94%	56,31%	11,02%
SPTU	22,45%	41,98%	22,71%	59,72%	8,06%
STJ3	23,68%	46,30%	27,86%	61,44%	8,23%
THU2	32,52%	29,80%	32,85%	69,32%	15,24%
TOPL	23,94%	41,89%	23,35%	60,52%	8,80%
UFPR	17,28%	38,86%	19,93%	57,14%	4,66%
UNBD	17,83%	36,58%	17,83%	56,95%	3,57%
UNSA	14,83%	42,96%	20,32%	47,11%	3,14%
<b>Média</b>	<b>16,97%</b>	<b>40,73%</b>	<b>20,21%</b>	<b>52,91%</b>	<b>4,11%</b>

Ao examinar a Tabela 7, é possível constatar que o sistema que demonstra o maior aumento percentual de melhoria ao utilizar a combinação multi-GNSS é o sistema BeiDou, com um ganho de 52,91%. Em contrapartida, o menor incremento percentual ocorre na combinação GPS e Galileo, com um aumento de 4,11%, o qual é justificado pela proximidade dos resultados entre essa combinação e a multi-GNSS. Vale notar, também, que em 11,76% das estações, a combinação GPS e Galileo apresenta valores de RMS3D inferiores à combinação multi-GNSS.

Na Figura 29 é possível observar os resultados obtidos para a RMS3D referentes ao mês de outubro. Da mesma forma que observado em junho, é possível identificar valores menores de RMS3D nas estações localizadas em regiões de altas latitudes, como PALM, RIO2, STJ3, UNBD e THU2. Entre todos os resultados obtidos, a estação QAQ1 alcançou o menor valor de RMS3D ao empregar a combinação GPS e Galileo (1,91 m). Por outro lado, a estação ABMF com o sistema BeiDou obteve o resultado menos favorável (9,32 m). No que diz respeito às médias gerais da RMS3D para cada estação, a estação STJ3, mais uma vez, registrou a média mais baixa, com 2,58 m, enquanto a estação LMMF obteve a média mais elevada, com 7,47 m. Na comparação entre os sistemas utilizados, mais uma vez, o sistema chinês BeiDou apresentou a média mais alta para a RMS3D (6,59 m), ao passo que a combinação multi-GNSS atingiu a média mais baixa (3,71 m). Comparando os resultados obtidos para o mês de junho, torna-se evidente um aumento notável na RMS3D durante o mês de outubro em todas as estações dos experimentos. Esse aumento se torna ainda mais acentuado nas estações próximas ao equador geomagnético.

Figura 29 – RMS3D para as estações selecionadas no mês de outubro.



Fonte: O autor (2023).

Com base nos resultados obtidos em outubro, a Tabela 8 exibe o percentual de melhoria ao empregar a combinação multi-GNSS em comparação com os outros sistemas. Os resultados de outubro indicam uma certa similaridade com os percentuais obtidos para junho. Isso ocorre pois novamente foi identificado um maior percentual de melhoria para o sistema BeiDou quando é utilizada a combinação multi-GNSS, 44,19%. Além disso, a combinação GPS e Galileo é a menos impactada com a utilização da multi-GNSS, apresentando 3,17% de melhoria. Com relação ao número de estações que apresentaram

melhores resultados para a combinação GPS e Galileo, do que para a multi-GNSS, o percentual cresceu para 26,47% em outubro.

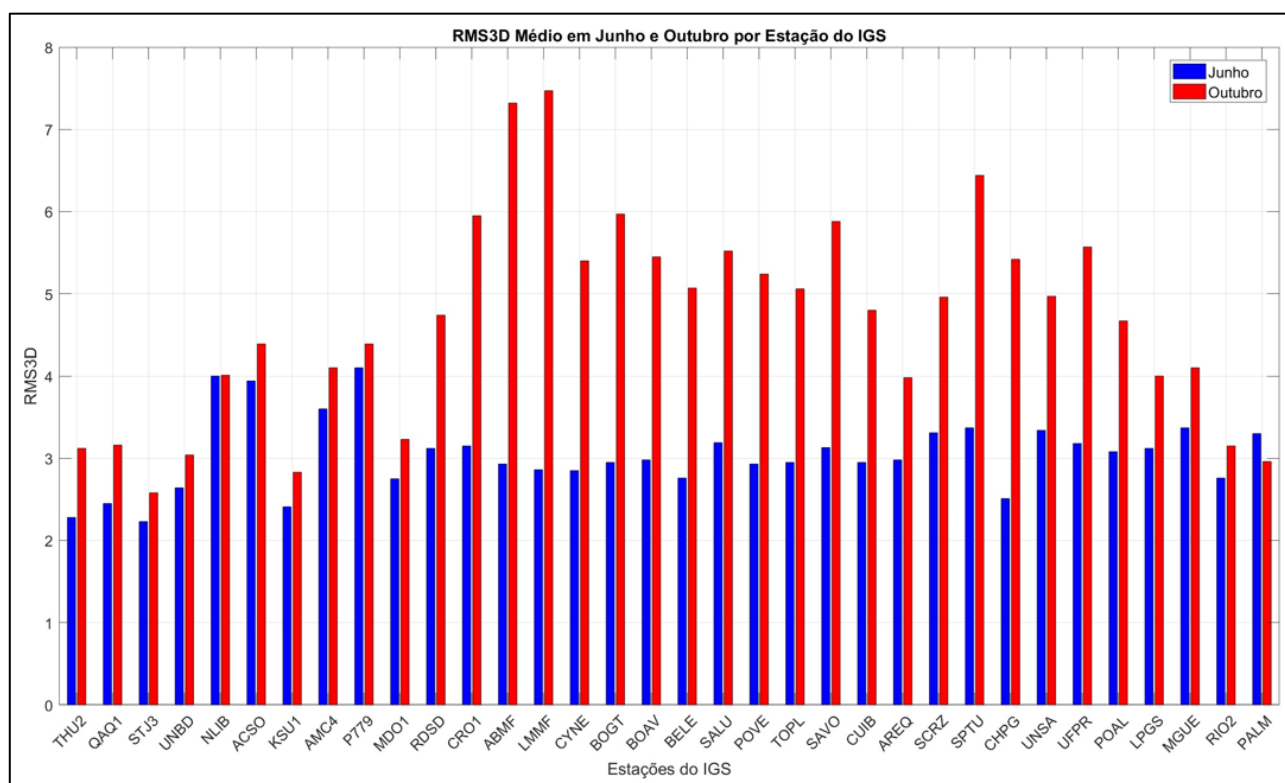
Tabela 8 – Porcentagem de melhoria com a utilização da combinação multi-GNSS para as estações selecionadas no mês de outubro.

<b>Nome</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>Galileo</b>	<b>BeiDou</b>	<b>GPS+Galileo</b>
ABMF	8,69%	26,77%	19,49%	35,73%	6,70%
ACSO	15,97%	18,99%	1,29%	30,31%	-2,13%
AMC4	1,05%	10,05%	3,34%	28,79%	-1,62%
AREQ	15,75%	24,29%	13,71%	40,22%	8,55%
BELE	10,99%	35,06%	3,28%	38,72%	3,73%
BOAV	16,32%	24,49%	11,80%	40,88%	6,96%
BOGT	14,03%	36,69%	18,57%	31,81%	5,72%
CHPG	14,77%	25,74%	9,46%	35,16%	6,05%
CRO1	2,73%	29,72%	18,06%	31,74%	1,77%
CUIB	18,04%	31,60%	16,36%	45,40%	10,02%
CYNE	13,47%	32,67%	13,81%	34,87%	6,62%
KSU1	9,84%	35,29%	3,51%	51,00%	-0,46%
LMMF	8,82%	22,49%	17,08%	25,47%	5,18%
LPGS	13,33%	45,21%	15,38%	54,46%	3,38%
MDO1	4,23%	24,02%	2,51%	43,69%	-3,03%
MGUE	10,29%	36,18%	18,86%	47,14%	2,18%
NLIB	15,19%	52,82%	20,71%	58,39%	1,47%
P779	1,53%	21,66%	3,97%	31,87%	-0,26%
PALM	16,29%	38,61%	13,67%	50,23%	5,15%
POAL	13,78%	34,87%	15,92%	57,64%	4,52%
POVE	16,47%	29,25%	10,92%	43,63%	5,02%
QAQ1	4,59%	64,20%	9,17%	55,74%	-8,90%
RDSO	9,26%	35,89%	26,08%	55,28%	3,92%
RIO2	5,08%	44,01%	2,80%	47,97%	-2,53%
SALU	16,83%	36,96%	7,25%	41,14%	4,40%
SAVO	13,97%	28,15%	12,50%	47,08%	4,94%
SCRZ	18,49%	25,69%	19,19%	48,51%	9,33%
SPTU	9,76%	23,62%	10,83%	43,33%	2,95%
STJ3	4,69%	28,77%	2,40%	54,59%	-5,73%
THU2	24,46%	24,73%	27,34%	63,67%	12,13%
TOPL	17,87%	27,85%	16,81%	49,08%	9,18%
UFPR	10,66%	28,87%	9,73%	49,83%	3,54%

UNBD	2,73%	28,86%	2,73%	47,36%	-4,62%
UNSA	12,02%	37,92%	16,02%	41,65%	3,48%
<b>Média</b>	<b>11,53%</b>	<b>31,53%</b>	<b>12,19%</b>	<b>44,19%</b>	<b>3,17%</b>

A Figura 30 apresenta a visualização comparativa da RMS3D média obtida para os dois meses analisados. Nota-se resultados maiores no mês de outubro em quase todas as estações analisadas no experimento, sendo a única exceção a estação PALM, localizada no extremo sul do globo. Verifica-se ainda, que os maiores resultados obtidos para o mês de outubro, e conseqüentemente as maiores variações em relação ao mês de junho, são apresentadas nas estações mais próximas ao equador geomagnético, em região equatorial. Em contrapartida, nas estações presentes em regiões de latitudes mais extremas, os resultados da RMS3D de outubro ficaram mais próximos dos valores de junho. Cabe salientar que no mês de junho é verão no hemisfério norte, enquanto é inverno no hemisfério sul. Com isso, a grande amplitude entre os valores obtidos no hemisfério sul para os dois meses pode ser justificada pela menor incidência solar e conseqüentemente baixa atividade ionosférica no mês de junho nesse hemisfério. A RMS3D média obtida para junho foi de 3,04 m, enquanto para outubro foi de 4,67 m.

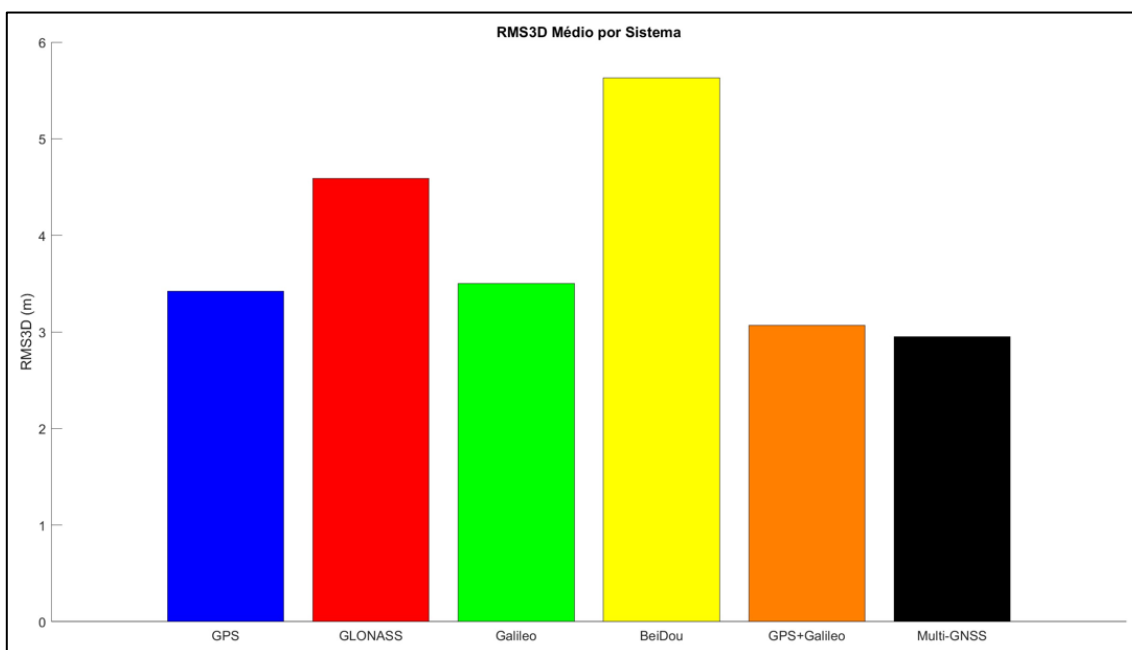
Figura 30 – RMS3D média para as estações selecionadas nos meses de junho e outubro.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 31 é exibida a média da RMS3D em relação aos diferentes sistemas e combinações empregados no experimento. Comparando a RMS3D obtida para os diferentes sistemas, nota-se que as maiores médias foram apresentadas para o sistema BeiDou, com 5,63 m. Já a combinação multi-GNSS, apesar de ter apresentado valores próximos aos da combinação GPS e Galileo, alcançou os melhores resultados, com uma média final de 2,95 m.

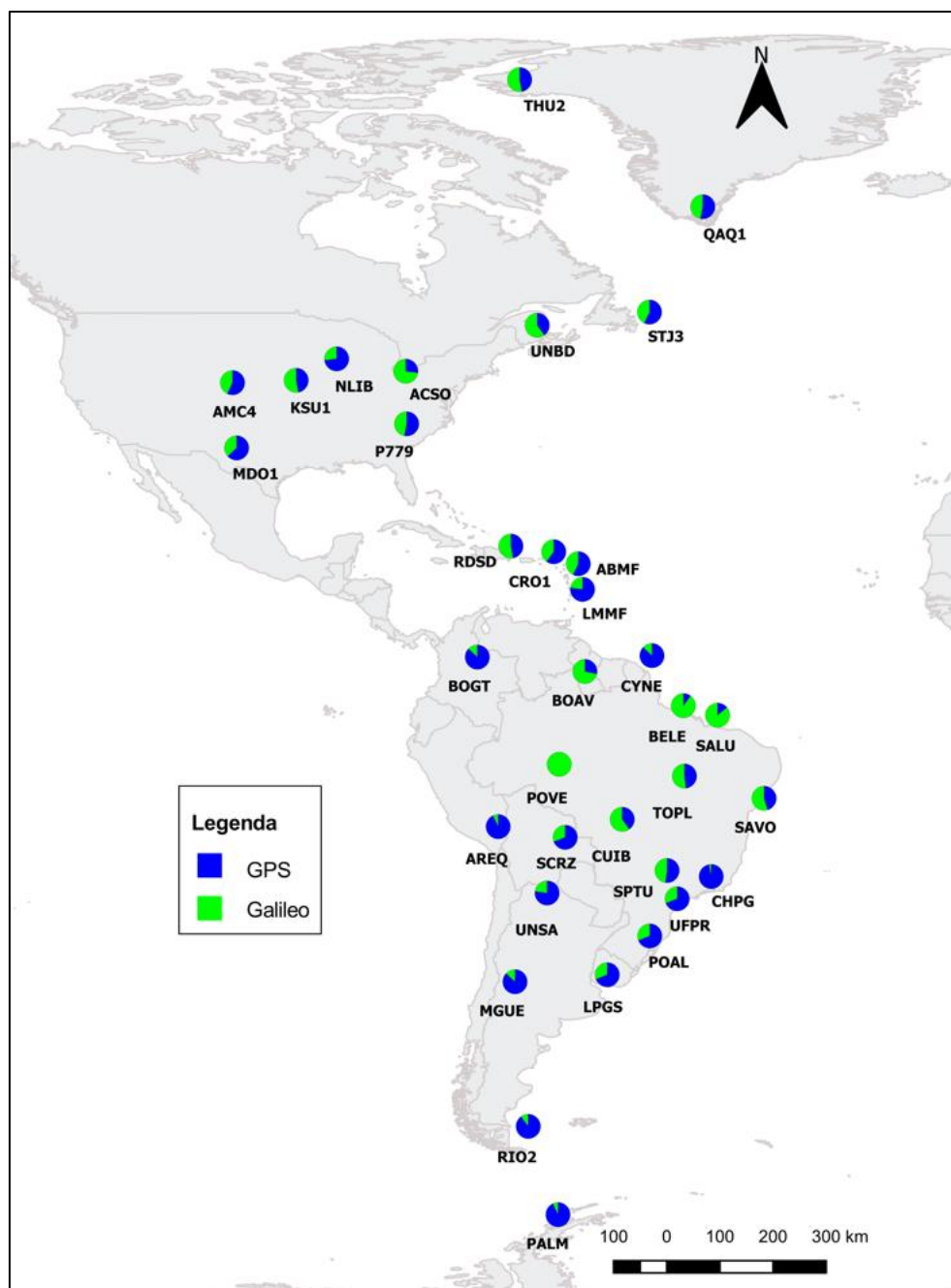
Figura 31 – RMS3D média por sistema.



Fonte: O autor (2023).

Para comparar o desempenho dos sistemas GPS e Galileo no experimento, procedeu-se com a análise dos percentuais de dias em que cada sistema obteve os melhores resultados. Esses resultados estão representados na Figura 32 para o mês de junho. A análise revela que a maioria das estações registrou um percentual mais alto de dias em que o sistema GPS apresentou melhor desempenho. No entanto, uma parcela significativa das estações apresentou um número maior de dias em que o sistema Galileo foi melhor. No total, 22 estações (64,71%) demonstraram um percentual superior de dias favoráveis ao GPS, enquanto outras 12 estações (35,29%) apresentaram uma prevalência de dias mais vantajosos para o sistema Galileo. Em resumo, no mês de junho, em média, 58,20% dos dias proporcionaram melhores resultados com o sistema GPS, enquanto os restantes 41,80% foram mais favoráveis ao Galileo.

Figura 32 – Percentual de dias melhores GPS e Galileo em junho.

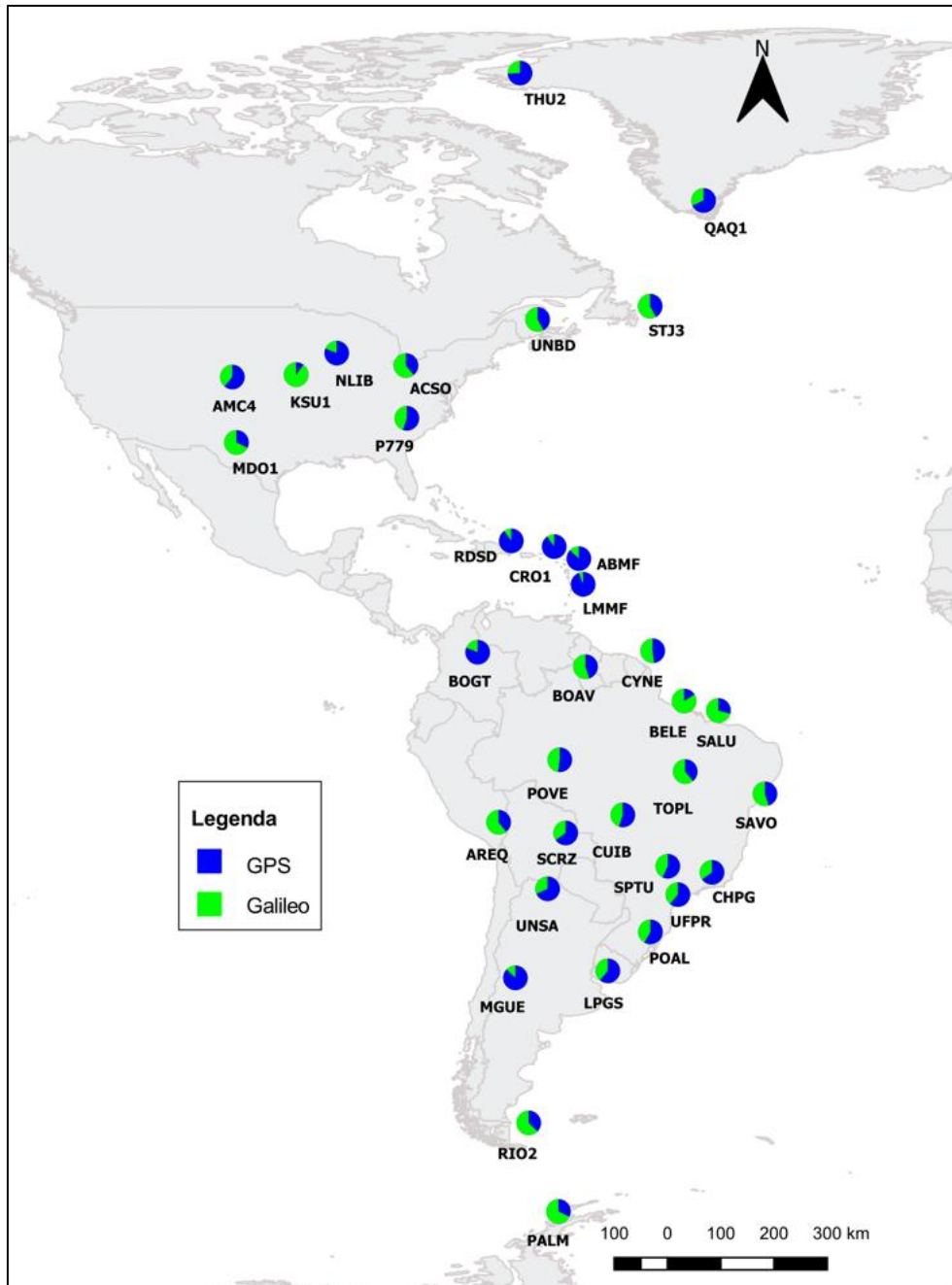


Fonte: O autor (2023).

Os percentuais obtidos para o mês de outubro são apresentados na Figura 33, na qual é possível observar que a maioria das estações manteve percentuais de desempenho semelhantes aos registrados no mês de junho. No entanto, um número significativo de estações apresentou variações notáveis nessas porcentagens, chegando até a alterar o sistema que obteve a maior parcela de dias com melhor desempenho em algumas delas. O número de estações com uma maioria de dias mais favoráveis ao sistema GPS diminuiu para 20 estações (58,82%), enquanto o número de estações com uma maioria de dias mais

vantajosos para o Galileo aumentou para 14 estações (41,18%). Em média, 55,97% dos dias apresentaram um melhor desempenho com o sistema norte-americano GPS, enquanto 44,03% apresentaram melhores resultados com o sistema Galileo.

Figura 33 – Percentual de dias melhores GPS e Galileo em outubro.



Fonte: O autor (2023).

### 5.2.2. Considerações

No segundo experimento, as análises referentes ao desempenho do Posicionamento por Ponto expandiram, com a utilização de 34 estações do IGS, 61 dias de dados e 6 sistemas e combinações de satélites distintas, totalizando 12.444 configurações de processamentos.

Foram realizadas análises no que tange ao número de satélites, PDOP, número de épocas perdidas e RMS3D obtidas para as coordenadas estimadas nos processamentos. Cada uma dessas métricas foi verificada de forma individual e posteriormente identificadas as correlações entre os resultados obtidos.

No que diz respeito ao número de satélites obtidos nos processamentos desse experimento, constatou-se que a melhor média foi alcançada pelo sistema GPS, enquanto a pior pelo sistema russo, GLONASS. Verificou-se ainda que as maiores médias de satélites foram obtidas para estações localizadas em regiões de alta latitude, mais próximas aos polos. Em contrapartida, a pior média foi adquirida pela estação SCRZ, presente na região equatorial da ionosfera. É relevante notar que os resultados foram semelhantes nos dois meses analisados, indicando que a sazonalidade não influenciou significativamente nesse aspecto.

O PDOP é impactado diretamente pelo número de satélites rastreados, o que se fez evidente nos resultados obtidos, já que o sistema GLONASS, que apresentou a menor média de satélites, obteve os maiores valores de PDOP. Já a combinação multi-GNSS, que utilizou os satélites dos quatro sistemas, obteve os menores valores médios de PDOP. Essa relação também pôde ser verificada nos resultados obtidos para as diferentes estações IGS de interesse, visto que estações com as menores médias de satélites, como foi o caso da SCRZ, apresentaram os maiores valores de PDOP. É importante notar que essa tendência foi consistente nos dois meses analisados, sem divergências significativas entre eles.

Em relação ao número de épocas perdidas nos processamentos, os sistemas GLONASS e BeiDou apresentaram as maiores médias, com alta discrepância em relação aos demais sistemas e combinações analisados. No caso do GLONASS, os altos índices de épocas perdidas se fizeram presentes em todas as estações do experimento, ao passo que para o sistema BeiDou os resultados foram mais heterogêneos. A combinação GPS e Galileo apresentou um número menor de épocas perdidas em relação à combinação multi-GNSS, algo que demonstra que o aumento do número de épocas perdidas foi impactado

com a inclusão dos sistemas GLONASS e BeiDou na combinação. Adicionalmente, a estação SCRZ, que já havia obtido as piores médias de número de satélites e PDOP, apresentou também os resultados mais desfavoráveis em relação à perda de épocas, enquanto as estações THU2 e PALM, localizadas em altitudes extremas, apresentaram os menores índices.

Os resultados obtidos para a métrica RMS3D indicaram, de modo geral, que nos dois meses de análise, o sistema BeiDou apresentou desempenho inferior em comparação com outros sistemas. Destaca-se a combinação dos sistemas GPS e Galileo, que demonstrou resultados altamente promissores ao registrar os menores valores de RMS3D em 19,12% das estações avaliadas. No entanto, os resultados mais notáveis do experimento foram obtidos com a utilização da combinação multi-GNSS, que alcançou uma média final de 3,86 metros. A adoção da combinação multi-GNSS demonstrou ser particularmente vantajosa, resultando em melhorias substanciais no posicionamento, principalmente quando comparada com o sistema BeiDou. Essa abordagem resultou em uma melhoria média de 48,55% em relação a esse sistema, assim como uma melhoria média geral de 23,76%, destacando seu potencial para aprimorar a precisão do posicionamento. Referente aos meses analisados no experimento, como esperado, os piores resultados foram obtidos para outubro, mês que apresenta alta atividade ionosférica. Os valores de outubro foram mais divergentes em relação a junho em estações presentes na região equatorial da ionosfera, a qual sofre maior influência dessa camada. As estações localizadas em regiões de latitudes médias e altas apresentaram valores de RMS3D mais próximos em junho e outubro.

Na comparação entre os resultados obtidos para os sistemas GPS e Galileo, houve um equilíbrio dos percentuais de dias melhores para cada um dos sistemas. Apesar disso, em ambos os meses o sistema norte-americano apresentou uma maior quantidade de dias melhores, com uma média final de 57,08%.

Por fim, analisando de modo geral os dados obtidos através do experimento, constatou-se que os melhores resultados foram alcançados para a combinação multi-GNSS no mês de junho em regiões de altas latitudes.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Diversos foram os avanços nos sistemas GNSS ao longo das décadas, principalmente em relação à utilização conjunta dos sistemas envolvidos. Atualmente se encontram totalmente operacionais e com constelações de satélites completas os sistemas GPS, GLONASS e BeiDou. Além disso, o sistema Galileo já apresenta uma quantidade expressiva de satélites em órbita e está em fase final de implantação, devendo em breve contar com sua constelação completa.

Inicialmente, o presente trabalho buscou realizar uma breve revisão da literatura para estabelecer o contexto do tópico em questão. Foram abordados os principais sistemas que compõem o GNSS, foi traçada a evolução desses sistemas ao longo do tempo e apresentado o panorama atual das constelações de satélites envolvidas.

Adicionalmente, uma análise aprofundada do método de posicionamento por GNSS, com um enfoque mais minucioso no Posicionamento por Ponto, foi realizada, incluindo a descrição das observações, fontes de erro e modelos matemáticos associados a esse método. Ademais, antes da realização dos experimentos, foi realizado um detalhamento acerca do *software* científico em desenvolvimento, sendo apresentada uma visão geral de suas funcionalidades.

Foram conduzidos dois experimentos com o objetivo de analisar os resultados do Posicionamento por Ponto utilizando os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, tanto de forma autônoma quanto em combinação, em estações localizadas em diferentes latitudes e em meses distintos.

A seleção de dias dos meses de junho e outubro, caracterizados por apresentarem, respectivamente, períodos de baixa e alta atividade ionosférica, proporcionou a verificação da influência dos efeitos da ionosfera na obtenção das coordenadas de interesse. Já a distribuição das estações selecionadas ao longo das Américas do Sul, Central e do Norte, assim como da Antártida, possibilitou a análise da variação dos resultados com base na localidade das estações, evidenciando resultados semelhantes em latitudes próximas.

Os diferentes sistemas e combinações de sistemas utilizados no experimento demonstraram a eficiência de cada um desses na obtenção do posicionamento, possibilitando a verificação de fatores que impactaram diretamente nos resultados, como o número de satélites disponíveis, qualidade da geometria (PDOP) e qualidade das observações.

O primeiro experimento teve como objetivo proporcionar uma análise preliminar e individualizada de duas estações do IGS, localizadas em hemisférios opostos, em dois dias dos meses de junho e outubro. Em relação aos resultados apresentados no primeiro experimento, foi possível verificar os melhores valores para a combinação multi-GNSS, que proporcionou em média uma melhoria de 32,5% referente aos sistemas autônomos e de 3,1% sobre a combinação GPS e Galileo. Em contrapartida, o sistema BeiDou obteve as piores médias de PDOP, os maiores valores de discrepância, desvio padrão e RMS3D, além da segunda pior média de satélites. Referente aos dias utilizados, o dia 01 de junho exibiu os menores índices de TEC, que contribuíram para a obtenção dos melhores valores de posicionamento.

O segundo experimento expandiu as análises realizadas no primeiro, com o aumento do número de estações e períodos de dados. Esse grande volume de resultados adquiridos proporcionou análises mais precisas do comportamento posicional das estações analisadas, permitindo correlacionar as diferentes métricas envolvidas. Como no primeiro experimento, os melhores resultados foram obtidos para a combinação multi-GNSS, que obteve uma RMS3D final de 3,86 m e proporcionou uma melhoria média de 23,76% em relação aos demais sistemas. A combinação GPS e Galileo apresentou resultados bastante promissores, sendo mais efetiva que a combinação multi-GNSS em 19,12% das estações selecionadas. Nos processamentos autônomos, os melhores resultados foram obtidos para o sistema GPS, que apresentou em média 57,08% dias melhores que o Galileo. Já os piores resultados do experimento foram obtidos para os sistemas BeiDou e GLONASS.

Considerando o período dos dados e localização das estações, o mês de outubro apresentou os piores valores, principalmente nas estações presentes na região equatorial da ionosfera, evidenciando o impacto dessa camada na obtenção da posição.

De forma geral, os melhores resultados, considerando os dois experimentos, foram obtidos para o mês de junho nas estações presentes em regiões de alta latitude e com a utilização da combinação multi-GNSS.

Assim, com o trabalho realizado, foi possível evidenciar as vantagens da utilização de dados combinados no Posicionamento por Ponto, proporcionando uma maior quantidade de observações e conseqüentemente melhorias significativas na obtenção da posição. Além disso, fatores como a localização da estação e época do ano podem afetar os valores obtidos, muito por conta da influência da atividade ionosférica envolvida.

Como recomendação para trabalhos futuros podem ser realizados estudos semelhantes com a adição da observável fase da onda portadora, no Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), com períodos distintos de dados, de modo a analisar a convergência da posição nesse método de posicionamento. Adicionalmente, pode ser analisada também a performance da combinação *ion-free*, em comparação com outros métodos de atenuação e correção dos efeitos da ionosfera, como por exemplo o Klobuchar, que foi utilizado nessa pesquisa. Com o lançamento dos satélites do bloco de satélites GLONASS-K2 e dos novos satélites da constelação Galileo, novas análises da performance desses sistemas também podem ser realizadas no futuro. Recomenda-se ainda a utilização de um número maior de estações, de modo a verificar o comportamento dos diferentes sistemas GNSS a nível global.

## REFERÊNCIAS

BEIDOU. BDS. 2015. Disponível em: <<http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/2012121481ba700d7ca84dfc9ab2ab9ff33d2772.html>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

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](http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202006/t20200623_20692.html)>. Acesso em: 26 jan. 2021.

BORRE, K.; AKOS, D. M; BERTELSEN, N.; RINDER, P.; JENSEN, S. H. **A software defined GPS and Galileo receiver**. 1.ed. Boston: Birkhäuser, 2007.

CAI, C.; GAO, Y.; PAN, L. Z.; ZHU, J. J. Precise Point Positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. **Advances in Space Researches**, 2015.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

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

DACH, R.; MONTENBRUCK, O.; PRANGE, L. Status of the IGS-MGEX project. In: **Proceedings of EUREF 2014 symposium**, Vilnius, Lithuania, 3–7 June, 2014.

DUONG, V., HARIMA, K., CHOY, S. et al. An optimal linear combination model to accelerate PPP convergence using multi-frequency multi-GNSS measurements. **GPS Solutions** **23**, 49 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0842-2>.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **Birth of the European Satellite Navigation Constellation: Galileo in-orbit validation**. 2011. Disponível em: <[http://download.esa.int/docs/Galileo\\_IOV\\_Launch/BR-297\\_Galileo\\_web.pdf](http://download.esa.int/docs/Galileo_IOV_Launch/BR-297_Galileo_web.pdf)>. 26 jan. 2021.

**EUSPA – EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE SPACE PROGRAMME.**

Disponível em <<https://www.euspa.europa.eu/galileo-launch-11>>. Acesso em: 15 set. 2023.

FALCONE, M.; HAHN, J.; BURGER, T. **Galileo**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

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

FSA - FEDERAL SPACE AGENCY - INFORMATION ANALYTICAL CENTRE. **Constellation status**. Disponível em: <<http://glonass-iac.ru/en/>>. Acesso em: 15 set. 2023.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

GOUVEIA, T. A. F. **Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

**GPS World**. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/sanctions-delay-russias-glonass-k2-program/>>. Acesso em: 25 jan. 2021a.

**GPS World**. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/russia-launches-glonass-k2-no-13/>>. Acesso em: 15 set. 2023.

**GPS World**. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/4-satellites-officially-join-galileo-constellation/>>. Acesso em: 25 jan. 2021b.

GSC – EUROPEAN GNSS SERVICE CENTRE. Constellation Information. Disponível em <<https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

HEGARTY, C. J. **The Global Positioning System (GPS)**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

HOBIGER, T.; JAKOWSKI, N. **Atmospheric Signal Propagation**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**, Spring-Verlag, Wien, Fourth Revised Edition, 389p., 1997.

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

HOPFIELD, H. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research**. 74, 4487–4499, 1969.

HOPFIELD, H. Tropospheric effect on electro-magnetically measured range prediction from surface weather data. *Radio Science* 6, 357–367, 1971.

IBGE. **IBGE-PPP - Serviço online para pós-processamento de dados GNSS**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: ago. 2021.

IGS. **RINEX**. 2021. Disponível em: <<https://www.igs.org/wg/rinex/#documents-formats>>. Acesso em: ago. 2021.

JEKELI, C; MONTENBRUCK, O. **Time and Reference Systems**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

JEREZ, G. O. **Análise da integração GPS/GLONASS para posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica**. 2017. 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C.J. **Understanding GPS, Principles and Applications**. Artech House, 2006. (703).

KAZMIERSKI, K., HADAS, T., SOŚNICA, K., Weighting of multi-GNSS observations in real-time precise point positioning. **Remote Sensing**, 10(1), p.84, 2018.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, 1987, p.325-331.

KOUBA, J., LAHAYE, F., TÉTREAU, P. **Precise Point Positioning**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

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. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

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. **Sci Rep UK**. doi:10.1038/srep08328, 2015.

LI, X., HUANG, J., LI, X. et al. Multi-constellation GNSS PPP instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation. **GPS Solutions** **25**, 107 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01123-0>.

LIU, T., YUAN, Y., ZHANG, B., WANG, N., TAN, B. AND CHEN, Y. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations. **Journal of Geodesy**, 91(3), pp.253-268, 2017.

MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambiguidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de linhas de base curtas**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

MARQUES, H. A. **Influência da ionosfera no posicionamento GPS**: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008

MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.

MARQUES, H. A.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M.; VEETIL, S. V.; MONICO, J. F. G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects. *J. Space Weather Space Clim.* 8: A15, 2018.

MATHIAS, M. V. T. **Posicionamento por Ponto multi-GNSS: processamentos, análises e aplicações**. 2020. Pesquisa de Iniciação Científica. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

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

ODIJK, D. **Positioning Model**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

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.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

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

SEEPERSAD, G.; BISNATH, S. Challenges in assessing PPP performance. *J Appl Geodesy* 8 (3): 205–222, 2014.

SETTI JÚNIOR, P. T. **Posicionamento Por Ponto Multi-GNSS: Análise dos Sistemas, Sinais e Modelos Ionosféricos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SETTI JÚNIOR, P. T.; AQUINO, M.; VEETIL, S. V.; ALVES, D. B. M.; SILVA, C. M. DA. Seasonal analysis of Klobuchar and NeQuick G single-frequency ionospheric models performance in 2018. **Advances in Space Research**, 68 (2021) 4824–4833.

SETTI JÚNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Uso integrado dos sistemas Galileo e GPS: uma análise da acurácia no posicionamento por ponto com correções atmosféricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.

SETTI JÚNIOR, P. DE T.; SILVA, C. M. DA; OLIVEIRA JÚNIOR, P. S. DE; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. Posicionamento multi-GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1200-1224, 30 dez. 2020.

**SPACE**. Disponível em <<https://www.space.com/spacex-launch-european-galileo-navigation-satellites>>. Acesso em: 24 out. 2023.

SOUZA, F. T. L. DE.; ZAUPA, J. P. V.; SILVA, J. L. F. DA.; STAFOCHER, M. A. **Processamento e análise de dados multi-GNSS no Posicionamento por Ponto**. 2022. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. In: **Annals of Geophysics**, vol. 52, n. ¾, p. 417-422, jun./aug. 2009.

REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A.; MONTENBRUCK, O. **GLONASS**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

**Russian Space Web**. Disponível em <<http://www.russianspaceweb.com/glonass-k2.html>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

TEGEDOR, J, OVSTEDAL, O, VIGEN, E. Precise orbit determination and point positioning using GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. **J Geod Sci** 4(1):2081- 9943, 2014.

TEUNISSEN, P. J.; **Quality control in geodetic networks**. In: Optimization and design of geodetic networks, Berlin: Springer-Verlag, 1985.

TEUNISSEN, P. J.: **Quality control and GPS**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBER, A. GPS for Geodesy, 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

WU, Y.B., LIU, Y., YI, W. et al. Impact of elevation mask on multi-GNSS precise point positioning performance. **Earth Sci Inform** **14**, 1111–1120 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00619-0>.

YANG, Y.; TANG, J.; MONTENBRUCK, O. **Chinese Navigation Satellite Systems**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

ZAUPA, J. P. V. Desenvolvimento e avaliação de um modelo estocástico para posicionamento por ponto multi-GNSS: GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. 2020. Pesquisa de Iniciação Científica. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

**DADOS CURRICULARES****João Vitor Espinhosa Vieira**

<b>Nascimento</b>	06/08/1996 – Presidente Prudente, SP
<b>Filiação</b>	Lucilene Aparecida Bomfim Espinhosa
<b>2015 – 2019</b>	Graduação Bacharelado em Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
<b>2020 – 2023</b>	Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP