

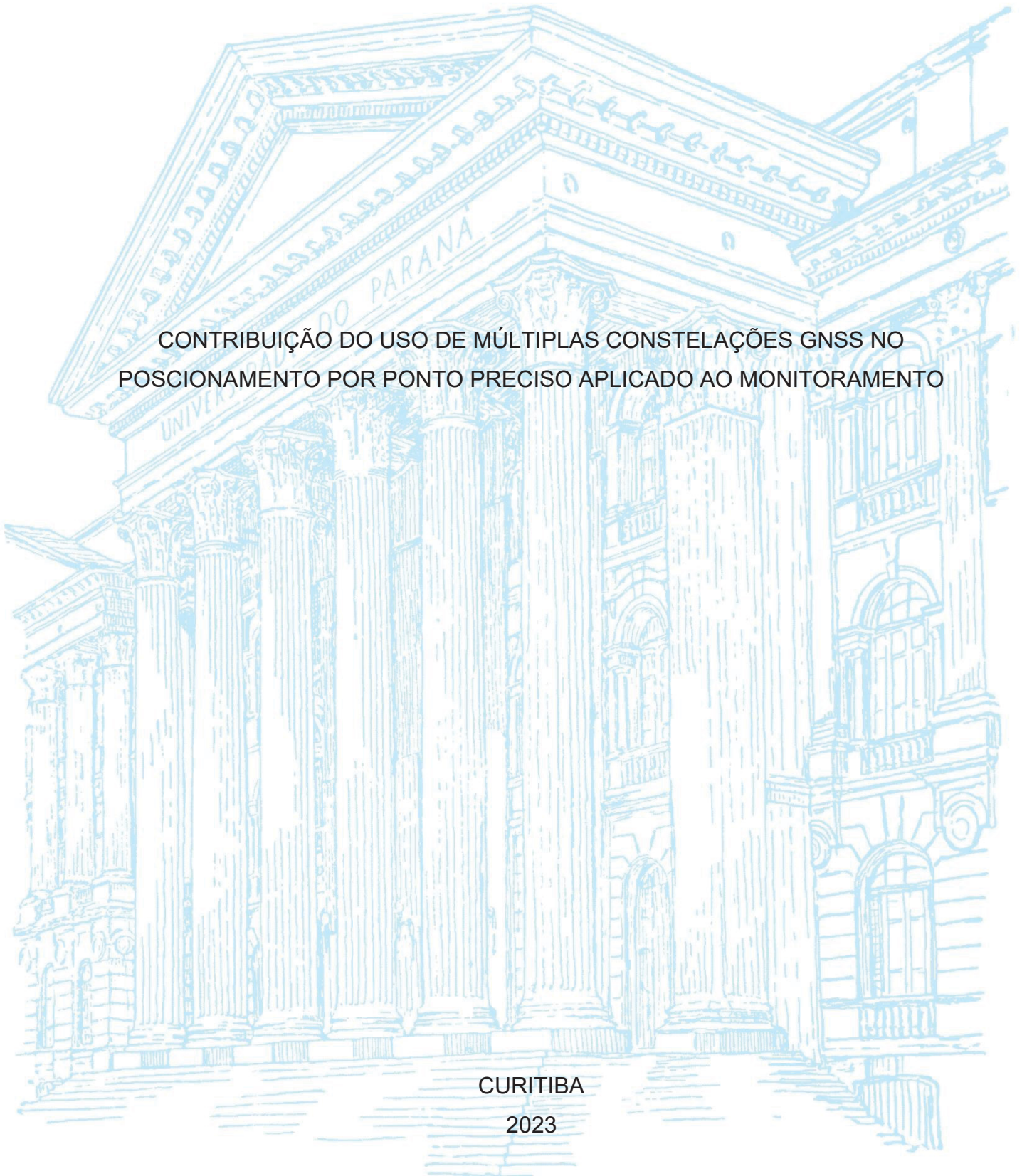
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VÍTOR CORRÊA DE BRITO

CONTRIBUIÇÃO DO USO DE MÚLTIPLAS CONSTELAÇÕES GNSS NO  
POSCIONAMENTO POR PONTO PRECISO APLICADO AO MONITORAMENTO

CURITIBA

2023



VÍTOR CORRÊA DE BRITO

CONTRIBUIÇÃO DO USO DE MÚLTIPLAS CONSTELAÇÕES GNSS NO  
POSCIONAMENTO POR PONTO PRECISO APLICADO AO MONITORAMENTO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Oliveira Junior

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Luís Faggion

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Brito, Vítor Corrêa de

Contribuição do uso de múltiplas constelações GNSS no posicionamento por ponto preciso aplicado ao monitoramento / Vítor Corrêa de Brito. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Paulo Sérgio Oliveira Junior

Coorientador: Pedro Luís Faggion

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Constelações. 3. Engenharia de estruturas - Monitoramento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Oliveira Junior, Paulo Sérgio. IV. Faggion, Pedro Luís. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VÍTOR CORRÊA DE BRITO** intitulada: **CONTRIBUIÇÃO DO USO DE MÚLTIPLAS CONSTELAÇÕES GNSS NO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO APLICADO AO MONITORAMENTO**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica

01/09/2023 09:00:33.0

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/09/2023 13:35:28.0

WAGNER CARRUPT MACHADO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

Assinatura Eletrônica

04/09/2023 14:55:36.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Quero expressar minha imensa gratidão a Deus, pois foi Ele quem me manteve firme na trilha certa durante todo o percurso desta pesquisa.

Agradeço de coração aos meus pais, João e Tania, cujo amor incondicional, caráter exemplar e educação cuidadosa moldaram a pessoa que sou hoje. Suas orientações foram a base que sustentou cada passo desta jornada. A minha irmã, Jéssica, também merece meus agradecimentos.

Iane, minha companheira de vida e melhor amiga, merece um reconhecimento especial. Sua compreensão, paciência e apoio incansável foram como uma brisa suave que aliviou os desafios desta longa caminhada. Agradeço do fundo do coração por ser meu pilar e minha parceira em todas as horas.

As amigas construídas em Curitiba ao longo deste novo ciclo de vida também merecem meu reconhecimento. Obrigado a todos, principalmente Gabriel, Gabriele e André, pelas ricas trocas de ideias e experiências.

Aos meus orientadores, sou profundamente grato. A sabedoria, experiência e orientações valiosas foram fundamentais para o êxito desta empreitada. Agradeço por compartilharem seus conhecimentos e dedicarem tempo e esforço para me guiar.

Não posso deixar de mencionar a Leica Geosystems, pois sua generosidade ao fornecer os equipamentos e softwares que utilizei nesta pesquisa foi essencial para o desenvolvimento do trabalho.

Por último, mas não menos importante, quero estender meu agradecimento à Universidade Federal do Paraná. Em especial, ao corpo docente da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que demonstrou um comprometimento excepcional com a qualidade e excelência do ensino. Foi uma honra fazer parte dessa instituição de ensino tão renomada.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta pesquisa, meu sincero agradecimento. Cada apoio, incentivo e colaboração foram inestimáveis para tornar este projeto uma realidade. Muito obrigado!

## RESUMO

O avanço da eletrônica e a expansão das constelações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) têm impulsionado a utilização cada vez mais frequente do PPP (*Precise Point Positioning*), permitindo algoritmos de posicionamento otimizados para os usuários finais. Esta pesquisa aborda a importância do PPP em projetos de engenharia, com ênfase no monitoramento de estruturas. O monitoramento de estruturas em ambientes urbanos é essencial para assegurar a integridade e a segurança das infraestruturas em áreas densamente povoadas. Com o crescimento urbano e a complexidade das atividades em regiões metropolitanas, o acompanhamento contínuo de estruturas, tais como pontes, edifícios e túneis é relevante para a detecção precoce de potenciais danos, permitindo intervenções. Além de garantir a segurança, o monitoramento contribui para a manutenção adequada das estruturas urbanas em constante evolução. Estudos recentes demonstram os benefícios do posicionamento multi-GNSS com a adição de constelações como Galileo e BDS, alcançando acurácia centimétrica. Dessa forma, esse trabalho busca investigar e quantificar possíveis ganhos na qualidade dos resultados posicionais obtidos com o método PPP em ambientes urbanos, face ao uso de múltiplas constelações GNSS. Com isso pretende-se expandir os horizontes para o emprego do PPP em aplicações de monitoramento geodésico de estruturas nessas regiões. Os resultados obtidos indicam que ainda existem desafios a serem superados para alcançar uma precisão comparável ao posicionamento relativo. No entanto, a análise da performance do PPP em ambiente urbano, com o uso de novas constelações, abre perspectivas promissoras para a automação na detecção de deslocamentos com o método.

Palavras-chave: PPP 1. GNSS 2. Multi-constelações 3.

## **ABSTRACT**

The advancement of electronics and the expansion of GNSS (Global Navigation Satellite System) constellations have driven the increasingly frequent use of PPP (Precise Point Positioning), allowing optimized positioning algorithms for end users. This research addresses the importance of PPP in engineering projects, with emphasis on structural monitoring. Monitoring structures in urban environments is essential to ensure the integrity and safety of infrastructure in densely populated areas. With urban growth and the complexity of activities in metropolitan regions, the continuous monitoring of structures such as bridges, buildings and tunnels is relevant for the early detection of potential damage, allowing interventions. In addition to ensuring safety, monitoring contributes to the proper maintenance of constantly evolving urban structures. Recent studies demonstrate the benefits of multi-GNSS positioning with the addition of constellations such as Galileo and BDS, achieving centimeter accuracy. Thus, this work seeks to investigate and quantify possible gains in the quality of positional results obtained with the PPP method in urban environments, compared to the use of multiple GNSS constellations. With this, it is intended to expand the horizons for the use of PPP in applications of geodetic monitoring of structures in these regions. The results obtained indicate that there are still challenges to be overcome to achieve an accuracy comparable to relative positioning. However, the analysis of PPP performance in an urban environment, with the use of new constellations, opens promising perspectives for automation in the detection of displacements with the method.

Keywords : PPP 1. GNSS 2. Multi-constellations 3.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO POR GNSS.....	21
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE POSICIONAMENTO.....	24
FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DA FASE DA ONDA PORTADORA.....	26
FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DO ERRO DA ÓRBITA DO SATÉLITE.....	28
FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DO ERRO DE MULTICAMINHO.....	29
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE POSICIONAMENTO.....	34
FIGURA 7 – SISTEMA GEODÉSICO LOCAL E SISTEMA GEOCÊNTRICO .....	40
FIGURA 8 – ETAPAS DA PESQUISA .....	43
FIGURA 9 – GNSS GS18.....	44
FIGURA 10 – POSIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS.....	46
FIGURA 11 – CALIBRAÇÃO DO MODELO IMPRESSO .....	47
FIGURA 12 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO.....	48
FIGURA 13 – PONTO DESLOCADO 1 CM DA ORIGEM.....	49
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DAS ANTENAS GNSS .....	51
FIGURA 15 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS DE OBSERVAÇÃO .....	57
FIGURA 16 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS PRECISOS.....	58
FIGURA 17 – DEFINIÇÃO DO DIRETÓRIO .....	58
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO REALIZADO PARA CADA DIA DE RASTREIO.....	60

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GPS.....	22
QUADRO 2 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GLONASS .....	22
QUADRO 3 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GALILEO .....	23
QUADRO 4 – FONTES E ERROS ENVOLVIDOS NO GNSS .....	27
QUADRO 5 – PRIMEIRO DIA DE RASTREIO .....	49
QUADRO 6 – SEGUNDO DIA DE RASTREIO .....	50
QUADRO 7 – TERCEIRO DIA DE RASTREIO .....	50
QUADRO 8 – QUARTO DIA DE RASTREIO .....	50
QUADRO 9 – QUINTO DIA DE RASTREIO.....	50
QUADRO 10 – PARAMETROS DE CONFIGURAÇÃO DE PROCESSAMENTO PPP ESTÁTICO .....	55
QUADRO 11 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO (MULTI-GNSS) ...	69
QUADRO 12 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO (GPS+GALILEO) 69	69
QUADRO 13 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO EM 2D (MULTI-GNSS) .....	70
QUADRO 14 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO EM 2D (GPS+GALILEO) .....	70
QUADRO 15 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ (MULTI-GNSS) .....	70
QUADRO 16 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ (GPS+GALILEO) ....	71
QUADRO 17 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ EM 2D (MULTI-GNSS) .....	71
QUADRO 18 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ EM 2D (MULTI-GNSS) .....	71
QUADRO 19 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DIFERENÇA DE ALTURA PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO .....	72
QUADRO 20 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DIFERENÇA DE ALTURA PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ.....	72

QUADRO 21 – RESULTADO DO TESTE T STUDENT PARA AS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES NO BASTÃO .....	73
QUADRO 22 – RESULTADO DO TESTE T STUDENT PARA AS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES NO TRIPÉ .....	73

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMBINAÇÕES LINEARES DAS PORTADORAS.....	31
TABELA 2 – RESULTADOS DAS COORDENADAS CARTESIANAS GEODÉSICAS PROCESSADAS E ARMAZENADAS DO DIA 1 .....	59
TABELA 3 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 1 .....	63
TABELA 4 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 2 .....	64
TABELA 5 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 3 .....	64
TABELA 6 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 4 .....	66
TABELA 7 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 5 .....	66
TABELA 8 – DADOS ARMAZENADOS DAS RESULTANTES 2D CALCULADAS...	67
TABELA 9 – RESULTADOS ARMAZENADOS DAS DIFERENÇAS DE ALTITUDES (H) .....	68
TABELA 10 – MÉDIAS DAS RESULTANTES 2D PARA CADA COMBINAÇÃO GNSS .....	68
TABELA 11 – MÉDIAS DAS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES (H) PARA CADA COMBINAÇÃO GNSS .....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

BDS	- <i>BeiDouSatellite System</i>
CSRS-PPP	- <i>Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning</i>
DGPS	- <i>Differential Global Positioning System</i>
DoD	- <i>Department of Defense</i>
EMQ	- <i>Erro Médio Quadrático</i>
EU	- <i>European Union</i>
FDE	- <i>Fault Detection and Exclusion</i>
GLONASS	- <i>Global'navaNavigatsionnavaSputnikovava Sistema</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
IBGE	- <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IGS	- <i>International GNSS Service</i>
ITRF	- <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
MGEX	- <i>Multi-GNSS Experiment</i>
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NRCan	- <i>Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada</i>
PCO	- <i>Phase Center Offset</i>
PCV	- <i>Phase Center Variation</i>
PPP	- <i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
QZSS	- <i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAIM	- <i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RBMC	- <i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
RINEX	- <i>Receiver Independent Exchange</i>
RTK	- <i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	- <i>Satellite Based Augmentation System</i>
SIRGAS	- <i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SSR	- <i>State Space Representation</i>
USA	- <i>United States of America</i>
VEMOS	- <i>Velocity Model for SIRGAS</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo geral .....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS .....	19
2.1.1 Monitoramento Geodésico .....	20
2.2 INTRODUÇÃO AO GNSS .....	21
2.3 PRINCÍPIOS DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITE .....	23
2.4 AS OBSERVÁVEIS GNSS .....	24
2.4.1 Pseudodistância .....	24
2.4.2 Fase da Onda Portadora .....	25
2.5 ERROS NAS OBSERVÁVEIS .....	26
2.6 COMBINAÇÕES ENTRE AS OBSERVÁVEIS GNSS .....	30
2.6.1 Combinações envolvendo as medidas da fase da onda portadora .....	30
2.6.2 Combinações envolvendo as medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora.....	32
2.7 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO.....	33
2.8 POSICIONAMENTO ABSOLUTO .....	34
2.8.1 Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP).....	35
2.9 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS .....	39
2.10 TESTES ESTATÍSTICOS.....	41
2.10.1 Teste T .....	41
2.10.1.1 Teste T de Student Pareado.....	41
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
3.1 INSTRUMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS.....	43
3.1.1 Receptor GNSS.....	43
3.1.2 Software .....	44
3.2 EXPERIMENTO .....	45
3.2.1 Controle de movimentação.....	46
3.2.2 Rastreamento dos pontos.....	47

3.2.3 Processamento dos dados .....	52
3.2.3.1 Conversão dos dados brutos para o formato RINEX.....	52
3.2.3.2 Obtenção dos dados precisos para o processamento .....	53
3.2.3.3 Definição dos parâmetros de processamento .....	54
3.2.3.4 Execução do processamento .....	56
3.2.3.5 Transformação das coordenadas .....	60
3.2.3.6 Teste estatístico.....	61
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
4.1 CÁLCULO DAS RESULTANTES .....	63
4.2 APLICAÇÃO DO TESTE ESTATÍSTICO.....	68
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE 1 – DADOS ARMAZENADOS DOS PROCESSAMENTOS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O posicionamento por satélites por meio da tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) é importante nos projetos de engenharia, voltados para a determinação de coordenadas de pontos sobre as feições de interesse. Nos últimos anos com a evolução da eletrônica e a era dos satélites artificiais, o GNSS vem sendo utilizado com maior frequência, uma vez que estão disponíveis maiores números de satélites e constelações. Tais fatores permitem aos algoritmos de posicionamento GNSS obterem coordenadas mais precisas para o usuário final. Dentre as constelações GNSS disponíveis destacam-se o GPS (*Global Positioning System*), o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o Galileo e o BDS (*BeiDouSatellite System*). Tais constelações são desenvolvidas e gerenciadas, respectivamente, pelos USA (*United States of America*), Russia, EU (*European Union*) e China (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

Dentre os principais métodos de posicionamento pelo GNSS, pode-se assumir a seguinte subdivisão: métodos de posicionamento absoluto e métodos de posicionamento relativo (diferencial). Existem também outros métodos resultantes de combinações das duas vertentes (absoluto e relativo), e em especial para aplicações em tempo real, têm forte destaque os métodos baseados em soluções de redes de estações de referência (*network based positioning*) (OLIVEIRA JR, 2017; WÜBBENA; SCHMITZ; BAGGE, 2005). De forma geral, para o usuário, nos métodos absolutos, empregando-se apenas um receptor GNSS, é possível determinar a posição da antena do receptor. Por outro lado, nos métodos relativos, existe a necessidade de no mínimo 2 ou mais receptores GNSS coletando informações simultaneamente para estabelecer a posição da antena do receptor do usuário (MONICO, 2008).

Uma das aplicações do posicionamento pelo GNSS é o monitoramento de estruturas naturais e artificiais, sobretudo para fins de prevenção de desastres que possam causar perdas financeiras, ambientais e humanas. Nesse caso, o posicionamento pelo GNSS é empregado para determinação de parâmetros de movimentações que permitem caracterizar os deslocamentos de uma malha de pontos (rede), muitos dos quais situados na própria estrutura a ser monitorada. Dessa forma, usualmente almeja-se precisão de qualidade melhor que o nível centimétrico (CALDAS; CHAVES, 2015; CHAVES; SEGANTINE, 2014; OLIVEIRA JR, 2015).

De forma geral, o posicionamento relativo é mais aplicado em trabalhos de monitoramento, entretanto um dos métodos de posicionamento absoluto, o chamado PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), permite que as coletas realizadas com apenas um receptor GNSS obtenham bons resultados (acurácia ao nível centimétrico) após o pós-processamento dos dados obtidos (IBGE, 2021).

Na literatura sobre GNSS, são diversos os trabalhos e eventos direcionados à temática sobre monitoramento de estruturas. Xiao et al. (2019) avaliaram o desempenho do posicionamento relativo com uso das constelações GPS e BDS, aplicado ao monitoramento de grandes reservatórios de água na China, e mostraram resultados com repetibilidade da ordem de 1 mm e 2 mm para as componentes horizontais e verticais, respectivamente.

Muitas das estruturas que se almeja monitorar encontram-se em grandes centros urbanos, onde a presença de arranha-céus pode afetar significativamente a disponibilidade de dados GNSS. Isso ocorre devido à forte obstrução e reflexão de sinais eletromagnéticos nesses locais, provocada pelos efeitos de multicaminhamento sobre os sinais GNSS. Pesquisas que buscam resolver tal problema têm evidenciado que o uso de múltiplas constelações GNSS pode trazer melhorias no monitoramento estrutural em centros urbanos, pelo método relativo, usando-se máscaras de elevação da ordem de 40° (KALLOOP et al., 2020).

Estudos recentes buscam evidenciar os ganhos obtidos quando se emprega o posicionamento multi-GNSS, ou seja, o uso de diversas constelações de forma combinada. Nesse sentido, Lin et al. (2021) aplicaram o posicionamento multi-GNSS para o monitoramento de deslizamentos de terra pelo método PPP. Os autores concluíram que a utilização de múltiplos sistemas de navegação por satélite (multi-GNSS) permite que a solução de PPP alcance uma acurácia centimétrica em cerca de 30 minutos de ocupação do ponto rastreado. Após a convergência, a precisão externa alcançada foi da ordem de 5 cm, enquanto a precisão formal (interna) foi de 1 mm. A precisão externa se refere à diferença entre as coordenadas estimadas e as coordenadas verdadeiras do ponto rastreado, enquanto a precisão formal (interna) se refere à variabilidade das estimativas de posição em torno da média. Nesse mesmo trabalho, os autores concluem que o método PPP com multi-GNSS pode atender aos critérios para monitoramento de rápidos deslizamentos de terra.

Song e Zhao (2021) demonstram o potencial de soluções diárias e horárias pelo método de PPP com o uso de múltiplas frequências na região europeia. Nesse

trabalho os autores concentram esforços em avaliar sobretudo a constelação Galileo e apontam que alguns dos desafios que podem degradar a qualidade do posicionamento são os erros do relógio e as combinações das observáveis Galileo (E1/E5a e E1/E5b). Ainda assim os autores concluem que é possível produzir soluções diárias de qualidade milimétrica e soluções horárias de qualidade centimétrica.

Usualmente, quando se busca altos níveis de precisão (mm ou cm) e confiabilidade, o método mais utilizado para o posicionamento GNSS é o relativo. Isso se deve ao potencial do método em fornecer posições com acurácia que pode atingir nível milimétrico com período de ocupação de poucas horas. Alguns trabalhos como de Almeida e Dal Poz (2016), contribuem para demonstrar que na comparação entre os métodos relativos e o absoluto pós-processado com PPP, que o método de maior precisão permanece sendo o método relativo. Porém, nos últimos anos, houve estudos que comprovam a potencialidade da aplicação do método PPP, devido à otimização dos processos de Engenharia, bem como aos avanços tecnológicos que refinaram os modelos de correção dos erros orbitais e de propagação de sinal.

No Brasil, vários estudos buscaram alternativas para uso do PPP, tais como Collischonn e Matsuoka (2016) que apresentam uma metodologia para o desenvolvimento de rede utilizando dados GNSS processados pelo método PPP. Nesse estudo foram empregadas estações pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), apresentando como vantagem a possibilidade da aplicação de controle de qualidade a partir dos resultados do ajustamento. Além disso, outras pesquisas visando comparar os resultados do PPP e do posicionamento relativo, para fins de monitoramento indicam que ambos os métodos apresentam resultados de acurácia no nível centimétrico, para a identificação de deslocamentos (ZANETTI; VEIGA; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020). Contudo, nesses mesmos estudos, os autores ressaltam a necessidade de maior cuidado com análise dos resultados provenientes do PPP. Isso ocorre, pois se trata de um método no qual todos os erros devem ser apropriadamente modelados e concluem que o posicionamento relativo ainda se apresenta como uma solução mais prática e com maior segurança para o monitoramento de estruturas pelo GNSS.

Observando-se os estudos citados anteriormente, na literatura nacional e internacional, é possível identificar a necessidade de mais pesquisas que evidenciem os limites do método PPP para fins de monitoramento de estruturas, trazendo maior

segurança para sua aplicação. Tais estudos são ainda mais importantes, se considerarmos as modernizações cada vez mais frequentes na tecnologia GNSS, com a incorporação de novas constelações e novos sinais. Portanto, essa pesquisa de mestrado busca investigar e quantificar possíveis ganhos na precisão com o método PPP. Em especial, avaliar as melhorias face ao uso das constelações GNSS Galileo e BDS.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Devido a otimização dos processos de Engenharia e aos avanços tecnológicos, a utilização do PPP em demandas de alta precisão se torna pertinente. Alguns trabalhos como de Almeida e Dal Poz (2016) e Zanetti (2018), realizaram a comparação entre os métodos relativo e o absoluto (PPP), ambos no modo pós-processado, e demonstraram que o método de maior precisão continua sendo o método relativo. No entanto, acrescentar novas observáveis, bem como outras constelações GNSS ao processamento de dados pode fazer o desempenho do método PPP melhorar e atingir nível comparável ao produzido pelo método relativo. Dessa forma, esse trabalho pode expandir os horizontes para o emprego do PPP em aplicações de monitoramento geodésico no Brasil, considerando-se a cobertura e disponibilidade de sinais GNSS na região brasileira.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho do posicionamento GNSS com o método PPP para aplicações no monitoramento de estruturas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliação da aplicação do método PPP para aplicações de monitoramento estrutural em ambiente urbano controlado;

- b) Análise dos resultados obtidos com uso de diferentes composições das constelações GNSS disponíveis na região brasileira, bem como o uso múltiplas constelações simultaneamente (Multi-GNSS);
- c) Identificar as aplicações de monitoramento que poderiam ser atendidas nas condições pelo método PPP, face ao uso das novas constelações, em especial da constelação Galileo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os principais conceitos envolvidos na elaboração e desenvolvimento do estudo proposto, relacionados ao monitoramento de estruturas, com ênfase no monitoramento geodésico. As características e aplicações de métodos de posicionamento GNSS, bem como os testes estatísticos aplicados para a análise dos resultados.

### 2.1 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

Segundo Fazan (2010), estruturas a serem monitoradas podem ser classificadas como naturais e artificias. As estruturas artificias são aquelas construídas pelo homem, as quais dão origem ou sustentam formas artificias com objetivos estéticos e/ou funcionais. Já as estruturas naturais dão origem ou sustentam formas naturais, apresentando características de suporte a estruturas encontradas na natureza.

O monitoramento de estruturas é o acompanhamento, avaliação e controle das condições e fenômenos ocorridos nas estruturas. Informações quantitativas e qualitativas adquiridas nas metodologias de monitoramento permitem um maior conhecimento da estrutura, objetivando reduzir episódios indesejáveis por meio de mensurações sistemáticas do deslocamento de objetos submetidos a ações de carga, visando a conformidade dos padrões de comportamento estrutural predefinidos (MARTINS, 2020).

Segundo Jerke (2019), o monitoramento de estruturas possibilita mitigar e corrigir eventos por meio de parâmetros advindos de deslocamentos tridimensionais, movimentações de juntas, variações climáticas do meio ao qual o objeto se encontra para prevenção de ruptura ou fissuramento excessivo.

A aplicação de metodologias geodésicas ou topográficas para o monitoramento ocorre há muitas décadas, a empregabilidade de técnicas que se utilizam da tecnologia GNSS para esse fundamento vem se consolidando.

### 2.1.1 Monitoramento Geodésico

Segundo Silva (2012), os métodos geodésicos de monitoramento determinam as variações absolutas de pontos de interesse em relação a uma rede de monitoramento absoluta fora da área de influência do corpo monitorado.

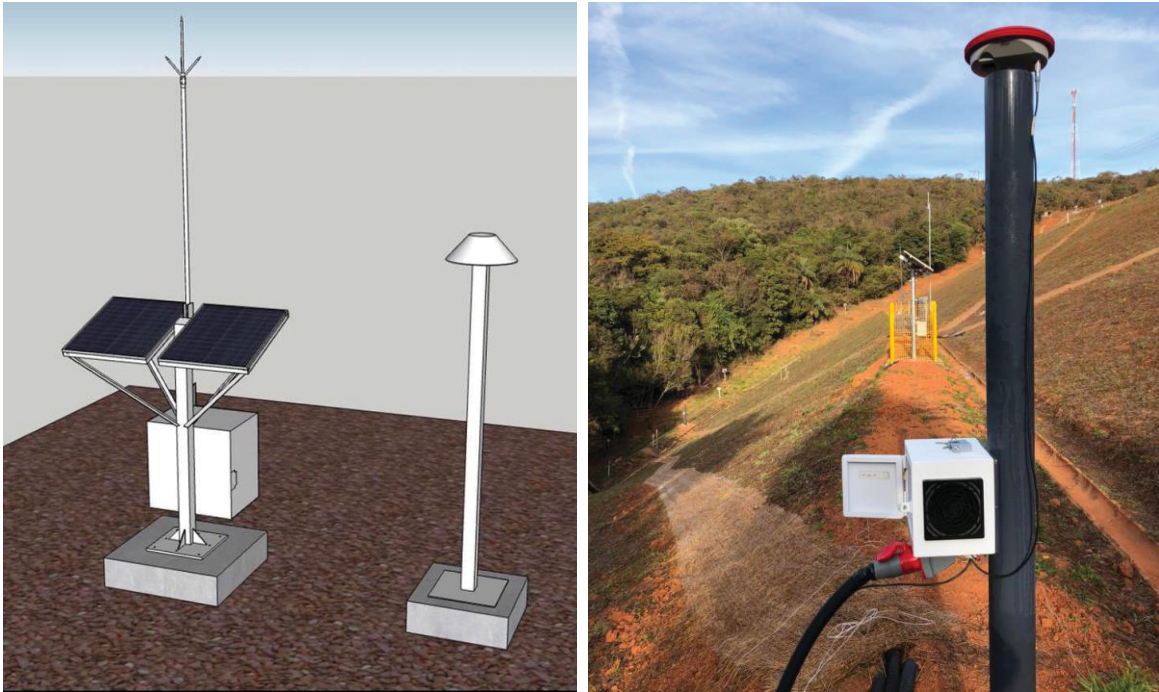
Chaves (2001), destaca como principais vantagens dos métodos geodésicos: o fornecimento do estado global de um corpo deformável, a versatilidade e adequabilidade para qualquer meio-ambiente e situação de operação e a capacidade de avaliar a exatidão de medições globalmente por meio de métodos próprios.

Para Viseu e Almeida (2000), a qualidade da organização dos recursos humanos, o orçamento para realização do levantamento e análise dos resultados em tempo útil está diretamente ligada à eficácia da instrumentação utilizada na mensuração. A especialização dos envolvidos na atividade de execução de monitoramento de estrutura e a automação na aquisição dos dados é destacada pelos autores.

Independentemente do grau, o processo de automação objetiva a influência mínima do operador no instrumento durante a aquisição de informações. Baseando-se nos erros grosseiros e aleatórios por influência humana, deduz-se que a automação melhora a qualidade das observações coletadas. Atualmente, os processos de monitoramento já se automatizaram desde a coleta da informação até a apresentação dos resultados para o usuário final (VEIGA, 2006).

Pode-se observar um exemplo na FIGURA 1, onde é apresentado um projeto virtual e sua implementação em campo, de um sistema de monitoramento contínuo automatizado de barragem composto por: painel lógico com abastecimento fotovoltaico e aparato para descarga atmosférica, pilar de centragem forçada e antena GNSS.

FIGURA 1 – SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO POR GNSS



FONTE: Adaptado de Leica Geosystems (2022).

Na conjuntura atual, o monitoramento por GNSS, em sua maioria, utiliza métodos de rastreamento consolidados na literatura. Tais como os levantamentos pelos métodos relativos estáticos, aplicados principalmente para a avaliação e implantação de redes geodésicas locais ligados a uma rede de ordem superior, como por exemplo a RBMC (MEDEIROS, 2020).

## 2.2 INTRODUÇÃO AO GNSS

O GNSS permite a determinação da posição de dado objeto situado sobre a superfície terrestre por meio das informações de tempo e posição. Tais informações podem ser utilizadas para estabelecer coordenadas tridimensionais de pontos com precisão milimétrica. As características desse sistema são: fornecimento contínuo aos usuários, disponibilidade e integridade.

O termo GNSS originou-se em 1991 e, atualmente, diz respeito aos sistemas de posicionamento globais por satélites GPS controlado pelos EUA, GLONASS de responsabilidade da Federação Russa, BeiDou de posse da China e Galileo que pertence à União Europeia (SEEBER, 2003).

O sistema GPS foi desenvolvido pelo DoD (*Department of Defense*) dos EUA com o propósito de ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. Declarado operacional em 1995 com 24 satélites em sua órbita o GPS já vinha sendo utilizado no posicionamento geodésico desde 1983 (MARQUES, 2011). Em julho de 2023, havia 31 satélites operacionais na constelação (QUADRO 1), sem incluir os sobressalentes desativados em órbita (GPS, 2023).

QUADRO 1 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GPS

Bloco	Satélites Legado		Satélites Modernizados		
	IIA	IIR	IIR-M	IIF	III/IIIF
Satélites operacionais	0	6	7	12	6
Frequência para usuários civis	L1	L1 e L2	L2 (L2C)	L5	L1(L1C)
Lançamento	1990 - 1997	1997 - 2004	2005 - 2009	2010 - 2016	2018 -
Vida útil de projeto (anos)	7,5	7,5	7,5	12	15

FONTE: GPS (2023).

Com sistema semelhante ao GPS, o GLONASS foi criado na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) em 1970, sendo utilizado de forma militar. Declarado operacional em meados de 1996 possuindo 24 satélites em sua constelação (MONICO, 2008). Atualmente tem 25 satélites (QUADRO 2) em sua constelação, sendo 24 em operação e 1 em fase de comissionamento (GLONASS, 2023).

QUADRO 2 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GLONASS

Bloco	GLONASS	GLONASS - M	GLONASS - K	GLONASS - K2
Status	Descomissionado	Em uso	Validação em órbita	Em desenvolvimento
Frequência para usuários civis	L1OF	L2OF e L3OC	L2OC	L3OC
Lançamento	1982 - 2005	2003 - 2016	2011 - 2018	2017 -
Vida útil de projeto (anos)	3,5	7	10	10

FONTE: GLONASS (2023).

Com 35 satélites em órbita transmitindo dados em três frequências, o BDS está em processo de implantação desde 2000. A conclusão da cobertura de satélites é estimada para o ano de 2035 (BDS, 2023).

O Galileo atualmente configurado para oferecer quatro frequências em um serviço de posicionamento global altamente preciso, operável conjuntamente com os sistemas GPS e GLONASS. Tais serviços tiveram início em dezembro de 2016, onde o sistema totalmente implantado prevê 24 satélites operacionais mais seis sobressalentes em órbitas, posicionados em três planos circulares com uma inclinação de 56 graus em relação ao Equador. Atualmente o sistema conta com 28 (QUADRO 3) satélites, sendo 23 deles em uso e 5 não operacionais (ESA, 2023).

QUADRO 3 – GERAÇÕES DE SATÉLITES GALILEO

Bloco	GIOVE	IOV	FOC	G2G
Satélites operacionais	0	3	21	0
Lançamento	2000 - 2008	2011 - 2012	2014 -	2024 -

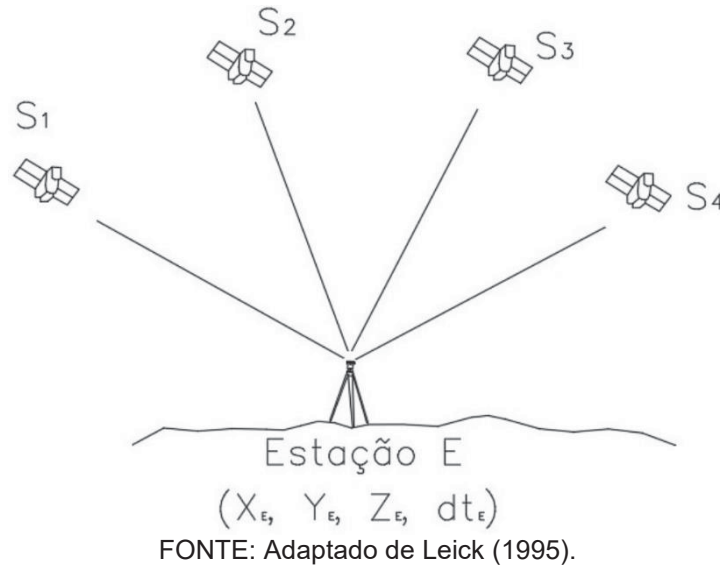
FONTE: ESA (2023).

### 2.3 PRINCÍPIOS DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

O posicionamento por satélite tem como objetivo principal a determinação instantânea da posição, velocidade e tempo de um usuário, independentemente das condições atmosféricas e em qualquer lugar da Terra, com base em medidas de distâncias e referenciado a um sistema global e homogêneo (SEEBER, 2003).

Tais distâncias são denominadas pseudodistâncias, em virtude do não sincronismo dos relógios dos satélites e o do usuário com o tempo GNSS, tal variável apresenta-se como uma incógnita adicional no problema a ser solucionado. Logo, cada equação de pseudodistância apresenta-se com quatro incógnitas, sendo estas a posição tridimensional (X, Y e Z) do ponto e o erro do relógio do receptor. Requerendo que, no mínimo, quatro satélites (FIGURA 2) estejam disponíveis simultaneamente para a realização de medidas dos receptores (MONICO, 2008).

FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE POSICIONAMENTO



Para melhor qualidade posicional dos rastreios faz-se também uso das medidas de fase de batimento da onda portadora, embora haja algumas dificuldades por se tratar de medidas ambíguas, esta permite obter posições com alto nível de acurácia (MONICO, 2008).

## 2.4 AS OBSERVÁVEIS GNSS

### 2.4.1 Pseudodistância

A pseudodistância se trata de uma medida de distância entre um satélite, no instante de transmissão do sinal, e a antena de um receptor GNSS no instante de recepção deste sinal, levando em consideração uma medida de tempo efetuada pelo receptor (MONICO, 2008). A nomenclatura usual desta observável se dá por pseudodistância em decorrência do não sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor (CAMARGO, 1999).

De acordo com Monico (2008), a observável pseudodistância pode ser obtida em decorrência do código P sobre as portadoras  $L_1$  e  $L_2$  e/ou com o código C/A sobre a portadora  $L_1$ . Sendo assim, o modelo funcional da pseudodistância, em metros é dado por:

$$PD_R^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PDr}^S \quad (1)$$

Onde:

- $\rho_r^S$  : distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor no instante de recepção do sinal (m);
- $c$  : velocidade da luz no vácuo (m/s);
- $dt_r$  : erro do relógio do receptor (s);
- $dt^S$  : erro do relógio do satélite (s);
- $I_r^S$  : erro devido à ionosfera (m);
- $T_r^S$  : erro devido à troposfera (m);
- $dm_r^S$  : erro devido ao multicaminho (m); e
- $\varepsilon_{PDr}^S$  : erros sistemáticos e aleatórios não modelados.

De acordo com Pereira (2015) embora seja a observável mais utilizada, sua precisão é da ordem de metros, uma observável mais precisa é a fase da onda portadora, cuja precisão é da ordem centimétrica a milimétrica. O trabalho desenvolvido por Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) encontrou como magnitude aproximada de 3 metros para a precisão da pseudodistância e 3 centímetros para fase da onda portadora.

#### 2.4.2 Fase da Onda Portadora

A fase da onda portadora (FIGURA 3) é uma observável mais precisa que a pseudodistância e básica na maioria das atividades geodésicas. Sua medida da fase de batimento da onda portadora é calculada por meio da diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e sua réplica gerada pelo receptor no instante de recepção do sinal. A fase observada ( $\Phi_r^S$ ) em ciclos, é dada pela seguinte formulação (MONICO, 2008):

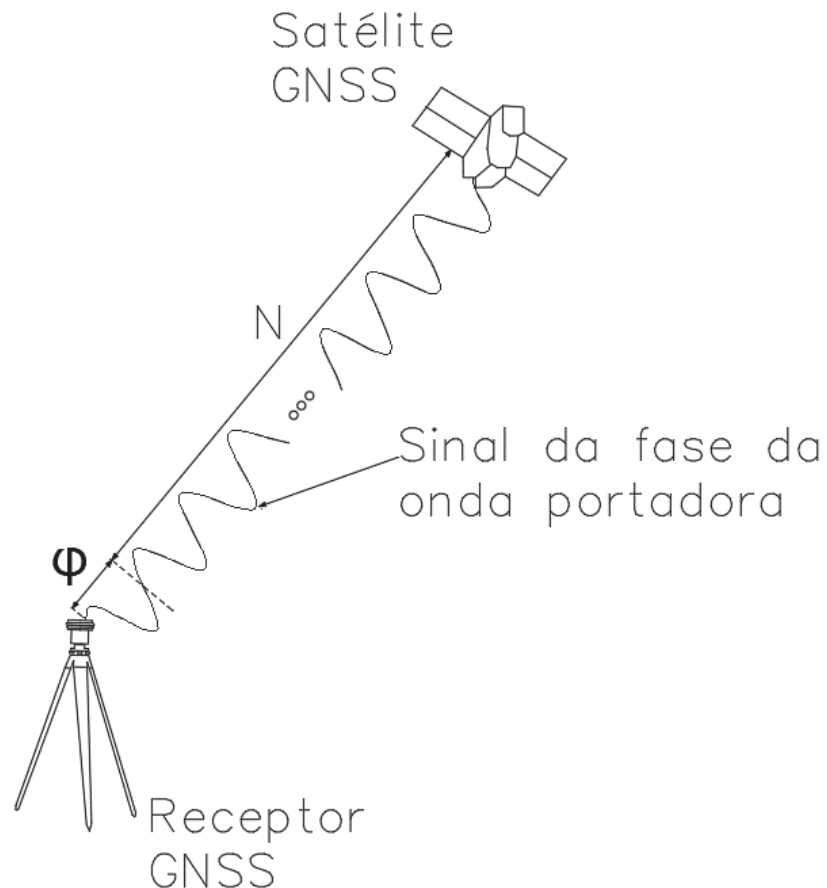
$$\Phi_r^S(t) = \Phi^S(t) - \Phi_r(t) + N_r^S + \varepsilon\Phi_r^S \quad (2)$$

Sendo:

- $\Phi^S$ : diferença entre a fase do sinal do satélite recebido no receptor;

- $\Phi_r$ : réplica do sinal gerado pelo receptor;
- $t_r$ : momento de recepção do sinal;
- $N_r^S$ : ambiguidade de fase; e
- $\varepsilon\Phi_r^S$ : o erro da fase da onda portadora.

FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DA FASE DA ONDA PORTADORA



FONTE: Adaptado de Monico (2008)

O instante da primeira observação entre as antenas do satélite e o receptor, é chamada de ambiguidade. Os receptores determinam a parte fracionária da portadora e realizam a contagem do número de ciclos que chegam no receptor, o que resultam em uma medida contínua (MONICO, 2008).

## 2.5 ERROS NAS OBSERVÁVEIS

As observáveis GNSS estão sujeitas a erros aleatórios, grosseiros e sistemáticos. Os erros aleatórios são considerados inevitáveis uma vez que são uma

propriedade inerente das observações (GEMAEL, 1994). Os erros grosseiros, também conhecidos como outliers, são oriundos de falhas humanas e/ou dos equipamentos empregados e devem ser eliminados por meio do processo de controle de qualidade (TEUNISSEN e KLEUSBERG, 1998). Já os erros sistemáticos são aqueles que tem sua causa conhecida e podem ser parametrizados, isto é, modelados por parâmetros adicionais, ou eliminados por técnicas apropriadas de observação e/ou processamento dos dados (ALVES, 2004).

Os erros sistemáticos (QUADRO 4) podem degradar a confiabilidade e a acurácia do posicionamento por isso é necessário o tratamento de cada um destes erros para obtenção de melhores resultados.

QUADRO 4 – FONTES E ERROS ENVOLVIDOS NO GNSS

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do Polo Carga oceânica Pressão atmosférica

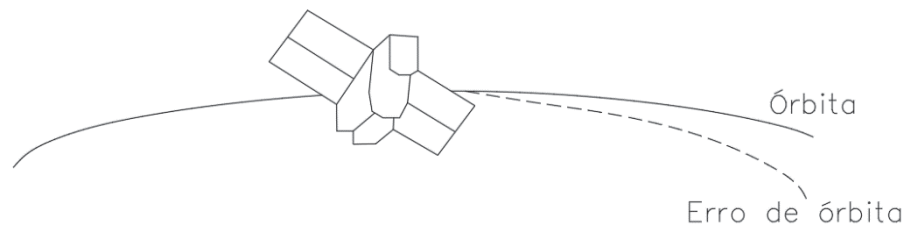
FONTE: Monico (2008).

A seguir são apresentadas breves caracterizações dos erros sistemáticos (MONICO, 2008):

- Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite e do receptor: ocorre pela diferença entre os caminhos percorridos pelas ondas portadoras e pelo hardware do satélite e do receptor.
- Carga oceânica: carga produzida pelas marés oceânicas sobre a crosta terrestre que produz deslocamentos periódicos sobre a superfície.

- Centro de fase da antena do receptor: ocorre, pois, geralmente o centro de fase eletrônico da antena (ponto virtual onde as medidas dos sinais são referenciadas) não coincide com o centro mecânico da antena.
- Centro de fase da antena do satélite: ocorre, devido a diferença entre o centro de fase da antena do satélite (ponto de emissão dos sinais) e o seu centro de massa (ponto de referência para as coordenadas).
- Erro entre os canais: quando o receptor possui mais de um canal, pode ocorrer um erro entre os canais, pois o sinal de cada satélite percorrerá um caminho eletrônico diferente.
- Erro da órbita (FIGURA 4): as coordenadas dos satélites são calculadas por meio das efemérides, as quais são geralmente intuicionadas como fixas durante o ajustamento dos dados, fazendo com que possíveis erros nas coordenadas dos satélites sejam propagados para a posição do usuário.

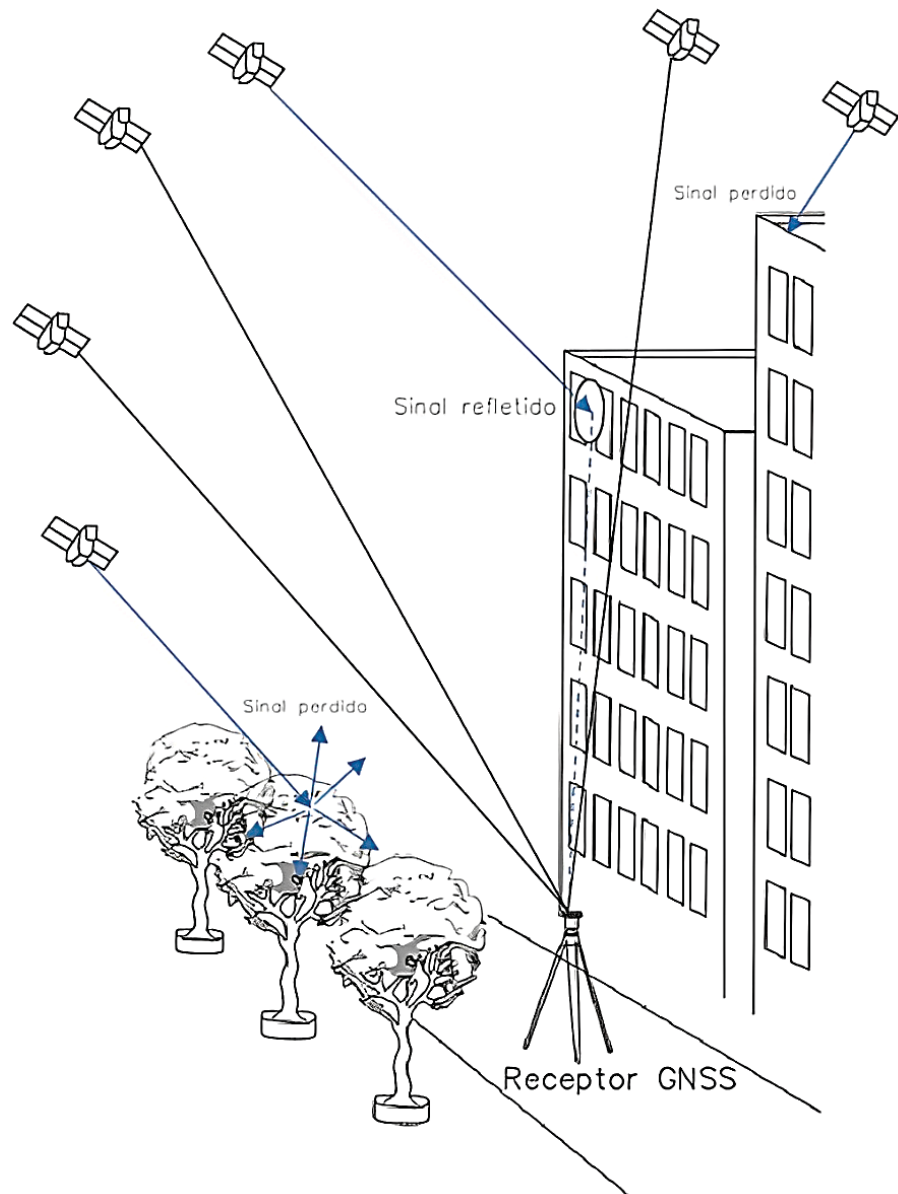
FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DO ERRO DA ÓRBITA DO SATÉLITE



FONTE: O Autor (2023).

- Erro do relógio: cada receptor possui sua própria escala de tempo do sistema em questão, se o relógio do receptor não estiver perfeitamente sincronizado com o relógio do transmissor, pode ocorrer um erro de tempo.
- Fase *wind-up*: ocorre à medida que uma ou duas antenas rotacionam e há um acúmulo na mudança na observação da fase.
- Marés terrestres: deformação da crosta da Terra, em virtude das forças de maré (Sol e Lua).
- Multicaminho ou sinais refletidos (FIGURA 5): são os sinais que atingiram o destino por múltiplos caminhos, sendo estes criados por refrações do sinal ao encontrar obstáculos na área de propagação.

FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DO ERRO DE MULTICAMINHO



FONTE: O Autor (2023).

- Perda de ciclos: pode ocorrer devido a obstrução do sinal de um ou mais satélites, impedindo que este chegue até a antena do receptor, havendo assim, a perda de sinal, acarretando uma perda na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor.
- Pressão Atmosférica: pode induzir deformações sobre a crosta terrestre, sobretudo na direção vertical.

- Refração ionosférica: devido as propriedades de propagação dispersiva da ionosfera, as ondas de rádio na banda L estão sujeitas a um atraso no tempo de propagação e cintilação de fase e de amplitude.
- Refração troposférica: por se tratar de um meio não dispersivo, as componentes úmidas e hidrostáticas (secas) expressam a influência nas medidas.
- Relatividade: seus efeitos não estão restritos aos satélites (órbitas e relógios), mas também a propagação do sinal e aos relógios dos receptores.
- Rotação da Terra: durante a propagação do sinal o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação ao satélite, alterando suas coordenadas.

## 2.6 COMBINAÇÕES ENTRE AS OBSERVÁVEIS GNSS

Visando a redução dos efeitos atmosféricos provocados pela ionosfera, a combinação linear das observáveis GNSS é utilizada. Segundo Monico (2008), para realizar tal artifício pode-se aplicar a seguinte equação, considerando-se as portadoras L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>:

$$CL_i = m_1\phi_1 + m_2\phi_2 \quad (3)$$

Onde:

- $\phi_1$  e  $\phi_2$ : fases da onda portadora;
- $m_1$  e  $m_2$ : coeficientes da combinação linear.
- C: velocidade da luz no vácuo; e
- L<sub>i</sub>: frequência.

### 2.6.1 Combinações envolvendo as medidas da fase da onda portadora

Com base nas explicações de Monico (2008), o desvio padrão de combinações lineares da medida de fase da onda portadora pode ser descrito por:

$$\sigma_{CL} = \left( \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \right) \sigma_{\phi} \quad (4)$$

Onde:

- $\sigma_{\phi}$ : desvio-padrão das observações originais; e
- $m_1$  e  $m_2$ : coeficientes da combinação linear, conforme apresentado na TABELA 1.

TABELA 1 – COMBINAÇÕES LINEARES DAS PORTADORAS

Observável	$m_1$	$m_2$	$\cong \lambda_{CL}$ (cm)	$\cong \sigma_{CL}$ (mm)
$L_0$	$\cong 2,546$	$\cong -1,984$	19,0	9,0
$L_1$	1	0	19,0	3,0
$L_2$	0	1	24,0	3,9
$L_{\Delta}$	1	-1	86,2	19,4
$L_{\Sigma}$	1	1	10,7	2,1

FONTE: Adaptado de Monico (2008)

As observáveis originais  $L_1$  e  $L_2$ , indicam valores de precisão mais comuns no mercado. Uma considerável combinação linear é a livre da ionosfera (*ionospheric free*), denominada como  $L_0$  ou  $L_3$ . Como a portadora  $L_1$  apresenta comprimento de onda similar à banda  $L_0$ , pode-se constatar que os efeitos da ionosfera serão reduzidos consideravelmente (MONICO, 2008).

A portadora  $L_5$  apresenta maior potência, maior largura de banda e características avançadas de sinais. Esta observável foi projetada para atender aos meios de transporte e serviços que exigem alta acurácia no posicionamento (GPS, 2022).

A observável  $L_0$  é a combinação linear empregada em levantamentos geodésicos de alta precisão; e, ao processar essa observável com a  $L_{\Delta}$ , conhecida como banda larga (*widelane*), pode-se detectar perdas de ciclo e erros grosseiros (MONICO, 2008). A observável  $L_{\Sigma}$ , conhecida como banda estreita (*narrowlane*) é a que apresenta o menor ruído entre as combinações, contudo apresenta uma difícil resolução de ambiguidade devido ao seu comprimento de onda (MONICO, 2008).

### 2.6.2 Combinações envolvendo as medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora

Uma combinação prática de observáveis de diferentes tipos é a suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora (SEJAS; KRUEGER, 2007).

Considerando-se que se tenham observações nas duas portadoras para uma época  $t_i$ , as pseudodistâncias tornam-se ciclos, e, dividindo-se pelo comprimento de ondas das portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , chega-se em  $PD_{L_1}^c$  e  $PD_{L_2}^c$ ; podendo-se escrever (MONICO, 2008):

$$PD^c(t_i) = \frac{f_1 PD_1^c(t_i) - f_2 PD_2^c(t_i)}{f_1 + f_2} \quad (5)$$

Onde:

- $PD$ : pseudodistância;
- $t_i$ : época;
- $f_1$  e  $f_2$ : frequência dos satélites; e
- $C$ : velocidade da luz no vácuo.

Para a fase da onda portadora conhecida como *widelane*, tem-se a seguinte equação (MONICO, 2008):

$$L_\Delta = \Phi_\Delta(t_i) = \Phi_1(t_i) - \Phi_2(t_i) \quad (6)$$

Onde:

- $L_\Delta$ : *widelane*;
- $\phi_1$  e  $\phi_2$ : fases da onda portadora; e
- $t_i$ : época.

Em casos em que se têm disponível apenas dados da pseudodistância e da fase da onda na portadora  $L_1$ , para uma determinada época arbitrária  $t_i$ , é dada pelas equações, seguindo a condição inicial  $PD_{L_1}^c(t_1) = PD_C^c(t_1) = PD_S^c(t_1)$  (SEJAS; KRUEGER, 2007):

$$PD_{L1}^c(t_i) = \frac{PD_{L1}(t_i)}{\lambda_{L1}} \quad (7)$$

$$PD_C^c(t_i) = PD_S^c(t_{i-1}) + [\Phi_{L1}(t_{i-1}) - \Phi_{L1}(t_{i-1})] \quad (8)$$

$$PD_S^c(t_i) = \frac{1}{i} + PD_{L1}^c + \frac{i-1}{i} \cdot PD_C^c(t_i) \quad (9)$$

Onde:

- $PD$ : pseudodistância;
- $t_i$ : época;
- $\Phi_{L1}$ : fases da onda portadora; e
- $C$ : velocidade da luz no vácuo.

Outra combinação envolvendo código e fase comumente empregada é a de Melbourne-Wübbena, que além de ser considerada relevante para identificar perdas de ciclo também elimina efeitos da ionosfera, troposfera, relógio e geometria. Sendo dada por (MONICO, 2008):

$$L_{MW} = (\Phi_1 - \Phi_2) - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left( \frac{f_1}{c} PD_1 + \frac{f_2}{c} PD_2 \right) \quad (10)$$

Onde:

- $L_{MW}$ : Melbourne-Wübbena;
- $\phi_1$  e  $\phi_2$ : fases da onda portadora;
- $PD_1$  e  $PD_2$ : pseudodistâncias;
- $f_1$  e  $f_2$ : frequência dos satélites; e
- $C$ : velocidade da luz no vácuo.

## 2.7 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

Os métodos de posicionamento GNSS podem ser executados de maneira absoluta ou relativa. Em função destes aparecem suas derivações como: PPP, Relativo Estático, Relativo Cinemático, Navegação, Posicionamento em Tempo Real,

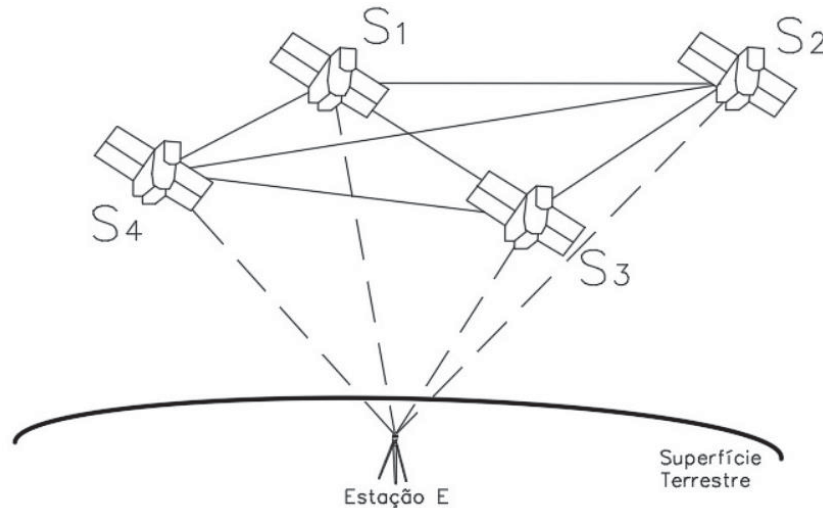
Correções Diferenciais (*Differential Global Positioning System – DGPS*), dentre outros (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

E tais métodos de posicionamento podem ser realizados utilizando as seguintes observáveis: Pseudodistância; Fase da onda portadora; Fase da onda portadora e pseudodistância.

## 2.8 POSICIONAMENTO ABSOLUTO

O posicionamento absoluto (FIGURA 6) fornece coordenadas de um ponto localizado na superfície terrestre em tempo real com o uso de apenas um receptor em relação ao centro de massa da Terra. Tal posicionamento utiliza o código C/A que por sua vez apresenta precisão inferior aos demais métodos de posicionamento (MONICO, 2008; CHUERUBIM, 2009). No entanto, com a utilização do PPP existe a possibilidade de tornar o posicionamento absoluto mais preciso, possibilitando seu uso em aplicações que requerem acurácia centimétrica (FAUSTINO, 2006).

FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE POSICIONAMENTO



FONTE: Adaptado de Leick (1995)

### 2.8.1 Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP)

O posicionamento por ponto preciso é um método para determinação do posicionamento absoluto de um único ponto com medições de código ou fase utilizando orbitas e relógios precisos em vez de efemérides transmitidas (ZUMBERGE et al., 1997).

Segundo Monico e Camargo (2000), a equação de observação empregada nesta metodologia é equivalente à equação do posicionamento absoluto convencional. Logo, as informações advindas deste método também são influenciadas pelos erros inerentes das adversidades atmosféricas, dos erros das coordenadas e das correções dos relógios de cada satélite observado.

Porém, no PPP é possível reduzir os impactos na qualidade posicional causados pela ionosfera por meio da aplicação de combinação linear livre dos efeitos da ionosfera e o efeito da troposfera pode ser estimado ou modelado (BOHM et al., 2011). Os problemas causados pelos erros das coordenadas do satélite podem ser abrandados mediante o uso dos produtos acurados, como por exemplo as efemérides precisas, disponibilizados pelo International GNSS Service (IGS) (HÉROUX; KOUBA, 2001).

As expressões matemáticas para o PPP utilizando observações GPS e levando em consideração as observáveis de pseudodistância e fase da onda portadora, são dadas pelas equações a seguir, sendo a letra G a representação do sistema GPS (CAI, 2009):

$$P_{IF}^G = \rho_G + cdt^G + d_{trop}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \quad (11)$$

$$\varphi_{IF}^G = \rho_G + cdt^G + d_{trop}^G + N_{IF}^G + \varepsilon_{\varphi_{IF}}^G \quad (12)$$

$$\varphi_{IF}^R = \rho_R + cdt^R + d_{trop}^R + N_{IF}^R + \varepsilon_{\varphi_{IF}}^R \quad (13)$$

Onde:

- $P_{IF}^G$ : código obtido da combinação linear *ionfree*;
- $\varphi_{IF}^G$ : fase obtida da combinação linear *ionfree*;

- $\rho_G$ : distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite, no instante de transmissão, e do receptor, no instante de recepção do sinal;
- $c$ : velocidade da luz no vácuo;
- $dt^G$ : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS;
- $d_{trop}^G$ : atraso troposférico;
- $N_{IF}$ : ambiguidade da observável *ionfree*; e
- $\varepsilon_{P_{IF}}^G$  e  $\varepsilon_{\varphi_{IF}}^G$ : representam os efeitos aleatórios, efeitos sistemáticos não modelados e o ruído da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera, para o código e fase respectivamente.

A metodologia PPP originalmente foi desenvolvida para a utilização com receptores de duas frequências. No entanto, este método de posicionamento é altamente genérico e pode ser aplicado para variedades de constelações e sinais de satélites. Posteriormente, ao desenvolvimento do PPP com observações da constelação GPS, o GLONASS integrou as componentes de cálculo para o posicionamento preciso, sendo sua expressão descrita conforme as equações (CAI, 2009):

$$P_{IF}^R = \rho_R + cdt^R + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \quad (14)$$

$$\varphi_{IF}^R = \rho_R + cdt^R + d_{trop}^R + N_{IF}^R + \varepsilon_{\varphi_{IF}}^R \quad (15)$$

Onde:

- $P_{IF}^R$ : código obtido da combinação linear *ionfree*;
- $\varphi_{IF}^R$ : fase obtida da combinação linear *ionfree*;
- $\rho_R$ : distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite, no instante de transmissão, e do receptor, no instante de recepção do sinal;
- $c$ : velocidade da luz no vácuo;
- $dt^R$ : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GLONASS;
- $d_{trop}^R$ : atraso troposférico;
- $N_{IF}$ : ambiguidade da observável *ionfree*; e

- $\varepsilon_{P_{IF}}^R$  e  $\varepsilon_{\varphi_{IF}}^R$ : representam os efeitos aleatórios, efeitos sistemáticos não modelados e o ruído da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera, para o código e fase respectivamente.

A representação do sistema GLONASS, se dá pela letra R, conforme constam nos arquivos RINEX e produtos IGS e MGEX.

Considerando as fórmulas 14 e 15 citadas acima, existem dois erros dos relógios do receptor, relacionados ao sistema de tempo GPS e outro ao sistema de tempo GLONASS. Contudo, o erro do relógio do receptor com o tempo GLONASS pode ser demonstrado pela soma do erro do relógio do receptor com relação ao tempo GPS e a uma diferença entre os dois sistemas de satélites, GLONASS e GPS, de acordo com Cai (2009), dada pela seguinte equação:

$$dt^R = dt^G + cdt_{sis}^{GR} \quad (16)$$

Onde:

- $dt^R$  : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GLONASS;
- $dt^G$  : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS; e
- $cdt_{sis}^{GR}$ : diferença entre os dois sistemas de satélites, GLONASS e GPS.

Reescrevendo as equações 11 a 13:

$$P_{IF}^G = \rho_G + cdt^G + d_{trop}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \quad (17)$$

$$P_{IF}^G = \rho_G + cdt^G + d_{trop}^G + N_{IF}^G + \varepsilon_{P_{IF}}^G \quad (18)$$

$$P_{IF}^R = \rho_R + cdt^G + cdt_{sis}^{GR} + d_{trop}^R + \varepsilon_{P_{IF}}^R \quad (19)$$

$$\varphi_{IF}^R = \rho_R + cdt^G + cdt_{sis}^{GR} + d_{trop}^G + N_{IF}^R + \varepsilon_{\varphi_{IF}}^R \quad (20)$$

Temos:

- $P_{IF}^G$ : código obtido da combinação linear *ionfree* GPS;
- $\varphi_{IF}^G$  : fase obtida da combinação linear *ionfree* GPS;

- $\rho_G$  :distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite, no instante de transmissão, e do receptor, no instante de recepção do sinal GPS;
- $\rho_R$  : distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite, no instante de transmissão, e do receptor, no instante de recepção do sinal GLONASS;
- $c$ : velocidade da luz no vácuo;
- $dt^G$ : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS;
- $d_{trop}^G$ :atraso troposférico;
- $cdt_{sis}^{GR}$ : diferença entre os dois sistemas de satélites, GLONASS e GPS.
- $N_{IF}$ :ambiguidade da observável *ionfree*;
- $\varepsilon_{PIF}^G$  e  $\varepsilon_{\varphi IF}^G$ : representam os efeitos aleatórios, efeitos sistemáticos não modelados e o ruído da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera, para o código e fase respectivamente.

O modelo de observação tradicional para a integração entre as constelações GPS e GLONASS no PPP está descrito nas equações 17, 18, 19 e 20 acima. A diferença de tempo entre as constelações GPS e GLONASS, é representada pela incógnita adicional  $cdt_{sis}^{GR}$ .

Considerando as constelações Galileo e BeiDou, o procedimento é realizado de forma similar. Assim, mais duas incógnitas seriam adicionadas ao modelo matemático, sendo as diferenças de tempo entre GPS e Galileo, e GPS e BeiDou. Importante salientar que o sistema de tempo de referência para as constelações é o sistema de tempo GPS (AFIFI; EL-RABBANY, 2015).

Os efeitos da troposfera, carga oceânica, marés terrestres, carga da atmosfera, movimento do polo, refração ionosférica, perdas de ciclo, multicaminho, relatividade, erros relacionados com centro de fase das antenas dos satélites e do receptor, dentre outros, também devem ser considerados no processamento dos dados por PPP (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Um dos maiores limitantes da acurácia do PPP consiste no erro da troposfera, que passa a ter maior importância comparativamente ao erro da ionosfera, quando a coleta dos dados é realizada com receptores de duas frequências, com os quais eliminamos erros de primeira ordem da ionosfera (DACH; FRIDEZ, 2017). Sendo

assim, realizar a modelagem adequada do efeito da troposfera, bem como a estimativa de seu efeito residual é fundamental, mais informações sobre tal modelagem pode ser encontradas em Braga (2018).

## 2.9 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS

Quando pontos na superfície da Terra são projetados ortogonalmente sobre um plano horizontal tangente a esta superfícies, e quando esses são perpendiculares á vertical do lugar, em topografia constitui-se um sistema astronômico local. Porém, se considerado a normal do ponto referenciada ao elipsoide, denomina-se este sistema como geodésico local (DAL'FORNO, GELSON LAURO ET AL., 2009).

Segundo INCRA (2013) o sistema Geodésico Local é adotado nos trabalhos de georreferenciamento de imóveis rurais, podendo ser aplicados no cálculo de áreas, no uso do método de posicionamento por geometria analítica e em projetos de parcelamento/desmembramento. Já de acordo com Monico (2008) o sistema Geodésico Local pode ser utilizado para obter o azimute e o ângulo vertical, além de analisar em termos de componentes horizontal e vertical, o erro em cada uma das coordenadas X, Y e Z.

A FIGURA 7 ilustra um ponto sobre a superfície terrestre associado ao Sistema Geodésico Local e ao Sistema Geocêntrico.



- X, Y e Z: coordenadas cartesianas geocêntricas no ponto a ser transformado.

## 2.10 TESTES ESTATÍSTICOS

Considerando-se a importância das análises estatísticas comparativas neste trabalho, a seguir são apresentados brevemente alguns conceitos básicos que poderão ser úteis na etapa de validação dos resultados.

### 2.10.1 Teste T

O teste t tem por finalidade realizar comparações paramétricas de duas populações por meio de dados obtidos das amostras de cada uma delas. Para que seja possível testar a equivalência ou igualdade dessas duas populações, é necessário que se estime os parâmetros de cada uma das mesmas, como média e desvio padrão, bem como a forma de distribuição. Tal teste parte da premissa que as populações tenham distribuição normal (BUSSAB; MORETTIN, 2017).

#### 2.10.1.1 Teste T de Student Pareado

Também é possível realizar o estudo no mesmo dado para duas amostras, ou seja, no contexto desta pesquisa, é possível executar um processamento de dados GNSS por um método e depois comparar os resultados deste processamento com o resultado de um segundo método. Assim, se não houver diferenças significativas nas coordenadas finais dos rastreios há indícios de que ambos os processamentos sejam eficientes (BUSSAB; MORETTIN, 2017).

De acordo com Raposo (2016), em tal situação consta no acervo de dados duas amostras  $X_1, X_2, \dots, X_n$  e  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  nas quais as observações  $X_i$  e  $Y_i$  são dependentes, isto é, a amostra é composta por pares  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ . Logo, define-se a variável aleatória (D), que é resultante das diferenças entre os valores de cada par. Verifica-se que esse problema se deduz a uma única população.

O teste t pareado tem como hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \mu_D = 0 \\ H_1: \mu_D \neq 0 \end{cases}$$

E sua estatística pode ser descrita por:

$$T_{\text{pareado}} = \frac{\bar{D}}{S_D/\sqrt{n}} \sim t_{n-1} \quad (22)$$

Onde:

- $\bar{D}$ : é a média aritmética da diferença das duas populações;
- $S_D$ : é o estimador do desvio padrão da variável aleatória; e
- $n$ : o número de observações da amostra.

O valor-p é definido como a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais próxima que aquela observada em uma amostra. O valor-p do teste bilateral é dado por:

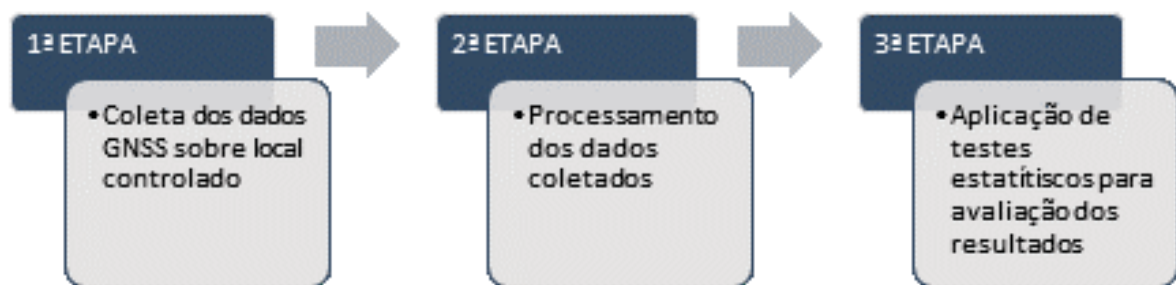
$$\text{valor} - p = 2P[t_{(n-1)} > |T_{\text{pareado}}|] \quad (23)$$

Se o valor-p for menor que o nível de significância estabelecido, a hipótese nula é rejeitada. Caso contrário, não se rejeita  $H_0: \mu_D = 0$ , não sendo possível afirmar que as duas médias sejam diferentes.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as características dos instrumentos e softwares utilizados no trabalho, bem como a metodologia proposta para verificar a empregabilidade do uso do PPP com multi-constelações para o monitoramento de estruturas. Como mostra a FIGURA 8, as atividades desenvolvidas no trabalho estão divididas em 3 etapas principais. Onde a primeira se trata da coleta dos dados GNSS sobre local controlado. Na segunda etapa, foi realizado o processamento dos dados coletados. E por fim, foram aplicados testes estatísticos para avaliação dos resultados.

FIGURA 8 – ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: O autor (2023).

#### 3.1 INSTRUMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

O processo de rastreamento dos pontos foi conduzido por meio do uso do receptor GNSS Leica GS18, um dispositivo especializado em sistemas de posicionamento global por satélite. Posteriormente, os dados coletados durante esse rastreamento foram processados no software RTKlib, uma ferramenta computacional projetada especificamente para esse propósito. Além disso, para realizar a avaliação estatística dos resultados obtidos, utilizou-se a planilha eletrônica do Excel, uma aplicação amplamente utilizada para análise e manipulação de dados numéricos.

##### 3.1.1 Receptor GNSS

As principais características que influenciaram a escolha do equipamento GNSS foram a possibilidade de aquisição de dados GNSS multi-constelações (GPS,

GLONAS, Galileo, BDS) e multi-frequências. Além disso, alcance de alta precisão nominal e tecnologia anti-eletromagnética, também foram características desejáveis no processo de definição do equipamento. Sendo estes, aspectos que possibilitaram considerável redução de alguns dos erros sistemáticos que afetam o posicionamento. Tendo estes atributos em mente, dentre os receptores disponíveis, o equipamento escolhido foi o receptor GNSS GS18, o qual foi cedido gratuitamente pela Leica Geosystems Brasil para a realização do experimento deste trabalho.

O GS18 (FIGURA 9) é um receptor GNSS multi-constelação com as seguintes características técnicas (LEICA GEOSYSTEMS, 2021):

- Precisão nominal (modo estático): até 3 milímetros + 0,1 ppm (partes por milhão), na componente horizontal, e até 3,5 milímetros + 0,4 ppm na componente vertical;
- Capacidade de combinar o uso das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou/BDS; e
- Registro de observáveis nas múltiplas frequências.

FIGURA 9 – GNSS GS18



FONTE: LeicaGeosystems (2021).

### 3.1.2 Software

O software de processamento escolhido foi o RTKLIB. A escolha dessa solução se deve ao fato de o RTKLIB ser uma biblioteca de código aberto para processamento de dados de posicionamento com GNSS. Consiste em uma variedade

de algoritmos e ferramentas para lidar com dados provenientes das múltiplas constelações. Tais características facilitam a flexibilização de quais parâmetros seriam escolhidos para extração de máxima performance da coleta GNSS.

O RTKLIB suporta os seguintes métodos de posicionamento com GNSS para tempo real e pós-processamento:

- Posicionamento Simples;
- DGPS/DGNSS;
- Relativo Cinemático;
- Relativo Estático;
- Linha de Base Móvel;
- Relativo Fixo (solução das coordenadas com injeção absoluta);
- PPP – Cinemático;
- PPP – Estático; e
- PPP – Fixo;(solução das coordenadas com injeção absoluta).

Nesse trabalho, será empregado o método PPP – estático.

### 3.2 EXPERIMENTO

A fim de construir as condições que permitissem avaliar o potencial de detecção de deslocamentos pelo posicionamento com a tecnologia GNSS, os testes foram realizados em ambiente controlado. Utilizou-se uma grade como molde de modo que as posições das antenas GNSS pudessem ter suas variações conhecidas(pré-definidas). A seguir são descritos os passos para a execução do experimento.

### 3.2.1 Controle de movimentação

O procedimento envolveu a criação de um molde em grade, o qual foi plotado em papel, simulando uma superfície milimetrada. Foram desenhados quadrados de 1 cm por 1 cm. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir ilustra a posição dos pontos coletados.

FIGURA 10 – POSIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS



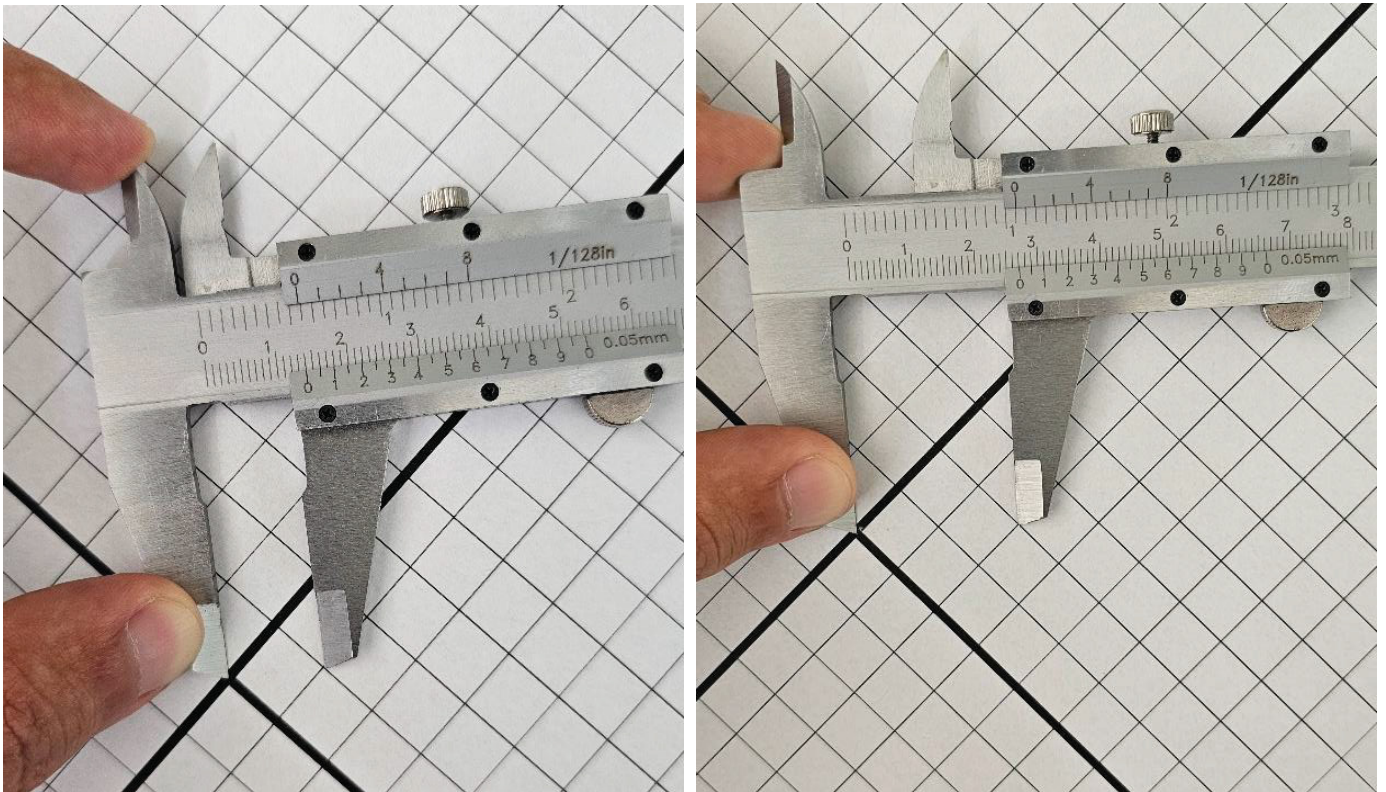
FONTE: O autor (2023).

A fixação dos moldes no chão foi feita com fita adesiva e suas bordas foram riscadas no piso com auxílio de um grafiteiro, a fim de assegurar que a posição do molde não fosse deslocada. Essa estratégia de controle foi de grande utilidade, considerando-se que o material empregado para confecção dos moldes (papel sulfite) é bastante suscetível a deformações.

Os pontos a serem medidos foram definidos em relação à origem do papel em resultantes provenientes de movimentações de 1x1 cm e 2x2 cm, ou seja, o cruzamento das linhas do eixo central é a partida (origem) para a variação dos pontos medidos (deslocamentos).

O valor das resultantes calculadas é de 14 mm e 28 mm, para as movimentações citadas, de 10 e 20 mm, respectivamente. Buscando-se a calibração para controlar distorções nas impressões, o modelo foi medido com um paquímetro como padrão na medida do quadriculado e as médias correspondem aos valores calculados, como mostra a FIGURA 11.

FIGURA 11 – CALIBRAÇÃO DO MODELO IMPRESSO

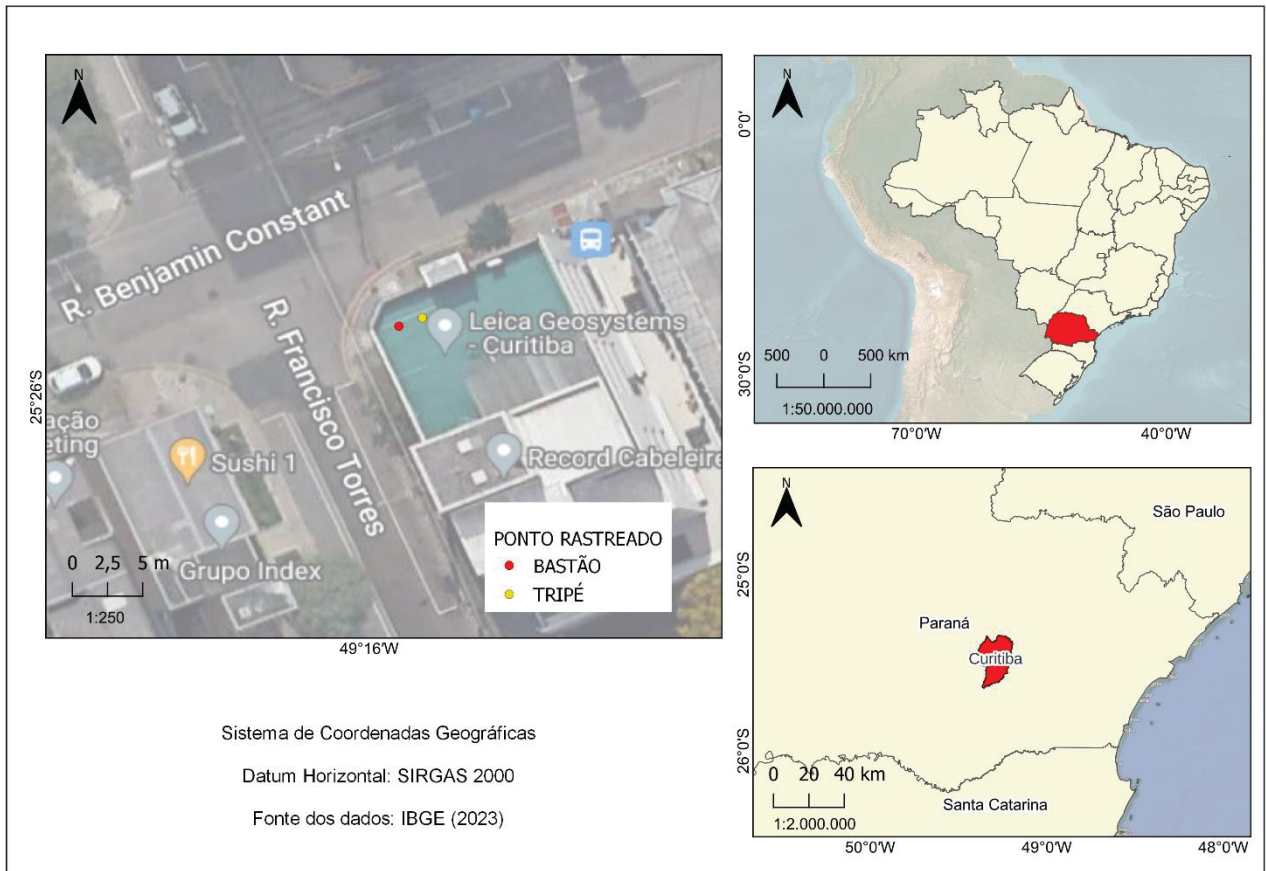


FONTE: O Autor (2023).

### 3.2.2 Rastreio dos pontos

Os rastreios dos pontos por GNSS foram executados no prédio da Manfra, hoje sede da Empresa Leica Geosystems do Brasil, na cidade de Curitiba. A FIGURA 12 a seguir, mostra o mapa de localização.

FIGURA 12 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO

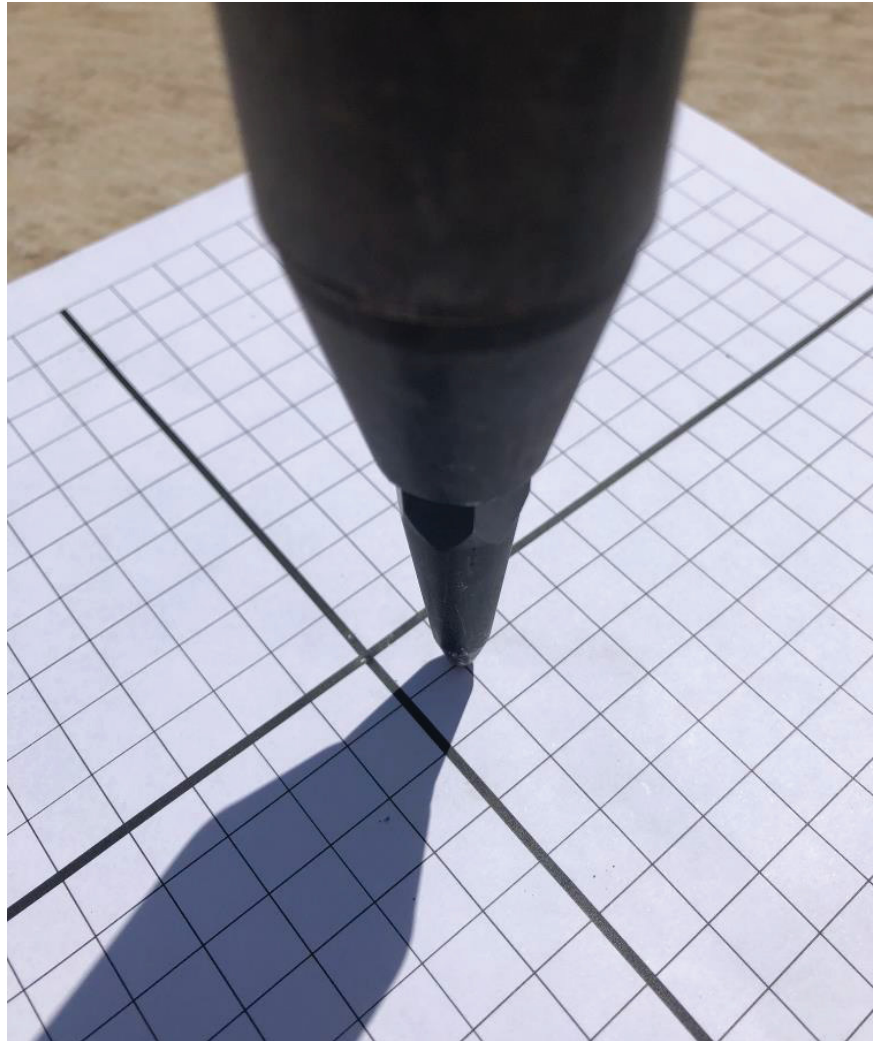


FONTE: O autor (2023).

Ao todo, foram realizados 05 (cinco) dias de coleta, onde os rastreios tiveram duração média de 2 horas cada, tendo início pôr volta das 9h da manhã e término entre 15h e 17h. Em cada um dos cinco dias de trabalho, de dois a três pares de pontos foram rastreados, sendo eles os pontos na origem do sistema (ponto central do papel milimetrado produzido) e pontos com deslocamento predefinidos (pontos com deslocamentos resultantes no papel milimetrado produzido).

Para a instalação das antenas GNSS nos pontos, utilizou-se um bastão apoiado por um bipé e um tripé com base nivelante. Onde a antena acoplada ao bastão foi utilizada para rastrear o ponto com um deslocamento definido de 1,4 cm em relação à origem do modelo (FIGURA 13). Enquanto o ponto rastreado com a antena acoplada à base nivelante e o tripé teve um deslocamento provocado de 2,8 cm em relação a origem do modelo.

FIGURA 13 – PONTO DESLOCADO 1 CM DA ORIGEM



FONTE: O Autor (2023).

Ao total, no experimento de rastreamento foram coletados 24 pontos. Nos quadros a seguir (QUADRO 5, QUADRO 6, QUADRO 7, QUADRO 8,

QUADRO 9), apresentam-se o dia, a semana GPS e o tempo de início e fim dos rastreios para cada ponto.

QUADRO 5 – PRIMEIRO DIA DE RASTREIO

DIA DO ANO – 79		SEMANA GPS - 2254	
ID DO PONTO		INÍCIO DO RASTREIO	FIM DO RASTREIO
BASTÃO	P1	09:50	12:05
	P2	13:03	15:15
TRIPÉ	M1	09:50	12:05
	M2	13:03	15:15

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 6 – SEGUNDO DIA DE RASTREIO

DIA DO ANO – 80		SEMANA GPS - 2254	
ID DO PONTO		INÍCIO DO RASTREIO	FIM DO RASTREIO
BASTÃO	P1	09:04	11:02
	P2	11:07	13:03
TRIPÉ	M1	09:04	11:02
	M2	11:07	13:03

FONTE: O autor (2023)

QUADRO 7 – TERCEIRO DIA DE RASTREIO

DIA DO ANO – 81		SEMANA GPS - 2254	
ID DO PONTO		INÍCIO DO RASTREIO	FIM DO RASTREIO
BASTÃO	P1	08:49	11:00
	P2	11:11	13:10
	P1	13:15	15:17
	P2	15:32	17:39
TRIPÉ	M1	08:49	11:00
	M2	11:11	13:10
	M1	13:15	15:17
	M2	15:32	17:39

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 8 – QUARTO DIA DE RASTREIO

DIA DO ANO – 82		SEMANA GPS - 2254	
ID DO PONTO		INÍCIO DO RASTREIO	FIM DO RASTREIO
BASTÃO	P1	09:13	11:23
	P2	11:45	14:20
TRIPÉ	M1	09:13	11:23
	M2	11:45	14:20

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 9 – QUINTO DIA DE RASTREIO

DIA DO ANO – 83		SEMANA GPS - 2254	
ID DO PONTO		INÍCIO DO RASTREIO	FIM DO RASTREIO
BASTÃO	P1	09:15	11:41
	P2	13:50	16:13
TRIPÉ	M1	09:15	11:41
	M2	13:50	16:13

FONTE: O autor (2023).

A fim de obter rastreios em condições semelhantes para todos os pontos levantados, o rastreio do ponto de origem e do ponto deslocado foram alternados ao longo dos dias. Ou seja, no primeiro dia, o ponto de origem foi rastreado pela manhã

e o ponto deslocado foi rastreado à tarde. No segundo dia, o procedimento foi invertido, com o ponto deslocado sendo rastreado pela manhã e o ponto de origem à tarde.

Esse método de rastreamento sistemático dos pontos por GNSS, alternando entre a origem e o ponto deslocado, permitiu a obtenção de dados consistentes e comparáveis para análises geodésicas posteriores. As antenas GNSS foram configuradas para coletar as constelações GPS, GLONASS, Galileo e Beidou, além das frequências L1, L2 e L5. Nelas também foi configurada uma máscara de elevação de 15° e frequência de registro de dados a cada 1 segundo, além de seleção de saúde dos satélites de maneira automática (FIGURA 14).

FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DAS ANTENAS GNSS



FONTE: O autor (2023).

### 3.2.3 Processamento dos dados

O processamento dos dados é uma etapa essencial em aplicações de posicionamento por satélite. Nesta seção, serão explorados em detalhes os procedimentos utilizados para a realização do processamento dos dados no RTKLIB, fornecendo uma visão geral abrangente do fluxo de trabalho envolvido.

#### 3.2.3.1 Conversão dos dados brutos para o formato RINEX

No contexto do processamento de dados GNSS, a conversão dos dados brutos para o formato RINEX desempenha um papel importante. Nesta seção, serão abordados em detalhes os procedimentos envolvidos no processo de conversão dos dados brutos.

O processo de conversão foi iniciado por meio da importação dos dados brutos no software comercial Infinity, versão 3.8, também disponibilizado para esta pesquisa de forma gratuita pela Leica Geosystems. No Infinty 3.8, configurou-se a exportação dos dados brutos para o formato RINEX, especificamente na versão RINEX 3.04. A escolha dessa versão deve-se ao fato de ser a última disponível no software e oferecer suporte para a exportação de observações de multi-constelações em um único arquivo.

A seleção adequada da versão do RINEX é essencial para garantir a compatibilidade e o aproveitamento máximo dos dados coletados. A versão 3.04 do RINEX, adotada nesse trabalho, é reconhecida por sua capacidade de lidar com observações de múltiplas constelações, permitindo a utilização de dados provenientes de sistemas de satélites como GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, entre outros.

A conversão dos dados brutos para o formato RINEX proporciona a interoperabilidade dos dados coletados, permitindo o uso dessas informações em diferentes softwares de processamento GNSS incluindo o utilizado nesta pesquisa (RTKLIB). Além disso, a conversão para o formato RINEX estabelece uma estrutura padronizada para as observações GNSS, simplificando a análise e a aplicação de técnicas de processamento subsequentes.

### 3.2.3.2 Obtenção dos dados precisos para o processamento

No processo de obtenção dos dados precisos para o processamento, diversos arquivos são necessários para melhorar a precisão e a qualidade dos resultados. Inicialmente, foram obtidos os dados de navegação da Estação RBMC mais próxima, a UFPR (Universidade Federal do Paraná), por meio do download dos arquivos RINEX 3 de 1 segundo disponibilizados no site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Esses arquivos, que são fornecidos por hora e a cada 15 minutos, foram baixados em todas as horas em que ocorreram os rastreios durante os dias de levantamento.

Além dos dados de navegação, outros produtos foram baixados do site do CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Foram obtidos os arquivos DCB (*Differential Code Bias*), que fornecem informações sobre os vieses diferenciais dos códigos dos satélites, melhorando a precisão do posicionamento.

Também foram baixados os arquivos SP3 (*Satellite Precise Ephemeris*), contendo efemérides precisas dos satélites GNSS, essenciais para o cálculo das posições dos satélites no momento das observações. Os arquivos ERP (*Earth Rotation Parameters*) foram obtidos para fornecer informações sobre os parâmetros de correção da rotação da Terra durante o posicionamento. Por fim, os arquivos CLK (*Clock*) foram baixados para corrigir os erros de relógio dos satélites GNSS e melhorar a precisão temporal do posicionamento.

Além desses arquivos, também realizou-se o download do arquivo contendo os parâmetros de calibração da antena (GS18), referenciados ao último ITRF, no site da NGS (*National Geodetic Survey*). Esse arquivo contém informações sobre as antenas dos satélites e receptores GNSS. Estão inclusas informações relacionadas ao padrão de radiação (PCO e PCV), fator de calibração e offset, e é necessário para corrigir as características da antena durante o processamento dos dados.

A obtenção desses dados precisos é fundamental para garantir resultados de posicionamento GNSS confiáveis, integrando informações de navegação, efemérides, vieses diferenciais, parâmetros de rotação da Terra e erros de relógio. Esses dados, juntamente com o arquivo de antena, são essenciais para o sucesso do processamento e a obtenção de resultados de alta qualidade.

### 3.2.3.3 Definição dos parâmetros de processamento

Neste tópico, será abordada a definição dos parâmetros de processamento no software RTKLIB. Serão descritas as siglas correspondentes a cada um dos dados apresentados e sua finalidade no contexto do processamento, de acordo com informações do manual programa.

O módulo do RTKLIB utilizado foi o RTKPOST, que é especificamente projetado para processar e analisar os dados coletados de receptores GNSS em modo pós-processado.

O RTKPOST permite a configuração de uma variedade de parâmetros de processamento para ajustar o desempenho e a precisão da solução de posicionamento. Esses parâmetros incluem a seleção das constelações e frequências GNSS a serem consideradas, modelos de correção para erros atmosféricos (como troposfera e ionosfera), opções de filtragem, correções para características específicas do receptor e antena, entre outros.

Além de fornecer as soluções de posicionamento GNSS, o RTKPOST também oferece recursos de análise e visualização dos resultados, por meio do RTKPLOT. Ele permite a geração de relatórios estatísticos, gráficos e plots que podem ser usados para avaliar a qualidade da solução, identificar tendências e realizar análises adicionais.

No modo de posicionamento "ppp-static" (*precise point positioning* - posicionamento preciso de ponto estático), o RTPOST utiliza técnicas de posicionamento em que o receptor GNSS é tratado como um ponto estático e utiliza-se observações de várias constelações de satélites simultaneamente. A frequência utilizada para o processamento é L1+L2/E5b, o que significa que são consideradas as observações nas frequências L1 e L2, bem como na banda E5b (Galileo). Isso permite uma melhor mitigação de erros e aumenta a precisão do posicionamento.

O tipo de filtro utilizado é o "*Combined*", que é uma técnica de processamento GNSS que utiliza soluções de filtro *forward* e *backward*, combinando-as de forma suave e refinada para fornecer uma solução de posicionamento mais precisa e confiável. O reajuste dos estados de viés de fase entre as etapas *forward* e *backward* contribui para a melhoria geral da precisão da solução final. Contudo é válido frisar que essa estratégia de ajustamento só é possível em modo pós-processado.

Para correções das marés terrestres, é utilizado o modelo "solid". Esse modelo leva em consideração as variações das marés na superfície terrestre e corrige as observações GNSS de acordo.

A correção da ionosfera é realizada pelo método "iono-free LC" (*linear combination* - combinação linear). Essa combinação elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera, melhorando assim a precisão do posicionamento.

A correção da troposfera é realizada estimando o "ZTD" (*Zenith Total Delay* - Atraso Total do Zenith). Esse parâmetro representa o atraso causado pela troposfera na propagação dos sinais GNSS e sua estimativa é utilizada para corrigir as observações.

As efemérides dos satélites e os dados de relógio utilizados no processamento serão os precisos, citados anteriormente, o que significa que são de alta qualidade e fornecem informações atualizadas sobre as órbitas dos satélites e seus relógios internos.

Dentre as opções selecionadas no RTKPOST, estão o "Sat PCV", que indica a utilização de correções para variações de fase devido a características de antenas, "Rec PCV", que considera as variações de fase devido a características do receptor, "PhWU", define se a correção de fase de "phasewindup" para modos PPP é aplicada ou não e "RejEcl", que rejeita observações durante eclipses. Além disso, o "RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) FDE (*Fault Detection and Exclusion*)" está marcado, o que indica o uso do FDE (Detecção e Exclusão de Falhas) para melhorar a robustez e a confiabilidade do posicionamento. O QUADRO 10 traz um resumo das principais configurações do processamento PPP descritos nesta seção.

QUADRO 10 – PARAMETROS DE CONFIGURAÇÃO DE PROCESSAMENTO PPP ESTÁTICO

Parâmetro	Configuração adotada
<b>Modo de posicionamento (PositioningMode)</b>	PPP estático (PPP Static)
<b>Produtos (Efemérides e relógio) Orbits and clocks</b>	CODE orbit and clock products
<b>Modelagem dos efeitos da ionosfera (Ionosphere)</b>	Ionospheric-free
<b>Atraso troposférico zenital (Zenith Tropospheric delay)</b>	Estimate ZTD (Componente hidrostática modelada e componente úmida residual estimada)
<b>Máscara de Elevação (Elevationsmask)</b>	15°

<b>Amostragem dos dados (Sampling data)</b>	1 segundo
<b>Filtragem (Filter type)</b>	Combined (Forward+Backward)
<b>Software</b>	RTKlib 2.4.2

FONTE: O Autor (2023).

A solução resultante do processamento para ambos os métodos é fornecida no formato X/Y/Z-ECEF, que representa as coordenadas tridimensionais no sistema de coordenadas terrestre (ECEF - *Earth-Centered, Earth-Fixed*).

Em relação às estatísticas e informações de precisões das observáveis para construção da matriz dos pesos bem como outros aspectos relacionados ao modelo estocástico, os valores *default* propostos pelo programa foram são utilizados. Isso significa que as estatísticas padrão são geradas para avaliar a qualidade e a precisão da solução de posicionamento obtida. Essas estatísticas fornecem informações sobre os erros e a confiabilidade da solução (RTKLIB, 2021).

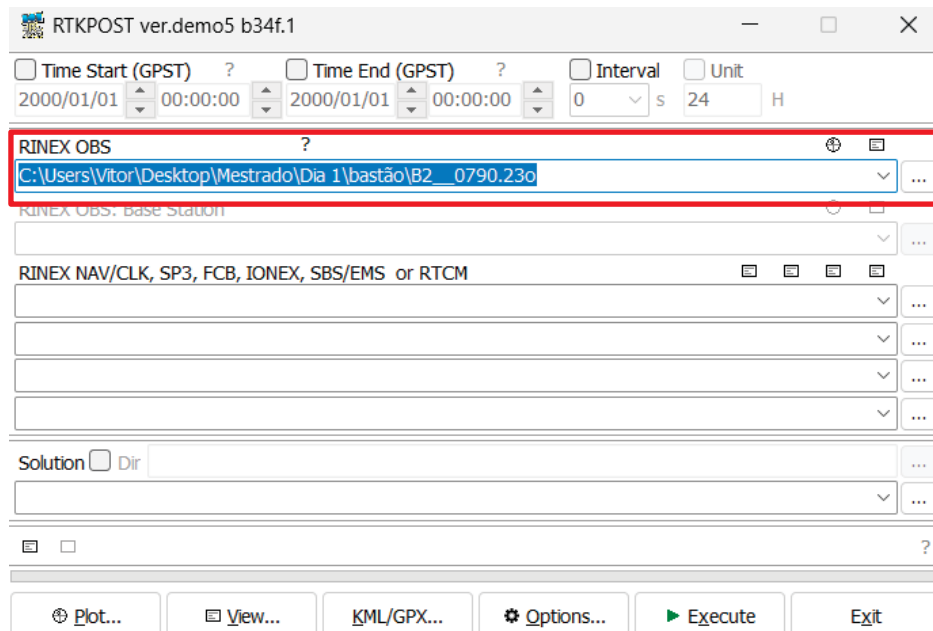
A definição cuidadosa dos parâmetros de processamento no RTKPOST é essencial para obter resultados precisos e confiáveis de posicionamento GNSS. No próximo capítulo, serão explorados os resultados obtidos a partir do processamento dos dados, permitindo uma análise e uma avaliação da qualidade das soluções de posicionamento.

#### 3.2.3.4 Execução do processamento

É importante ressaltar que o processamento dos dados pelo método PPP foi realizado de várias maneiras, com respeito ao uso das constelações GNSS. Foi realizado incluindo-se o MULTI-GNSS, que envolve a utilização das quatro principais constelações GNSS disponíveis (GPS, Glonass, Galileo e Beidou). Também, foram realizados processamentos específicos com pares de constelações (GPS+Glonass e GPS+Galileo) e processamentos individuais com cada constelação (GPS, Glonass, Galileo e Beidou).

A execução do processamento teve início com o carregamento do arquivo de configuração com os parâmetros que foram definidos anteriormente. Foi inserido o arquivo de observação do ponto de interesse, no formato RINEX 3.04, no local indicado na ferramenta RTKPOST, conforme ilustrado na FIGURA 15.

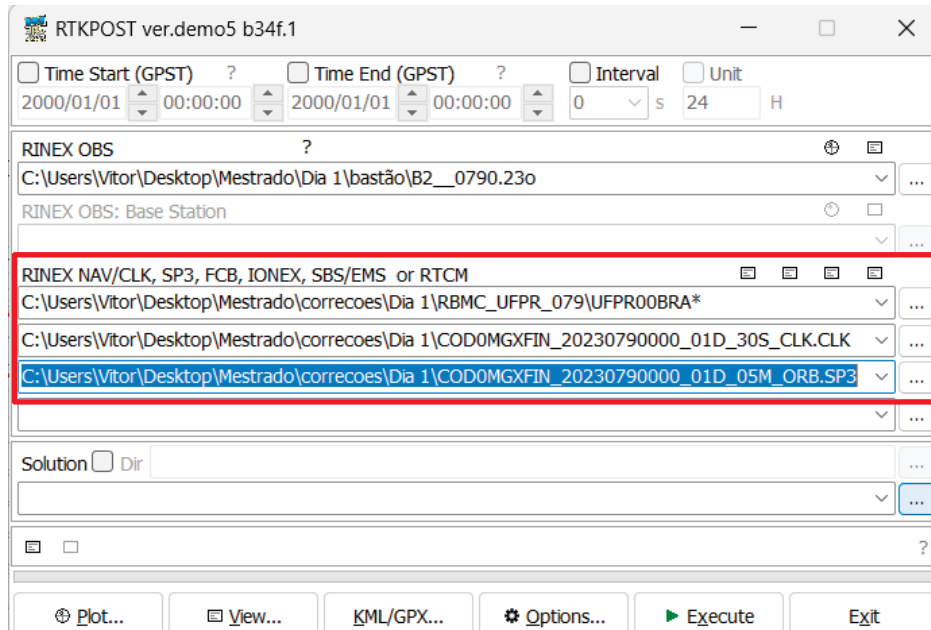
FIGURA 15 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS DE OBSERVAÇÃO



FONTE: O Autor (2023).

Foram inseridos os arquivos precisos necessários para o processamento, como os arquivos SP3 (*precise ephemerides*) e CLK (*precise clock*). Além disso, o arquivo de navegação da RBMC UFPR também foi inserido. Para facilitar o processo de inserção dos arquivos de navegação, foi aplicada a ferramenta de asterisco no final da nomenclatura do dado que se repete, evitando assim a necessidade de mesclar todos os arquivos baixados da RBMC, como exemplificado na FIGURA 16.

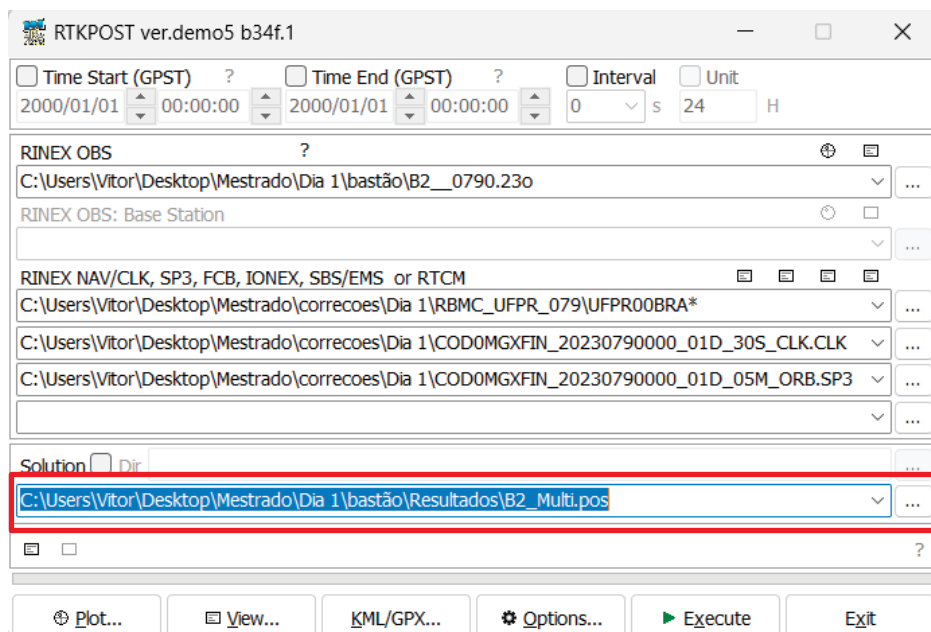
FIGURA 16 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS PRECISOS



FONTE: O Autor (2023).

Por fim, foi selecionado o diretório de salvamento dos dados processados para acesso futuro e exportação para planilha eletrônica, a fim de possibilitar a manipulação estatística dos resultados (FIGURA 17).

FIGURA 17 – DEFINIÇÃO DO DIRETÓRIO



FONTE: O Autor (2023).

Para ilustrar o que foi e como foi armazenado, a planilha do dia 1 organizada com as informações pós-processadas, é apresentada na TABELA 2, as tabelas com as demais informações estarão dispostas no Apêndice 1. Onde encontramos as coordenadas cartesianas geodésicas X, Y, Z, o número de satélites na última época (ns) e os desvios padrões das componentes E, N e U, dados por:  $\sigma_n$ ,  $\sigma_e$  e  $\sigma_u$ , respectivamente. Além disso os dados estão divididos entre os dados rastreados pelo receptor acoplado ao bastão e ao receptor acoplado ao tripé.

TABELA 2 – RESULTADOS DAS COORDENADAS CARTESIANAS GEODÉSICAS PROCESSADAS E ARMAZENADAS DO DIA 1

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n$ (m)	$\sigma_e$ (m)	$\sigma_u$ (m)	
P1 MULTI	3761968,958	-4367820,947	-2722506,211	20	0,001	0,002	0,004	BASTÃO
P1 GPS	3761968,929	-4367820,957	-2722506,194	7	0,002	0,006	0,008	
P1 GPS+GLONASS	3761968,978	-4367820,921	-2722506,195	10	0,003	0,005	0,002	
P1 GPS+GALILEO	3761968,957	-4367820,950	-2722506,213	13	0,003	0,005	0,003	
P2 MULTI	3761968,933	-4367820,978	-2722506,215	17	0,001	0,003	0,004	
P2 GPS	3761968,922	-4367820,904	-2722506,176	6	0,001	0,008	0,008	
P2 GPS+GLONASS	3761968,939	-4367820,894	-2722506,177	8	0,004	0,009	0,004	
P2 GPS+GALILEO	3761968,930	-4367820,955	-2722506,208	10	0,003	0,005	0,002	
M1 MULTI	3761971,005	-4367819,733	-2722505,300	20	0,001	0,002	0,004	TRIPÉ
M1 GPS	3761971,000	-4367819,695	-2722505,264	7	0,002	0,006	0,007	
M1 GPS+GLONASS	3761971,024	-4367819,719	-2722505,290	10	0,003	0,005	0,002	
M1 GPS+GALILEO	3761971,017	-4367819,724	-2722505,291	13	0,003	0,004	0,002	
M2 MULTI	3761970,991	-4367819,784	-2722505,352	18	0,001	0,003	0,004	
M2 GPS	3761970,993	-4367819,668	-2722505,298	7	0,001	0,007	0,008	
M2 GPS+GLONASS	3761971,009	-4367819,643	-2722505,296	9	0,005	0,009	0,004	
M2 GPS+GALILEO	3761970,997	-4367819,757	-2722505,348	11	0,003	0,005	0,002	

FONTE: O autor (2023).

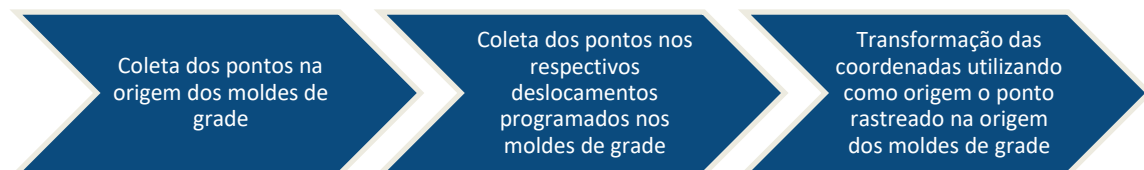
Essas etapas de execução do processamento com o RTKPOST permitem obter soluções de posicionamento GNSS de alta precisão e fornecem informações valiosas para análise e interpretação dos resultados obtidos no contexto do trabalho realizado.

### 3.2.3.5 Transformação das coordenadas

Para realizar os cálculos de transformação, foi necessário determinar as coordenadas geográficas das origens. Esses cálculos foram realizados para cada origem em cada dia, pois em cada dia de levantamento, o ponto foi medido tanto na origem quanto no local de movimentação. Dessa forma, as variações tendem a apresentar menos distorções ao calcular as coordenadas resultantes.

Com o intuito de facilitar a análise dos dados, as coordenadas cartesianas ortogonais geodésicas da origem do sistema foram definidas como sendo iguais às coordenadas da origem de cada molde de grade. Em outras palavras, a coordenada local gerada pela transformação é igual à diferença das coordenadas em suas componentes. A FIGURA 18 exemplifica como foi realizado esse procedimento para cada dia de rastreo.

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO REALIZADO PARA CADA DIA DE RASTREIO



FONTE: O autor (2023).

Essa transformação das coordenadas permite uma análise mais precisa das diferenças resultantes da movimentação controlada. Ao utilizar um sistema geodésico local, os dados podem ser avaliados em relação a uma referência específica, facilitando a interpretação dos resultados e fornecendo informações relevantes sobre a movimentação do ponto de interesse.

As coordenadas transformadas fornecem uma representação mais adequada do deslocamento do ponto em relação à origem, permitindo uma análise mais precisa e detalhada das mudanças ocorridas. Essas informações são essenciais para avaliar a eficácia de técnicas de controle e monitoramento.

Com intuito de exemplificar como a transformação foi feita de acordo com a metodologia apresentada na revisão bibliográfica, na equação 25 a seguir, está o cálculo matricial do P2 do primeiro dia de rastreo, executado no Excel, utilizando a equação 24. Ou seja, na equação 25 é apresentado um exemplo de valores obtidos para os parâmetros da equação 24 (SGL), no caso, para o ponto P2.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen } \Phi_0 & \text{cos } \Phi_0 \\ 0 & -\text{cos } \Phi_0 & \text{sen } \Phi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\text{sen } \lambda_0 & \text{cos } \lambda_0 & 0 \\ -\text{cos } \lambda_0 & -\text{sen } \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ n_1 \\ u_1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,429 & 0,903 \\ 0 & -0,903 & -0,429 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,758 & 0,653 & 0 \\ -0,653 & 0,758 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,025 \\ -0,031 \\ -0,004 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,039 \\ -0,001 \\ 0,008 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Logo, com os valores  $e_1$ ,  $n_1$  e  $u_1$ , transformados para milímetros, temos que no dia 1 obteve-se variações de -39, -1 e 8 milímetros em cada componente das coordenadas do ponto P1 para o ponto P2.

### 3.2.3.6 Teste estatístico

Com o conjunto de diferenças lineares, foi calculado o estimador da média aritmética da resultante por meio da equação 26 e o desvio padrão da amostra por intermédio da equação 27 para o conjunto de pontos medidos com o bastão e os medidos com o Tripé.

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{resultante})}{n} \quad (26)$$

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (27)$$

O teste estatístico também foi aplicado com os dados das altitudes, uma vez que ela não faz parte do afastamento linear dos pontos, mas é uma coordenada calculada pertencente a estes. As equações 26 e 27 tiveram suas incógnitas adaptadas para a geração dos resultados e foram aplicadas a esta variável, ou seja, onde era determinado as diferenças lineares agora serão determinadas as diferenças altimétricas.

Os resultados advindos das formulações supracitadas embasam os cálculos para a prática do teste t de *Student* pareado (equação 22). Que foi escolhido por ser

ideal para pequenas amostras e eficiente para realizar análises no quesito informações quantitativas de dados pareados.

Logo, assume-se as seguintes hipóteses para o teste:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{Não há diferença entre as medidas} \\ H_1: \text{Há diferença entre as medidas} \end{array} \right.$$

Realizando as análises pertinentes a esse teste, será possível observar se se aceita ou não a hipótese nula. Ou seja, será constatado se existe ou não diferenças estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS multi-constelações e o valor de resultante medido com o paquímetro no modelo de grade.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se os resultados encontrados com o processamento dos dados GNSS coletados no contexto dos experimentos executados. Foi dada ênfase na comparação dos valores das resultantes decorrentes dos deslocamentos controlados nos pontos monitorados por GNSS.

### 4.1 CÁLCULO DAS RESULTANTES

Uma vez que no cálculo das transformações as coordenadas cartesianas geodésicas da origem do sistema foram definidas como sendo iguais às coordenadas da origem de cada molde de grade, os valores de diferença são os resultados das transformações, ou seja, o valor das origens sempre será zero e as coordenadas obtidas no ponto de deslocamento já serão os valores de movimentações controladas. As coordenadas transformadas foram organizadas e dispostas nas tabelas (TABELA 3, TABELA 4, TABELA 5, TABELA 6, TABELA 7) a seguir:

TABELA 3 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 1

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P1 MULTI	0	0	0	BASTÃO
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	-39	-1	8	
P2 GPS	29	-3	-48	
P2 GPS+GLONASS	-13	-4	-49	
P2 GPS+GALILEO	-24	-1	-15	
M1 MULTI	0	0	0	TRIPÉ
M1 GPS	0	0	0	
M1 GPS+GLONASS	0	0	0	
M1 GPS+GALILEO	0	0	0	
M2 MULTI	-44	-34	49	
M2 GPS	12	-41	-8	

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
M2 GPS+GLONASS	39	-34	-58	
M2 GPS+GALILEO	-37	-46	35	

FONTE: O Autor (2023).

TABELA 4 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 2

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P1 MULTI	0	0	0	BASTÃO
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	-46	19	-16	
P2 GPS	-142	-1	-72	
P2 GPS+GLONASS	-164	22	-40	
P2 GPS+GALILEO	-17	17	-29	
M1 MULTI	0	0	0	TRIPÉ
M1 GPS	0	0	0	
M1 GPS+GLONASS	0	0	0	
M1 GPS+GALILEO	0	0	0	
M2 MULTI	-13	26	-65	
M2 GPS	-22	21	-85	
M2 GPS+GLONASS	-32	26	-37	
M2 GPS+GALILEO	-10	26	-52	

FONTE: O Autor (2023).

TABELA 5 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 3

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P1 MULTI	0	0	0	BASTÃO
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	9	-27	4	
P2 GPS	41	1	-55	
P2 GPS+GLONASS	0	-16	-74	

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P2 GPS+GALILEO	5	-18	-48	
P1 MULTI	0	0	0	
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	-18	-6	65	
P2 GPS	-10	-25	-52	
P2 GPS+GLONASS	-51	3	62	
P2 GPS+GALILEO	-54	9	89	
M1 MULTI	0	0	0	
M1 GPS	0	0	0	
M1 GPS+GLONASS	0	0	0	
M1 GPS+GALILEO	0	0	0	
M2 MULTI	13	-38	-41	
M2 GPS	18	-10	-60	
M2 GPS+GLONASS	59	-35	-80	
M2 GPS+GALILEO	13	-29	-65	
M1 MULTI	0	0	0	
M1 GPS	0	0	0	
M1 GPS+GLONASS	0	0	0	
M1 GPS+GALILEO	0	0	0	
M2 MULTI	-48	5	26	
M2 GPS	30	-25	-17	
M2 GPS+GLONASS	-13	-22	48	
M2 GPS+GALILEO	-17	-2	63	

TRIPÉ

FONTE: O Autor (2023).

TABELA 6 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 4

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P1 MULTI	0	0	0	BASTÃO
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	6	10	-17	
P2 GPS	-113	-8	63	
P2 GPS+GLONASS	3	2	9	
P2 GPS+GALILEO	-41	-2	-9	
M1 MULTI	0	0	0	TRIPÉ
M1 GPS	0	0	0	
M1 GPS+GLONASS	0	0	0	
M1 GPS+GALILEO	0	0	0	
M2 MULTI	18	-12	16	
M2 GPS	-96	-33	-27	
M2 GPS+GLONASS	2	-22	46	
M2 GPS+GALILEO	11	-16	-53	

FONTE: O Autor (2023).

TABELA 7 – DADOS ARMAZENADOS DA TRANSFORMAÇÃO NO DIA 5

	e (mm)	n (mm)	u (mm)	
P1 MULTI	0	0	0	BASTÃO
P1 GPS	0	0	0	
P1 GPS+GLONASS	0	0	0	
P1 GPS+GALILEO	0	0	0	
P2 MULTI	-39	-1	8	
P2 GPS	10	14	-121	
P2 GPS+GLONASS	15	23	-55	
P2 GPS+GALILEO	26	3	-54	

FONTE: O Autor (2023).

Dois aspectos a serem observados são que os pontos coletados no dia 3 formaram 2 pares de pontos para cada tipo de suporte utilizando a antena apoiada

com tripé e base nivelante. E para o dia 5 os dados rastreados com tripé precisaram ser excluídos das observações, devido à inviabilidade dos seus resultados para as diferenças esperadas nesta pesquisa.

Logo, a partir dos demais valores das diferenças em cada componente horizontal das coordenadas dos pontos, foi possível calcular os valores de resultante linear (2D) para cada ponto medido por intermédio da equação 28 a seguir:

$$Resultante_{2D} = \sqrt{e^2 + n^2} \quad (28)$$

Os resultados provenientes destes cálculos para a determinação das resultantes lineares, está disposto na TABELA 8 para cada dia, para cada constelação utilizada e dividido por instrumentos de suporte para coleta (bastão ou tripé com base nivelante).

TABELA 8 – DADOS ARMAZENADOS DAS RESULTANTES 2D CALCULADAS

	Resultante 2D (mm) MULTI- GNSS	Resultante 2D (mm) GPS	Resultante 2D (mm) GPS+GLONASS	Resultante 2D (mm) GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
Dia 1	39	29	13	24	BASTÃO 14 mm
Dia 2	50	142	165	24	
Dia 3	28	41	16	18	
Dia 4	11	102	4	41	
Dia 5	26	17	28	26	
Dia 1	56	43	52	59	TRIPÉ 28 mm
Dia 2	29	30	41	27	
Dia 3	40	21	68	32	
Dia 4	22	102	22	19	

FONTE: O Autor (2023).

Já os valores das diferenças das altitudes, não precisaram ser necessariamente calculados, pois a transformação das coordenadas já apresenta suas diferenças. Com isso esses dados também foram distribuídos em uma tabela

como a anterior. Estes valores das diferenças de níveis dos pontos em cada dia, para cada constelação utilizada e divididos por instrumentos de suporte para coleta (bastão ou tripé com base nivelante) estão dispostos na TABELA 9 a seguir:

TABELA 9 – RESULTADOS ARMAZENADOS DAS DIFERENÇAS DE ALTITUDES (H)

	Dif. H (mm) MULTI-GNSS	Dif. H (mm) GPS	Dif. H (mm) GPS+GLONASS	Dif. H (mm) GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
Dia 1	8	48	49	15	BASTÃO 0 mm
Dia 2	16	72	40	29	
Dia 3	4	55	74	48	
Dia 4	17	63	9	9	
Dia 5	54	121	55	81	
Dia 1	49	8	58	35	TRIPÉ 0 mm
Dia 2	65	85	37	52	
Dia 3	41	60	80	65	
Dia 4	16	27	46	53	

FONTE: O Autor (2023).

#### 4.2 APLICAÇÃO DO TESTE ESTATÍSTICO

Partindo do conjunto de dados obtidos na etapa anterior foi possível realizar os cálculos estatísticos para validação dos resultados. A seguir está disposto na TABELA 10 as médias das resultantes para cada combinação de constelações GNSS.

TABELA 10 – MÉDIAS DAS RESULTANTES 2D PARA CADA COMBINAÇÃO GNSS

Média resultante 2D (mm) MULTI-GNSS	Média resultante 2D (mm) GPS	Média resultante 2D (mm) GPS+GLONASS	Média resultante 2D (mm) GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
29	60	46	31	BASTÃO 14 mm

Média resultante 2D (mm) MULTI-GNSS	Média resultante 2D (mm) GPS	Média resultante 2D (mm) GPS+GLONASS	Média resultante 2D (mm) GPS+GALILEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
39	47	42	31	TRIPÉ 28 mm

FONTE: O Autor (2023).

Com base nos referidos valores, somente as médias de menor magnitude, ou seja, as que mais se aproximaram dos valores de movimentação esperado foram selecionadas para o emprego do teste t. Especificamente, a combinação MULTI-GNSS (GPS + GLONASS + GALILEO + BEIDOU) e GPS + GALILEO foram as escolhidas para a aplicação do referido teste T.

Nos quadros (QUADRO 11 e QUADRO 12) a seguir, estarão as informações dos dados obtidos com o apoio do bastão para as combinações MULTI-GNSS e GPS+GALILEO:

QUADRO 11 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO (MULTI-GNSS)

<b>MÉDIA (mm)</b>	29
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	14

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 12 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO (GPS+GALILEO)

<b>MÉDIA (mm)</b>	31
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	14

FONTE: O autor (2023).

Tais resultados embasam os cálculos para a prática do teste t de *Student* pareado (equação 22). Assumindo uma média esperada de 14 mm, um nível de significância de 95% e tendo 5 graus de liberdade os valores tabelados e resultados dos cálculos do teste estão exibidos nos quadros a seguir (QUADRO 13 e QUADRO 14).

QUADRO 13 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO EM 2D (MULTI-GNSS)

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,571
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	2,642

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 14 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO EM 2D (GPS+GALILEO)

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,571
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	3,115

FONTE: O autor (2023).

Assumindo-se as seguintes hipóteses para ambos os testes:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{Não há diferença entre as medidas} \\ H_1: \text{Há diferença entre as medidas} \end{array} \right.$$

Realizando as análises pertinentes a esses testes, foi possível observar que os valores de  $T_{calculado}$  são maiores que os de  $T_{tabelado}$ , logo rejeita-se a hipótese nula para ambos os conjuntos de pontos. Ou seja, constatou-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS MULTI-GNSS e a combinação GPS+GALILEO, em comparação com o valor da resultante medido no modelo de grade com bastão.

Já os resultados encontrados para o conjunto de pontos medidos com o tripé para a combinação MULTI-GNSS e GPS+GALILEO foram dispostos no QUADRO 15 e QUADRO 16 a seguir:

QUADRO 15 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ (MULTI-GNSS)

<b>MÉDIA (mm)</b>	39
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	14

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 16 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESULTANTE 2D PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ (GPS+GALILEO)

<b>MÉDIA (mm)</b>	31
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	17

FONTE: O autor (2023).

Assumindo 28 mm de média esperada e adotando também o mesmo nível de significância de 95%, porém com 4 graus de liberdade, os valores tabelados e resultados dos cálculos do teste estão expostos no QUADRO 17 e QUADRO 18 a seguir.

QUADRO 17 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ EM 2D (MULTI-GNSS)

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,776
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	1,822

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 18 – VALORES DE T CALCULADOS PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ EM 2D (MULTI-GNSS)

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,776
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	0,402

FONTE: O autor (2023).

Assumindo-se as seguintes hipóteses para ambos os testes:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{Não há diferença entre as medidas} \\ H_1: \text{Há diferença entre as medidas} \end{array} \right.$$

Realizando as análises pertinentes a esses testes, foi possível observar que os valores de  $T_{calculado}$  são menores que os de  $T_{tabelado}$ , logo aceita-se a hipótese nula. Ou seja, constatou-se a não existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS MULTI-GNSS e a combinação GPS+GALILEO, em comparação com o valor da resultante medido no modelo de grade com o tripé.

O teste estatístico também foi aplicado com os dados das altitudes, uma vez que ela não faz parte do afastamento linear dos pontos, mas é uma coordenada

calculada pertencente a estes. Na TABELA 11 a seguir estão as médias das diferenças de níveis para cada combinação de constelações GNSS.

TABELA 11 – MÉDIAS DAS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES (H) PARA CADA COMBINAÇÃO GNSS

Média Dif. H (mm) MULTI-GNSS	Média Dif. H (mm) GPS	Média Dif. H (mm) GPS+GLONASS	Média Dif. H (mm) GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
27	68	48	45	BASTÃO 0 mm
42	39	54	54	TRIPÉ 0 mm

FONTE: O Autor (2023).

Também com base nos referidos valores de média, somente a de menor magnitude foi selecionada para o emprego do teste t. Ou seja, especificamente a combinação MULTI-GNSS.

Logo, com as equações 25 e 26 tendo suas incógnitas adaptadas para a geração do resultado e foram aplicadas a esta variável. Obtendo assim os resultados para o bastão exibidos no QUADRO 19 e os resultados do tripé no QUADRO 20a seguir para a combinação MULTI-GNSS.

QUADRO 19 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DIFERENÇA DE ALTURA PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O BASTÃO

<b>MÉDIA (mm)</b>	27
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	23

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 20 – RESULTADO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DIFERENÇA DE ALTURA PARA O CONJUNTO MEDIDO COM O TRIPÉ

<b>MÉDIA (mm)</b>	42
<b>DESVIO PADRÃO (mm)</b>	16

FONTE: O autor (2023).

Assumindo 0 mm de média esperada e adotando nível de significância de 95%, com 5 graus de liberdade, os seus valores tabelados e resultados dos cálculos dos testes estão expostos no QUADRO 21 e no QUADRO 22 a seguir.

QUADRO 21 – RESULTADO DO TESTE T STUDENT PARA AS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES NO BASTÃO

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,571
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	2,858

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 22 – RESULTADO DO TESTE T STUDENT PARA AS DIFERENÇAS DAS ALTITUDES NO TRIPÉ

<b>T<sub>TABELADO</sub></b>	2,571
<b>T<sub>CALCULADO</sub></b>	6,050

FONTE: O autor (2023).

Logo, constata-se com tal resultado que se rejeita-se a hipótese nula para os 2 tipos de rastreamento (bastão e tripé), ou seja, para os dados altimétricos da amostra há diferenças estatisticamente significativas em suas medidas obtidas nos processamentos de dados GNSS.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O posicionamento por satélites, utilizando o método PPP com o auxílio da tecnologia GNSS, tornou-se recorrente para projetos de engenharia. Com o contínuo progresso na eletrônica e o aumento no número de satélites e constelações disponíveis, os algoritmos de posicionamento GNSS têm evoluído, proporcionando coordenadas cada vez mais precisas aos usuários finais.

As pesquisas recentes nessa área têm se concentrado no uso de múltiplas constelações GNSS para aprimorar a qualidade dos dados obtidos. Estudos demonstraram os benefícios do posicionamento multi-GNSS, incluindo o uso de observáveis da 3ª frequência (portadoras L5) e a incorporação de constelações como Galileo e BDS, permitindo alcançar uma acurácia centimétrica em tempo real.

Embora o método PPP tenha mostrado avanços significativos nos últimos anos, especialmente devido aos refinamentos nos modelos de correção de erros, ainda existem algumas limitações em sua aplicação para o monitoramento de estruturas. Nesse contexto, o presente trabalho buscou analisar a performance do posicionamento GNSS com o método PPP para aplicações no monitoramento de estruturas, por meio de rastreios de pontos com movimentações controladas em suas resultantes horizontais e verticais.

Os resultados apresentados mostraram diferenças estatisticamente significativas nas medidas obtidas pelo cálculo das coordenadas GNSS. Os valores medidos no modelo de grade para medidas inferiores aos 2,8 cm e para as coordenadas altimétricas, não alcançaram os resultados desejados, sendo rejeitados pelo teste estatístico. Essas diferenças indicam que, no contexto dos experimentos realizados, ainda existem desafios a serem superados para alcançar uma precisão comparável aos resultados apresentados pelo método de posicionamento relativo na literatura sobre GNSS. No entanto, a análise da performance do PPP em ambiente urbano, com o uso de novas constelações, se demonstrou promissora. Haja vista que mesmo, em ambiente predial urbano foi possível observar repetibilidade posicional com qualidade centimétrica, abrindo algumas perspectivas para a automação na detecção de deslocamentos com o método, nesse contexto específico.

Portanto, este estudo contribui para o avanço no conhecimento sobre o método PPP e seu potencial para aplicações de monitoramento geodésico. A análise da performance do PPP com o uso de novas constelações pode proporcionar

melhorias significativas na precisão do posicionamento GNSS, ampliando as possibilidades de aplicação desse método em projetos de monitoramento de estruturas com alta precisão e confiabilidade.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aplicação de testes com dupla ou tripla frequência;
- Considerar outros ambientes e variações de fatores ambientais para os testes de rastreamento;
- Avaliação cuidadosa do efeito de multicaminhamento;
- Aumento da quantidade de observações, a fim de assegurar validade estatística dos resultados;
- A utilização de algoritmos para automação no processamento e transformação de coordenadas.

## REFERÊNCIAS

AFIFI, Akram; EL-RABBANY, Ahmed. Performance Analysis of Several GPS/Galileo Precise Point Positioning Models. **Sensors**, v. 15, n. 6, p. 14701–14726, 19 jun. 2015.

ALMEIDA, Marília Sanglard; DAL POZ, William Rodrigo. Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com gnss: qual é o método mais acurado atualmente? **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, p. 175–195, mar. 2016.

ALVES, Daniele Barroca Marra. **Método dos Mínimos Quadrados com Penalidades: Aplicação no Posicionamento Relativo GPS**. 2004. 131 f. Mestrado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

BDS. Sistema de Navegação por Satélite BeiDou. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/>>. 2023

BOHM, Johannes et al. Troposphere delay modeling based on numerical weather models. In: **3RD INTERNATIONAL COLLOQUIUM-SCIENTIFIC AND FUNDAMENTAL ASPECTS OF THE GALILEO PROGRAMME**, 2011, [S.l.: s.n.], 2011. p. 4.

BRAGA, Franciele Lúcia Silva. **Efeitos da refração troposférica no posicionamento Por Ponto Preciso no Brasil**. 2018. 135 f. Mestrado em Engenharia Civil / Informações Espaciais – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

BUSSAB, Wilton de O; MORETTIN, Pedro A. Estatística básica. 9ª edição ed. São Paulo: **Editora Saraiva**, 2017.

CAI, Changsheng. **Precise point positioning using dual-frequency GPS and GLONASS measurements**. 2009. 153 f. Mater Science of Geomatics Engineering – University of Calgary, Ottawa, 2009.

CALDAS, Franciane Lima; CHAVES, João Carlos. **DETERMINAÇÃO DO MODELO DE DEFORMAÇÃO DA REDE GNSS/SP COM BASE NA TEORIA DA ELASTICIDADE**. p. 12, 2015.

CAMARGO, Paulo De Oliveira. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 206 f. Doutorado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CHAVES, João Carlos. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos**. 2001. 115 f. Doutorado em Transportes – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

CHAVES, João Carlos; SEGANTINE, Paulo Cesar Lima. **DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE DEFORMAÇÃO COM GPS**. p. 10, 2014.

CHUERUBIM, Maria Lúgia. **Integração de Redes GNSS locais ao SIRGAS. 2009.** 180 f. Mestrado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2009.

COLLISCHONN, Carolina; MATSUOKA, Marcelo Tomio. Proposta de Método de Rede GNSS por PPP e Análise de Confiabilidade. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p. 453–471, set. 2016.

DA CRUZ, Wander. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas.** 2015. 146 f. Doutorado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DACH, Rolf; FRIDEZ, Pierre. **Tutorial – Bernese GNSS Software 5.2.** [S.l.]: Astronomical Institute University of Bern, 2017.

ESA. European Space Agency: **In-Orbit Validation.** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo\\_IOV/](http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo_IOV/)>. 2023

FAUSTINO, Renata Cristina. **Posicionamento por ponto preciso estático e cinemático: implementação e análise.** 2006. 106 f. Mestrado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

FAZAN, Jardel Aparecido. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu.** 2010. 278 f. Mestrado em Engenharia de Transportes – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GEMAEL, Camil. Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas celeste. Curitiba: **Editora UFPR**, 1994.

GEMAEL, Camil; ANDRADE, José Bittencourt. Geodésia celeste. Curitiba: **Editora UFPR**, 2015.

GLONASS. **Centro de consumo de aplicativos GLONASS.** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://glonass-iac.ru/>>. 2023

GPS. **GPS: O sistema de posicionamento global.** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gps.gov/>>. 2023

HÉROUX, P.; KOUBA, J. GPS precise point positioning using IGS orbit products. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy**, v. 26, n. 6–8, p. 573–578, jan. 2001.

HOFFMANN, Rodolfo; VIEIRA, Sonia. Estatística experimental. São Paulo: **Atlas**, 1989.

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

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; WASLE, Elmar. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. New York: **Springer**, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://bit.ly/3x4l0J8>>. 2023

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Manual Técnico de Posicionamento: Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 1 ed. Brasília, 2013. 34 p.

JERKE, Andreas. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidroelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento**. 2019. 111 f. Mestrado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

KALLOOP, Mosbeh R. et al. Evaluation of multi-GNSS high-rate relative positioning for monitoring dynamic structural movements in the urban environment. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 11, n. 1, p. 2239–2262, 1 jan. 2020.

LEICK, Alfred. GPS Satellite Surveying. [S.l.]: **John Wiley & Sons**, 1995.

LIMA, Thomas. **Melhorias e perspectivas no posicionamento GNSS com o uso da Constelação Galileo**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020.

LIN, Chen et al. Application of Multi-System Combination Precise Point Positioning in Landslide Monitoring. **Applied Sciences**, v. 11, n. 18, p. 8378, 9 set. 2021.

MARQUES, Haroldo Antonio. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2011. 228 f. Doutorado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.

MARTINS, Diego de Oliveira. **Monitoramento geodésico de estruturas por meio do método multipolar de aproximações sucessivas e de redes topográficas espaciais**. 2020. 242 f. Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

MATSUOKA, Marcelo Tomio et al. Potencialidades do serviço on-line de Posicionamento por Ponto Preciso (CSRS-PPP) em aplicações geodésicas. **Journal of Geoscience**, 2009.

MEDEIROS, Leandro Ítalo Barbosa. **Monitoramento dinâmico de estruturas por diferentes técnicas geodésicas simultaneamente: estudo de caso de um ponto da passarela Politécnico-Botânico da UFPR**. 2020. 128 f. Mestrado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

MONICO, João Francisco Galera. Posicionamento pelo GNSS - Descrição, fundamentos e aplicações. 2ª edição ed. São Paulo: **Editora Unesp**, 2008a.

MONICO, João Francisco Galera. Posicionamento pelo GNSS descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: **Editora UNESP**, 2008b.

MONICO, João Francisco Galera; CAMARGO, Paulo De Oliveira. Posicionamento pelo navstar-gps: Fundamentos, definição e aplicação. São Paulo: **Editora Unesp**, 2000.

OLIVEIRA JR, P. S. **Influência da Estimativa do Gradiente Horizontal Troposférico no Posicionamento GNSS de Alta Acurácia**. 2015. 88 f. Unesp, Presidente Prudente, 2015.

OLIVEIRA JR, Paulo Sérgio. **Definition and Implementation of a New Service for Precise GNSS Positioning**. 2017. 250 f. CNAM and Unesp, Le Mans, 2017.

OLIVEIRA, Andréia Fróes Galuci. Testes estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**, v. 5, n. 6, p. 12, 2008.

PEREIRA, Vinicius Amadeu Stuani. **Monitoramento das Irregularidades Ionosféricas e Cintilação dos Sinais GNSS: Em Tempo Real e Pós-Processado**. 2015. 159 f. Mestrado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

RAPOSO, Thayanne Sales. **ANOVA mista de dois fatores com medidas repetidas ou teste t não pareado da diferença dos escores: uma aplicação em dados de um treinamento de equilíbrio em jogadores de basquete**. 2016. 73 f. Graduação em Estatística – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2016.

RTKLIB. **RTKLIB 2.4.2 manual**. 2021.

SAMPAIO, Ivan Barbosa Machado. Estatística aplicada à experimentação animal. 2ª edição ed. Belo Horizonte: **Fundação de Estudo e Pesquisa em Medicina Veterinária e Zootecnia**, 2002.

SEEBER, Günter. Satellite geodesy. 2nd completely rev. and extended ed ed. Berlin; New York: **Walter de Gruyter**, 2003.

SEJAS, Mauricio Ihlenfeldt; KRUEGER, Cláudia Pereira. Experiências sobre a acurácia obtida no posicionamento absoluto utilizando pseudodistâncias suavizadas. **Bol. Ciênc. Geod.**, v. 13, n. 2, p. 17, 2007.

SILVA, Raquel Naiara Fernandes. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá**. 2012. 112 f. Mestrado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SONG, Jia; ZHAO, Lewen. Comparison Analysis on the Accuracy of Galileo PPP Using Different Frequency Combinations in Europe. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 10020, 26 out. 2021.

TEUNISSEN, Peter; KLEUSBERG, Alfred. GPS for Geodesy. **Springer**, 1998.

TEUNISSEN, Peter; MONTENBRUCK, Oliver. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. [S.l.]: **Springer**, 2017.

VEIGA, Luis Augusto Koenig. **Topografia Automatizada**. 2006. 61 f. Especialização em Geotecnologias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

WISEU, Teresa; ALMEIDA, Antonio. Plano de Emergência Interno de Barragens. In: **5º CONGRESSO DA ÁGUA**, 2000, Lisboa. Anais... Lisboa: [s.n.], 2000.

WÜBBENA, Gerhard; SCHMITZ, Martin; BAGGE, Andreas. **PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks**. 2005, [S.l.: s.n.], 2005. p. 13–16.

XIAO, Ruya et al. Deformation Monitoring of Reservoir Dams Using GNSS: An Application to South-to-North Water Diversion Project, China. **IEEE Access**, v. 7, p. 54981–54992, 2019.

ZANETTI, Gabriel Zehnpfennig. **Comparação dos métodos de posicionamento relativo estático e por ponto preciso (PPP) para posicionamento com bases longas voltado ao monitoramento de estruturas: estudo de caso para a estação de monitoramento contínuo da UHE Mauá**. 2018. 148 f. Mestrado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ZANETTI, Gabriel Zehnpfennig; VEIGA, Luis Augusto Koenig; OLIVEIRA JÚNIOR, Paulo Sergio. Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP e Posicionamento Relativo na UHE Mauá. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, n. 3, 30 set. 2020.

ZUMBERGE, J. F. et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 102, n. B3, p. 5005–5017, 10 mar. 1997.

DAL'FORNO, Gelson Lauro et al. Levantamento planialtimétrico no plano topográfico local: estudo comparativo dos resultados obtidos a partir de métodos geodésicos e topográficos. **UNISINOS**, p. 51-60, 2009.

## APÊNDICE 1 – DADOS ARMAZENADOS DOS PROCESSAMENTOS

### DIA 1

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n$ (m)	$\sigma_e$ (m)	$\sigma_u$ (m)	
P1 MULTI	3761968,958	-4367820,947	-2722506,211	20	0,001	0,002	0,004	BASTÃO
P1 GPS	3761968,929	-4367820,957	-2722506,194	7	0,002	0,006	0,008	
P1 GPS+GLONASS	3761968,978	-4367820,921	-2722506,195	10	0,003	0,005	0,002	
P1 GPS+GALILEO	3761968,957	-4367820,950	-2722506,213	13	0,003	0,005	0,003	
P2 MULTI	3761968,933	-4367820,978	-2722506,215	17	0,001	0,003	0,004	
P2 GPS	3761968,922	-4367820,904	-2722506,176	6	0,001	0,008	0,008	
P2 GPS+GLONASS	3761968,939	-4367820,894	-2722506,177	8	0,004	0,009	0,004	
P2 GPS+GALILEO	3761968,930	-4367820,955	-2722506,208	10	0,003	0,005	0,002	
M1 MULTI	3761971,005	-4367819,733	-2722505,300	20	0,001	0,002	0,004	TRIPÉ
M1 GPS	3761971,000	-4367819,695	-2722505,264	7	0,002	0,006	0,007	
M1 GPS+GLONASS	3761971,024	-4367819,719	-2722505,290	10	0,003	0,005	0,002	
M1 GPS+GALILEO	3761971,017	-4367819,724	-2722505,291	13	0,003	0,004	0,002	
M2 MULTI	3761970,991	-4367819,784	-2722505,352	18	0,001	0,003	0,004	
M2 GPS	3761970,993	-4367819,668	-2722505,298	7	0,001	0,007	0,008	
M2 GPS+GLONASS	3761971,009	-4367819,643	-2722505,296	9	0,005	0,009	0,004	
M2 GPS+GALILEO	3761970,997	-4367819,757	-2722505,348	11	0,003	0,005	0,002	

### DIA 2

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n$ (m)	$\sigma_e$ (m)	$\sigma_u$ (m)	
P1 MULTI	3761968.985	-4367820.918	-2722506.237	20	0.001	0.003	0.006	BASTÃO
P1 GPS	3761969.106	-4367820.851	-2722506.236	7	0.004	0.014	0.016	
P1 GPS+GLONASS	3761969.062	-4367820.885	-2722506.248	10	0.008	0.007	0.004	
P1 GPS+GALILEO	3761968.975	-4367820.929	-2722506.236	14	0.005	0.006	0.004	
P2 MULTI	3761968.946	-4367820.943	-2722506.213	16	0.001	0.003	0.004	
P2 GPS	3761968.956	-4367820.894	-2722506.206	6	0.002	0.012	0.008	
P2 GPS+GLONASS	3761968.921	-4367820.972	-2722506.212	7	0.006	0.007	0.003	
P2 GPS+GALILEO	3761968.950	-4367820.926	-2722506.208	11	0.004	0.004	0.002	
M1 MULTI	3761971.018	-4367819.802	-2722505.372	21	0.001	0.003	0.006	TRIPÉ
M1 GPS	3761971.055	-4367819.727	-2722505.357	8	0.004	0.010	0.015	
M1 GPS+GLONASS	3761971.000	-4367819.741	-2722505.343	11	0.007	0.008	0.004	
M1 GPS+GALILEO	3761971.013	-4367819.789	-2722505.365	15	0.005	0.006	0.003	
M2 MULTI	3761970.977	-4367819.775	-2722505.321	17	0.001	0.003	0.004	
M2 GPS	3761970.994	-4367819.690	-2722505.302	6	0.002	0.012	0.008	
M2 GPS+GLONASS	3761970.961	-4367819.745	-2722505.303	8	0.007	0.009	0.003	
M2 GPS+GALILEO	3761970.982	-4367819.768	-2722505.320	11	0.004	0.004	0.002	

## DIA 3

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n$ (m)	$\sigma_e$ (m)	$\sigma_u$ (m)	
P1 MULTI	3761968.988	-4367820.954	-2722506.228	13	0.001	0.003	0.006	BASTÃO
P1 GPS	3761968.993	-4367820.942	-2722506.230	6	0.002	0.009	0.007	
P1 GPS+GLONASS	3761969.010	-4367820.970	-2722506.242	9	0.006	0.007	0.004	
P1 GPS+GALILEO	3761968.996	-4367820.926	-2722506.221	10	0.004	0.005	0.002	
P2 MULTI	3761968.989	-4367820.942	-2722506.254	16	0.001	0.004	0.006	
P2 GPS	3761968.992	-4367820.878	-2722506.205	7	0.002	0.009	0.010	
P2 GPS+GLONASS	3761968.962	-4367820.914	-2722506.224	9	0.005	0.005	0.003	
P2 GPS+GALILEO	3761968.966	-4367820.885	-2722506.216	10	0.004	0.005	0.003	
M1 MULTI	3761968.946	-4367820.893	-2722506.193	19	0.002	0.003	0.008	
M1 GPS	3761968.943	-4367820.943	-2722506.200	6	0.002	0.010	0.013	
M1 GPS+GLONASS	3761968.944	-4367820.893	-2722506.186	10	0.004	0.008	0.003	
M1 GPS+GALILEO	3761968.945	-4367820.887	-2722506.189	13	0.004	0.007	0.003	
M2 MULTI	3761968.926	-4367820.944	-2722506.200	15	0.002	0.003	0.006	
M2 GPS	3761968.898	-4367820.906	-2722506.200	5	0.003	0.003	0.010	
M2 GPS+GLONASS	3761968.943	-4367820.97	-2722506.209	9	0.005	0.007	0.003	
M2 GPS+GALILEO	3761968.959	-4367820.987	-2722506.219	9	0.004	0.006	0.002	
M1 MULTI	3761970.991	-4367819.799	-2722505.323	14	0.001	0.002	0.004	TRIPÉ
M1 GPS	3761971.011	-4367819.767	-2722505.329	5	0.002	0.009	0.007	
M1 GPS+GLONASS	3761971.004	-4367819.824	-2722505.338	9	0.004	0.004	0.003	
M1 GPS+GALILEO	3761971.005	-4367819.779	-2722505.328	8	0.003	0.005	0.002	
M2 MULTI	3761970.966	-4367819.750	-2722505.340	18	0.001	0.003	0.005	
M2 GPS	3761970.987	-4367819.711	-2722505.312	8	0.002	0.009	0.010	
M2 GPS+GLONASS	3761970.992	-4367819.72	-2722505.336	11	0.007	0.006	0.003	
M2 GPS+GALILEO	3761970.969	-4367819.717	-2722505.327	12	0.004	0.005	0.003	
M1 MULTI	3761970.962	-4367819.742	-2722505.294	19	0.002	0.003	0.005	
M1 GPS	3761970.961	-4367819.810	-2722505.307	4	0.002	0.010	0.011	
M1 GPS+GLONASS	3761970.968	-4367819.764	-2722505.290	9	0.005	0.008	0.003	
M1 GPS+GALILEO	3761970.962	-4367819.751	-2722505.298	10	0.004	0.005	0.003	
M2 MULTI	3761970.985	-4367819.796	-2722505.327	7	0.001	0.002	0.004	
M2 GPS	3761970.967	-4367819.771	-2722505.322	6	0.002	0.003	0.009	
M2 GPS+GLONASS	3761970.98	-4367819.798	-2722505.331	6	0.003	0.005	0.002	
M2 GPS+GALILEO	3761970.986	-4367819.805	-2722505.327	9	0.004	0.006	0.002	

**DIA 4**

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n(m)$	$\sigma_e(m)$	$\sigma_u(m)$	
P1 MULTI	3761968.931	-4367820.983	-2722506.240	20	0.001	0.003	0.004	BASTÃO
P1 GPS	3761968.940	-4367820.867	-2722506.187	8	0.002	0.010	0.012	
P1 GPS+GLONASS	3761968.918	-4367820.959	-2722506.219	12	0.004	0.006	0.003	
P1 GPS+GALILEO	3761968.939	-4367820.961	-2722506.233	13	0.003	0.005	0.003	
P2 MULTI	3761968.928	-4367820.971	-2722506.224	23	0.001	0.001	0.004	
P2 GPS	3761968.889	-4367820.981	-2722506.221	8	0.001	0.004	0.006	
P2 GPS+GLONASS	3761968.927	-4367820.964	-2722506.222	15	0.003	0.004	0.002	
P2 GPS+GALILEO	3761968.902	-4367820.98	-2722506.231	14	0.004	0.005	0.003	
M1 MULTI	3761970.952	-4367819.788	-2722505.316	21	0.001	0.003	0.005	TRIPÉ
M1 GPS	3761971.033	-4367819.747	-2722505.312	8	0.002	0.010	0.013	
M1 GPS+GLONASS	3761970.952	-4367819.764	-2722505.299	12	0.004	0.006	0.004	
M1 GPS+GALILEO	3761970.969	-4367819.814	-2722505.332	13	0.003	0.005	0.003	
M2 MULTI	3761970.972	-4367819.783	-2722505.334	23	0.001	0.001	0.003	
M2 GPS	3761970.935	-4367819.781	-2722505.330	8	0.001	0.004	0.005	
M2 GPS+GLONASS	3761970.974	-4367819.787	-2722505.338	15	0.002	0.003	0.002	
M2 GPS+GALILEO	3761970.942	-4367819.765	-2722505.324	14	0.003	0.003	0.002	

**DIA 5**

	X (m)	Y (m)	Z (m)	ns	$\sigma_n(m)$	$\sigma_e(m)$	$\sigma_u(m)$	
P1 MULTI	3761968.982	-4367820.956	-2722506.241	21	0.001	0.003	0.003	BASTÃO
P1 GPS	3761968.955	-4367820.965	-2722506.248	7	0.001	0.007	0.008	
P1 GPS+GLONASS	3761968.979	-4367820.974	-2722506.254	12	0.003	0.005	0.003	
P1 GPS+GALILEO	3761968.965	-4367820.946	-2722506.233	13	0.003	0.004	0.002	
P2 MULTI	3761968.971	-4367820.903	-2722506.215	19	0.001	0.001	0.004	
P2 GPS	3761968.895	-4367820.880	-2722506.183	6	0.002	0.002	0.008	
P2 GPS+GLONASS	3761968.965	-4367820.934	-2722506.209	11	0.005	0.006	0.004	
P2 GPS+GALILEO	3761968.937	-4367820.874	-2722506.198	12	0.004	0.004	0.002	
M1 MULTI	3761970.979	-4367819.773	-2722505.366	20	0.001	0.003	0.003	TRIPÉ
M1 GPS	3761970.979	-4367819.774	-2722505.381	7	0.001	0.007	0.008	
M1 GPS+GLONASS	3761970.995	-4367819.791	-2722505.383	11	0.003	0.004	0.002	
M1 GPS+GALILEO	3761970.967	-4367819.766	-2722505.362	13	0.003	0.004	0.002	
S1 MULTI	3761975.003	-4367817.479	-2722503.402	21	0.001	0.001	0.004	
S1 GPS	3761974.989	-4367817.482	-2722503.394	7	0.002	0.002	0.008	
S1 GPS+GLONASS	3761974.996	-4367817.496	-2722503.396	12	0.003	0.004	0.002	
S1 GPS+GALILEO	3761974.975	-4367817.444	-2722503.39	14	0.004	0.004	0.002	