

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAIQUE NILSON DO NASCIMENTO AMARAL

CONTROLE DE QUALIDADE NA ESTIMATIVA DO ATRASO INSTRUMENTAL NO
POSICIONAMENTO GNSS: IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO

CURITIBA

2022

CAIQUE NILSON DO NASCIMENTO AMARAL

CONTROLE DE QUALIDADE NA ESTIMATIVA DO ATRASO INSTRUMENTAL NO
POSICIONAMENTO GNSS: IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO

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

Orientador: Prof. Dr. Ivandro Klein
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Jr.

CURITIBA

2022

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

Amaral, Caique Nilson do Nascimento

Controle de qualidade na estimativa do atraso instrumental no posicionamento GNSS: implementação e avaliação / Caique Nilson do Nascimento Amaral – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Prof. Dr. Ivandro Klein

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Jr.

1. Ionosfera. 2. Controle de qualidade. 3. Sistema de Posicionamento Global. I. Klein, Ivandro. II. Oliveira Jr., Paulo Sérgio de. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



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 **CAIQUE NILSON DO NASCIMENTO AMARAL** intitulada: **CONTROLE DE QUALIDADE NA ESTIMATIVA DO ATRASO INSTRUMENTAL NO POSICIONAMENTO GNSS: IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO**, 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, 25 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

19/04/2022 15:09:03.0

IVANDRO KLEIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

19/04/2022 20:52:17.0

TIAGO LIMA RODRIGUES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

19/04/2022 19:14:19.0

HAROLDO ANTONIO MARQUES

Avaliador Externo (INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA)

*Ao meu Avô, que não pôde
acompanhar toda minha jornada,
mas sempre estará presente.*

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pela dádiva da vida e por proporcionar as forças encontradas em todas as etapas de dificuldade, me permitindo superar os obstáculos da vida e chegar até aqui.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela oportunidade em ingressar no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) de maneira gratuita e com a melhor qualidade de ensino oferecida.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Ivandro Klein e Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Jr., pela dedicação e auxílio no meu trabalho, além das conversas, conselhos e risadas que fizeram parte dessa jornada, me proporcionando um amplo crescimento profissional e pessoal.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de financiamento ao ingressar na Pós-Graduação.

Aos meus pais José e Celina Amaral, que apoiaram, incentivaram e financiaram toda minha jornada no ensino superior, e meu irmão Caio Amaral, por todo apoio e companheirismo.

Aos queridos amigos Manoel Ribeiro, Ruan Oliveira, Nelson Neto e Marcela Mello que estiveram presentes durante toda minha jornada, apoiando, incentivando e nunca desistindo de mim.

Em especial ao meu querido amigo e irmão de profissão Hugo Lopes por toda dedicação, trabalho, discussões, companheirismo e amizade durante estes anos que unificaram nossas vidas.

*“Se você for mudar o mundo,
Não peça permissão.”*

Viktor, League of Legends.

RESUMO

Com a abrangência das tecnologias de aquisição de dados espaciais, suas aplicações vêm sendo cada vez mais empregadas na sociedade partindo da necessidade de realizar o posicionamento de maneira acurada utilizando o *GNSS* (Global Navigation Satellite System). Haja vista que a refração ionosférica é uma das principais fontes de erro no GNSS, sua correta modelagem é de extrema importância para a realização do posicionamento. O erro devido à esta refração nos sinais *GNSS* é diretamente proporcional ao *TEC* (Total Electron Content). Entretanto, para o cálculo do *TEC* a partir das observáveis *GNSS*, torna-se necessária a utilização dos valores do efeito da tendência instrumental do satélite e do receptor. Este efeito é resultante dos atrasos que o sinal *GNSS* sofre ao percorrer o hardware do satélite e do receptor. A estimativa dos efeitos instrumentais assim como sua devida correção no atraso ionosférico já vem sendo aplicada e se demonstrando eficaz. Há estudos onde são analisados os efeitos ionosféricos sem a correção da tendência instrumental do receptor em comparação com os mesmos corrigidos desta tendência. Tais estudos, demonstram que a correção destes valores de tendência acarretam em diferenças entre os atrasos ionosféricos estimados para estações próximas (linhas de base inferiores a 1 km) da ordem de decímetros as quais antes da correção das tendências de *hardware* apresentavam discrepâncias métricas. Porém, ainda se tem a necessidade de averiguar a presença de outliers nas observações dos modelos implementados. Dito isto, o objetivo principal dessa pesquisa é realizar a aplicação do controle de qualidade por meio do método *Data Snooping* (DS) nas observáveis ionosféricas obtidas através do PPP com resolução de ambiguidades, visando aprimorar a estimativa dos valores de tendência instrumental do receptor e, conseqüentemente, a qualidade do posicionamento e navegação *GNSS*. Com isso, foram testados níveis de significância para a aplicação do procedimento de controle de qualidade, resultando no nível ideal de 0,4% onde a partir deste obteve-se uma menor variabilidade nos valores diários de atraso instrumental. Para aplicação do método, foram utilizados dois pares de estações *GNSS*, cada par com distâncias próximas, porém em regiões distintas do globo. Foi analisado o período de dados de um mês para essas estações, no qual atentou-se em escolher um período onde não havia alta perturbação na ionosfera para que as análises não fossem tendenciosas. Após a aplicação da metodologia proposta, foi identificada a redução de cerca de 90% e 80% na variação média do atraso ionosférico corrigido em relação ao atraso sem a aplicação do DS, demonstrando assim a eficiência de um controle de qualidade rigoroso nesta estimativa.

Palavras chave: Tendência Instrumental, Controle de Qualidade, PPP, Atraso Ionosférico, Observável Ionosférica.

ABSTRACT

With the scope of space technologies, their applications have been increasingly used in society based on the need to accurately position them using the GNSS (Global Navigation Satellite System). Considering that the ionospheric refraction is one of the main sources of error in GNSS, its correct modeling is extremely important to carry out the positioning. The error due to this refraction in GNSS signals is proportional to the TEC (Total Electron Content). However, to calculate the TEC from the GNSS observables, it is necessary to use the values of the hardware delay effect of the satellite and the receiver. This effect is the result of the delays that the GNSS signal undergoes when traveling through the satellite and receiver hardware. The estimation of instrumental effects as well as its proper correction in ionospheric delay has already been applied and has proven to be effective, studies where the ionospheric error is analyzed without the estimation of the instrumental tendency of the receiver and compared with ionospheric error corrected for this tendency, show that the correction of these values resulted in a difference between stations in the place of decimeters where it was metric before. However, there is still a need to investigate the presence of outliers in these implemented models. That said, the main objective of this research is to carry out the application of quality control through the Data Snooping method on the ionospheric observables obtained through the PPP with ambiguity resolution, aiming to improve the estimation of the instrumental bias values of the receiver and, consequently, the quality and navigation of GNSS positioning. Thus, significance levels were tested for the application of the quality control procedure, resulting in the ideal level of 0.4%, from which a smaller variability in the daily values of instrumental delay was obtained. For the model apply, two pairs of GNSS stations were used, each pair with short baselines, but in different regions of the globe, the data period of one month for these stations was analyzed, taking care to choose a period where not there was high disturbance in the ionosphere so that the analyzes were not biased. After applying the proposed methodology, a reduction of about 90% and 80% was identified in the average variation of the corrected ionospheric delay in relation to the delay without the application of DS, thus demonstrating the efficiency of a rigorous quality control in this estimate.

Keywords: Hardware Delay, Quality Control, PPP, Ionospheric Delay, Ionospheric Observable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O sistema GNSS.	21
Figura 2 - Fase da onda portadora.	23
Figura 3 - Posicionamento absoluto.	26
Figura 4 - Localização das estações utilizadas.	35
Figura 5 - Metodologia implementada.	36
Figura 6 - Procedimento adotado para o Data Snooping.	38
Figura 7 - Níveis de significância testados.	39
Figura 8 - Atraso instrumental para as estações analisadas sem aplicação do DS.	41
Figura 9 - Atraso instrumental para as estações analisadas com aplicação do DS.	45
Figura 10 - Porcentagem de variação diária da tendência instrumental.	47
Figura 11 - Observável Ionosférica no dia 61 para o par de estações KAWE e MAYG.	47
Figura 12 - Observável Ionosférica no dia 61 para o par de estações TLIA e TLSE.	48
Figura 13 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações KAWE e MAYG s/CQ.	49
Figura 14 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações KAWE e MAYG s/CQ.	49
Figura 15 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações TLSE e TLIA s/ CQ.	50
Figura 16 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações TLSE e TLIA s/ CQ.	50
Figura 17 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações KAWE e MAYG c/CQ.	51
Figura 18 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações KAWE e MAYG c/CQ.	51
Figura 19 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações TLSE e TLIA c/ CQ.	52
Figura 20 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações TLSE e TLIA c/ CQ.	52
Figura 21 - Redução na diferença entre os atrasos ionosféricos (TLSE-TLIA).	55
Figura 22 - Redução na diferença entre os atrasos ionosféricos (KAWE-MAYG).	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Pseudodistância.....	22
Equação 2 – Fase da Onda Portadora.....	23
Equação 3 – Posição Estimada da Solução Fixa.....	28
Equação 4 – Efeito Ionosférico para Pseudodistância.....	29
Equação 5 – Efeito Ionosférico para Fase da Portadora.....	29
Equação 6 – Tendência Diferencial do Código para o Satélite.....	29
Equação 7 – Tendência Diferencial do Código para o Receptor.....	29
Equação 8 – Observável Ionosférica em função do TEC e da Tendência Instrumental.....	30
Equação 9 – Cálculo do TEC.....	30
Equação 10 - função de mapeamento para transformar STEC em VTEC dada em relação ao ângulo de elevação dos satélites.....	30
Equação 11 – Observável Ionosférica.....	30
Equação 12 – Parâmetro VTEC Horário.....	31
Equação 13 – Parâmetro VTEC Horário Reescrito.....	31
Equação 14 – Estimação dos Parâmetros Minimizando a Soma do Quadrado dos Resíduos.....	31
Equação 15 – Hipótese Nula e Alternativa.....	32
Equação 16 – Estatística de Teste	33
Equação 17 – Estatística de Teste quando as observações não possuem correlação.....	33
Equação 18 – Condição para rejeição das Hipóteses.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Qualidade das Efemérides Precisas do IGS	26
Tabela 2 - Estações GNSS utilizadas.	35
Tabela 3 – Valores do atraso instrumental calculado sem aplicação do DS.	40
Tabela 4 - Quantitativo de observações presentes do modelo pra as estações KAWE e MAYG.	41
Tabela 5 - Quantitativo de observações presentes do modelo pra as estações TLSE e TLIA..	42
Tabela 6 - Valores do atraso instrumental calculado com a aplicação do DS.....	43
Tabela 7 – Porcentagem de variação diária do atraso instrumental.	45
Tabela 8 - Estatísticas do atraso ionosférico calculadas entre as estações TLSE e TLIA.....	53
Tabela 9 - Estatísticas do atraso ionosférico calculadas entre as estações KAWE e MAYG. .	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BKG/BNC	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Ntrip Client</i>
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimator</i>
CQ	Controle de Qualidade
CRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DD	Duplas Diferenças
DGNSS	<i>Differential GNSS</i>
DS	<i>Data Snooping</i>
EUREF	<i>European Reference Frame</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GIOVE	<i>Galileu In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IFB	<i>Inter-Frequency Bias</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IPP	<i>Ionospheric Piercing Point</i>
IRI	<i>International Rerefence for Ionosphere</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz de Variância e Covariância
NL	<i>Narrow-Lane</i>

NRCan	<i>Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
PP	Posicionamento por Ponto
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPP-WIZARD	<i>PPP – With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator</i>
RGP	<i>Réseau GNSS Permanent</i>
RT-PPP	<i>Real Time PPP</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SSR	<i>State Space Representation</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
UPDs	<i>Uncalibrated Phase Delays</i>
WL	<i>Wide-Lane</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Caracterização do Assunto	16
1.2	Objetivos	19
1.3	Justificativa.....	19
1.4	Organização do trabalho.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Posicionamento GNSS	21
2.2	Observáveis GNSS	22
2.3	Efeitos Envolvendo as Observáveis GNSS.....	24
2.4	Métodos de posicionamento pelo GNSS.....	25
2.2.1	Posicionamento Absoluto	25
2.3.1	PPP em tempo real	27
2.3.2	Fixação das ambiguidades no PPP.....	27
2.4	Efeito e Modelagem da ionosfera.....	28
2.5	Influência da tendência instrumental do receptor e dos satélites	29
2.3	Controle de Qualidade.....	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Conjunto de dados.....	34
3.2	Métodos.....	35
3.3	Controle de Qualidade.....	37
4	RESULTADOS E ANÁLISES	39
4.1	Estimativa do Atraso instrumental	39
5	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A – OBSERVÁVEL IONOSFÉRICA KAWE-MAYG.....	63
	APÊNDICE B – OBSERVÁVEL IONOSFÉRICA TLIA-TLSE	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Assunto

As tecnologias de aquisição de dados espaciais são amplamente empregadas na sociedade atual. Tendo em vista a necessidade de realizar o posicionamento de maneira mais acurada, tornou-se recorrente a utilização do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), termo este que engloba os sistemas globais de navegação com suas devidas infraestruturas espaciais e sistemas de aumento. Os dados transmitidos por este sistema estão suscetíveis a erros referentes aos satélites que formam este sistema ou a propagação do sinal dos mesmos para o satélite-receptor. Estes erros podem ser modelados, reduzidos ou eliminados variando de acordo com o método de posicionamento empregado ou da finalidade deste (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Os métodos de posicionamento pelo GNSS podem ser dados de forma relativa, absoluta, diferencial ou em redes. No posicionamento relativo, é feita a determinação das coordenadas de um ponto com base em outro com coordenadas conhecidas e precisas, e a maioria dos efeitos relativos à ionosfera são reduzidos utilizando as DD (Duplas Diferenças). No método DGNSS (*Differential GNSS*) um receptor coleta dados em uma estação de referência, calculando-se correções para as coordenadas ou para as pseudodistâncias transmitindo estas para determinado usuário em uma estação de interesse. Já no posicionamento absoluto ou por ponto, quando se tem a utilização de receptores de dupla frequência, o efeito relativo à ionosfera pode ser mitigado com a utilização da combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*), onde esta elimina os efeitos de primeira ordem que representam a maior parte do atraso causado pela ionosfera nas medidas GNSS. Todavia, a combinação *ion-free* afeta as ambiguidades, assim como realça outros erros na propagação do sinal, a exemplo do multicaminho (SEEBER, 2003; MARQUES, 2008; HOFFMAN-WELLENHOF et al. 2008; MONICO, 2008; KAPLAN & HEGARTY 2017).

Um dos métodos de posicionamento a partir do GNSS mais usuais atualmente é o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) podendo ser realizado em tempo real ou pós-processado. Tal método proporciona ao usuário acurácia centimétrica nas coordenadas, porém, se tem a necessidade de utilizar as informações de órbita e relógio dos satélites GNSS com alta precisão. Adicionalmente, a implementação de processos que minimizam os efeitos sistemáticos, tais efeitos como: troposfera, ionosfera, multicaminho, perdas de ciclo, atrasos de *hardware*, dentre outros (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; HOFFMAN-WELLENHOF et al. 2008, ROCHA, 2015).

O PPP tem como base o conceito de SSR (*State Space Representation*) que utiliza uma rede de estações de referência provendo a cobertura de uma extensa área. A rede utilizada para estimativa de correções SSR irá habilitar a modelagem dos erros espacialmente correlacionados e, posteriormente, um serviço transmissão das correções para usuários via internet ou satélite pode ser adotado. Quando estas correções são geradas para emprego em tempo real (como correções de órbita e satélite) temos o que pode ser chamado de RT-PPP (Real Time PPP), recebendo dados do IGS (*International GNSS Service*) e seus demais centros de análise (KOUBA & HEROUX, 2001; OLIVEIRA JR. MONICO & MOREL, 2020).

A ionosfera é tomada como a principal fonte de erros sistemáticos no posicionamento pelo GNSS, sendo responsável por diversas anomalias e degradações nos sinais eletromagnéticos dos satélites GNSS (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003). Para os efeitos de primeira ordem, a magnitude do erro nos sinais GNSS referente ao efeito ionosférico é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e proporcional ao TEC (*Total Electron Content*). O TEC representa a quantidade de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o satélite até o receptor. Os efeitos ionosféricos variam de acordo com a hora local do dia, sazonalidade, ciclo solar, localidade geográfica, dentre outros (LEICK, 1995; CAMARGO, 1999; MENDONÇA, 2013). Contudo, o TEC não é obtido de maneira direta pelas observações GNSS, sendo possível estimá-lo a partir da diferença entre sinais de frequências distintas. Isso devido ao caráter dispersivo da ionosfera e o índice de refração diferente para cada onda de rádio ou sinal GNSS (HONG, 2007; ARIKAN et al., 2008).

Além dos efeitos já citados, o TEC obtido via observáveis GNSS é acompanhado do erro entre as frequências (IFB- *Inter-Frequency Bias*), gerado pelos diferentes atrasos de hardware nas diferentes portadoras. Um exemplo deste efeito é a tendência diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*), como o próprio nome já sugere, a diferença de atrasos trata-se de um efeito instrumental referente ao atraso no código das portadoras (HONG, 2007; ARIKAN et al., 2008, PROL, 2014).

Nos últimos anos, foram desenvolvidas técnicas para fixar as ambiguidades, presentes nas medidas de fase da onda portadora, para valores inteiros no PPP. Isso permite redução do tempo de convergência e melhora a acurácia posicional nos instantes iniciais do rastreamento. Nessas pesquisas as ambiguidades solucionadas a partir da combinação *ion-free* não são utilizadas, ao invés destas são usadas as combinações *Wide-Lane* (WL) e *Narrow-Lane* (NL). Dessa forma, o tempo de convergência da solução é reduzido em cerca de 90% quando as ambiguidades são fixadas. Tais fatores se tornaram essenciais para estimação dos UPDs (*Uncalibrated Phase*

Delays) (GABOR & NEREM, 1999; FENG, 2008; GE et al., 2008, COLINS et al., 2010; BERTIGER et al., 2010; LI & ZANG, 2012; XI et al 2013).

Dada a importância no contexto de solução das ambiguidades, o entendimento e mitigação do efeito dos atrasos instrumentais vem tomando cada vez mais seu espaço na literatura GNSS. Alguns métodos para estimativa das tendências diferenciais podem ser citados como a utilização dos mapas globais da ionosfera (SCHAER, 1999), Simple Diferença no Posicionamento Relativo (CAMARGO et al., 2012), Estimativa da tendência instrumental por média aritmética (PROL & CAMARGO, 2014), utilizando mais de uma estação nas duplas diferenças no GNSS (SARDON et al., 1994; WARNANT, 1997; MAKELA et al., 2001; HERNANDEZ-PAJARES et al., 2004), mínimos quadrados para estimar atraso instrumental a partir de uma estação (LANYI & ROTH, 1988; COCO et al., 1991; JAKOWSKI et al., 1996; WARNANT, 1997; LIN, 2001; KEE & YUN, 2002; OTSUKA et al., 2002; CHEN et al., 2004) dentre outros.

Um procedimento para estimar este efeito instrumental (do satélite e do receptor) foi implementado por Otsuka et al. (2002), utilizando as observáveis ionosféricas obtidas a partir da combinação livre de geometria (*geometry-free*) em conjunto das pseudodistâncias suavizadas pela onda portadora. Com base nisso Oliveira Jr., Monico e Morel (2020), implementaram este mesmo procedimento, porém ao invés de utilizar as observáveis ionosféricas provenientes da *geometry-free* foram empregadas as observáveis ionosféricas provenientes do PPP com solução de ambiguidade (PPP-AR) geradas através do *software* PPP-WIZARD (PPP – *With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator*).

Na obra de Oliveira Jr., Monico e Morel (2020), onde foi analisado o erro ionosférico sem a estimativa da tendência instrumental do receptor, foi notado que o erro ionosférico estimado no PPP-RTK (i.e., PPP em tempo real com fixação das ambiguidades) está enviesado (contaminado) pelo erro instrumental, então como se trata de uma observável ionosférica, posteriormente a mesma foi comparada com o atraso ionosférico obtido através da correção desta tendência presente nas observáveis ionosféricas.

A correção destes valores de tendência acarretam em diferenças entre os atrasos ionosféricos estimados para estações próximas (linhas de base inferiores a 1 km) da ordem de decímetros as quais antes da correção das tendências de hardware apresentavam discrepâncias métricas. Apesar disso, cada estação analisada na obra possuía dezenas de milhares de observações, ou seja, se tratando uma quantidade extensa de observações no modelo, há uma

possibilidade de uma porcentagem destes dados estarem contaminados por erros de larga magnitude, por isso ainda se tem a oportunidade de verificar a presença de *outliers* no conjunto de dados utilizados para a estimativa do atraso instrumental. Dito isto, a aplicação de uma técnica para realizar o controle de qualidade das observáveis nesta modelagem já implementada se torna essencial, pois com a possível remoção de *outliers* os dados serão mais confiáveis quando utilizados para estimativa do atraso instrumental e consequentemente resultarão em posicionamento de maior acurácia.

1.2 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa é investigar o impacto do controle de qualidade (CQ) de observáveis na estimativa do atraso instrumental do receptor, por meio do procedimento *Data Snooping* (DS). Como objetivos específicos tem-se:

- Encontrar o nível de significância para o DS que melhor se aplica nesta estimativa;
- Avaliar a estabilidade do atraso instrumental estimado por meio de séries temporais com e sem CQ;
- Avaliar a diferença entre o erro ionosférico estimado com e sem CQ para pares de estações muito próximas

1.3 Justificativa

Uma estimativa mais robusta da tendência instrumental do receptor pode contribuir em diversas frentes de pesquisa acadêmica e industrial. São muitos os segmentos que podem se beneficiar dos resultados dessa pesquisa. O resultado por trás da estimativa da tendência de hardware do receptor é uma possível correção ionosférica mais próxima da realidade física. Estima-se o TEC livre da tendência diferencial para depois ser aplicado no posicionamento com uma frequência. Dessa forma, qualquer melhora no quesito qualidade posicional para o posicionamento GNSS se torna essencial, principalmente em tempo real, já que para isso não se tem a necessidade de uma densa rede de estações ativas, a exemplo da navegação aérea, posicionamento de veículos para navegação autônoma, posicionamento em *smartphones*, locações de obra, agricultura de precisão e também os levantamentos em Geodésia e Topografia poderão ser realizados de forma mais acurada e com maior nível de confiabilidade.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, onde são apresentados os principais conceitos teóricos envolvidos nesse estudo. O Capítulo 3 expõe a metodologia que foi implementada na pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos até o presente momento assim como suas respectivas análises. O Capítulo 5 traz as perspectivas futuras acerca da pesquisa e por fim as referências utilizadas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

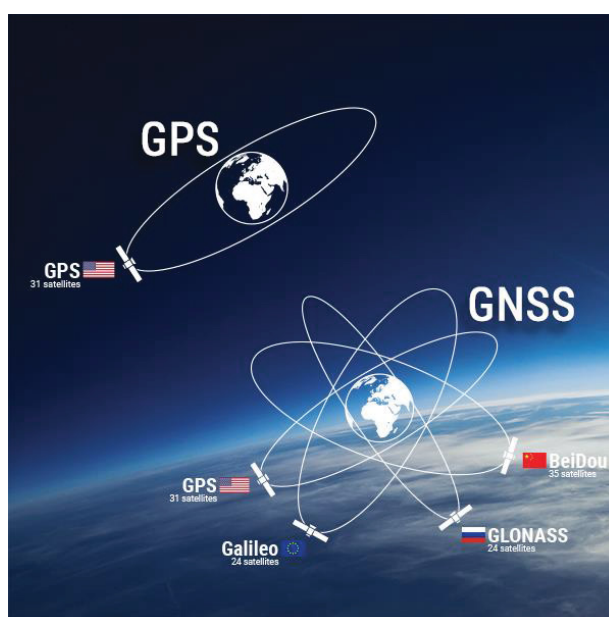
Nesta seção serão apresentados conceitos sobre os principais temas que serviram de arcabouço para a realização desta pesquisa.

2.1 Posicionamento GNSS

Os sistemas de navegação por satélite tiveram seu início na segunda metade do século XX, com propósito de determinar a posição em qualquer local no planeta dependendo ou não de condições meteorológicas. Os pioneiros neste âmbito foram os Estados Unidos com o desenvolvimento do GPS (*Global Positioning System*) e a antiga União Soviética com o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), projeto esse que atualmente é conduzido pela Rússia. Estes sistemas foram os primeiros a dispor de uma constelação completa (MONICO, 2008).

A União Europeia desenvolveu o GALILEO como seu sistema de navegação, com seu primeiro satélite experimental denominado GIOVE (*Galileu In-Orbit Validation Element*) lançado em 2005. Similarmente, a China também desenvolveu seu sistema em meados de 1983, tendo como princípio a utilização de satélites geoestacionários e de órbita média para melhorar a navegação e o posicionamento. Inspirado no passado do país com a criação da bússola, o sistema foi denominado de BEIDOU/COMPASS (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; KAPLAN, 2017).

Figura 1 - O sistema GNSS.



Fonte: Mobatime (2021).

A união destes serviços em conjunto com seus respectivos sistemas de aumento, como exemplo o SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground Based Augmentation System*), formam o que é conhecido como GNSS. O GNSS é composto por três segmentos: Espacial, que está relacionado com a constelação de satélites e seus sinais; Controle, responsável pela manutenção do sistema, monitorando e controlando estes, assim como a determinação do sistema de tempo e a predição das efemérides; e Usuário, que está associado aos receptores e seus devidos fins, assim como as organizações que os utilizam (civil e militar) (SEEBER, 2003; MONICO, 2008, LEICK, 2015).

2.2 Observáveis GNSS

As observáveis de navegação por satélite são distâncias deduzidas das diferenças de tempo ou fase, medidas com base na comparação entre os sinais recebidos e os gerados pelo receptor. Dito isto, é possível identificar quatro observáveis GNSS básicas obtidas através dos sinais transmitidos pelos satélites (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOLF et al., 2008):

- Pseudodistâncias de medidas do código;
- Diferenças das pseudodistâncias a partir da contagem doppler;
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora; e
- Diferenças no tempo de propagação do sinal a partir de medições de interferometria.

Destes quatro tipos de observáveis, a pseudodistância e a fase da onda portadora são consideradas como mais importantes, estão presentes nos arquivos RINEX e em geral empregadas no posicionamento.

A pseudodistância trata-se do cálculo da distância entre o satélite e o receptor através de uma medida. Esta medida corresponde ao deslocamento de tempo necessário para igualar a cópia do código gerado no receptor com o gerado no satélite. Como os códigos são os mesmos, a diferença entre o envio e a recepção do sinal pelo receptor é o tempo de propagação satélite-receptor do sinal. Contudo, a medida é feita por distintos relógios e eles não são sincronizados entre si e com o sistema de tempo GNSS ao qual pertencem. Esse não sincronismo é conhecido como erro do relógio (satélite ou receptor), e por conta deste erro que a observável é denominada pseudodistância e não somente distância (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOLF et al., 2008). Segundo Monico (2008), a equação que demonstra esta observável pode ser dada por:

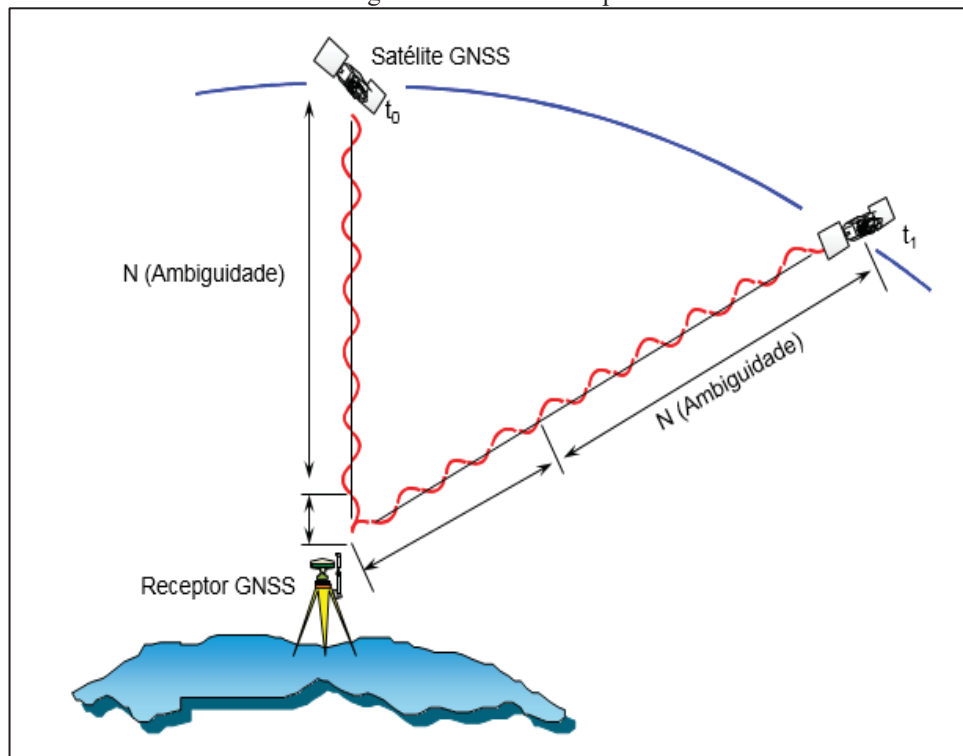
$$PD_R^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_r^S + T_R^S + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r}^S, \quad (1)$$

onde:

- c : é o módulo da velocidade da luz no vácuo, em metros por segundos;
- ρ_r^S : é a distância geométrica entre sinal do satélite no instante da transmissão e do receptor no instante da recepção, em metros;
- I_r^S : é o efeito devido à refração ionosférica, em metros;
- T_R^S : é o atraso devido à refração troposférica, em metros;
- dm_r^S : é o erro de multicaminho, em metros; e
- ε_{PDR}^S : é o erro da pseudodistância devido a efeitos não modelados e aleatórios, em metros.

A fase de batimento da onda portadora, ou somente fase da onda portadora, pode ser considerada uma observável mais precisa do que a pseudodistância. Ela é dada pela a partir da diferença de fase que é gerada no satélite e é recebido no receptor, e a fase gerada no receptor, no instante de recepção. (MONICO, 2008).

Figura 2 - Fase da onda portadora.



Fonte: Adaptado de Monico (2008).

A fase da onda portadora pode ser dada, em ciclos, por:

$$\phi_r^s(t) = f \cdot \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f \cdot [dt_r(t) - dt^s] + \phi_t^s(t_0) - \phi_r(t_0) + N_r^s + \varepsilon\phi_r^s \quad (2)$$

Onde:

- $\phi^s(t_0)$: é a fase inicial do satélite correspondente à época t_0 ;
- $\phi_r(t_0)$: é a fase recebida no receptor relativo à época t_0 ;
- N_r^s : é a ambiguidade de fase;
- f : é a frequência nominal da fase, em hertz;
- $\varepsilon\phi_r^s$: é o erro da fase da onda portadora, em metros.

2.3 Efeitos Envolvendo as Observáveis GNSS

Assim como qualquer observável que seja relativa a processos de medição, as observáveis GNSS estão sujeitas a erros de natureza aleatória, sistemática e grosseira. Erros sistemáticos possuem sua causa conhecida e podem ser modelados e suavizados com técnicas de processamento ou via modelagem matemática funcional. Os erros Aleatórios são inevitáveis e caracterizados como propriedades inerentes a observação. Por fim os erros grosseiros são provenientes de falhas humanas ou mau funcionamento do aparelho utilizado, este erro deve ser eliminado ou amenizado de acordo com sua respectiva origem. Assim como sua detecção pode ser feita através da implementação de testes estatísticos (MARINI, 2002; POLEZEL, 2010).

Os erros destacados comumente são agrupados em quatro categorias que são relacionadas as suas respectivas fontes, o quadro 1 apresenta essa relação. Explicações sobre estes erros, equacionamentos e técnicas para atenuação dos mesmos podem ser encontrado em Mônico (2008).

Quadro 1 - Fontes dos erros nas Observáveis.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da Órbita
	Erro do Relógio
	Relatividade
	Atraso nas duas portadoras no hardware do satélite
Propagação do sinal	Refração troposférica
	Refração Ionosférica
	Perdas de Ciclos
	Efeitos de multicaminho

	Rotação da terra
Receptor/Antena	Erro do Relógio
	Erro entre os canais
	Centro de fase da antena
	Fase wind-up
Estação	Erro nas coordenadas
	Multicaminho
	Marés Terrestres
	Movimento do Polo
	Carga Oceânica
	Pressão Atmosférica

Fonte - Adaptado de Monico (2008).

2.4 Métodos de posicionamento pelo GNSS

O posicionamento é constituído pela coleta de pontos de interesse em um respectivo referencial. Os métodos de posicionamento mais empregados são: Absoluto, Relativo e DGNSS (*Differential GNSS*), onde seu objeto de interesse pode estar em repouso ou em movimento, com suas coordenadas podendo ser obtidas em tempo real ou pós-processadas.

No método absoluto (posicionamento por ponto) as coordenadas são referentes ao geocentro onde é necessário somente um receptor, tornando este método o mais usual em navegação de baixa precisão. No Relativo, as coordenadas são calculadas a partir de um ou mais vértices com coordenadas conhecidas, ou seja, tanto o vértice de base como o de referência necessitam realizar a coleta de forma simultânea. No DGNSS, a coleta também é feita por um receptor base e um móvel, onde as correções da pseudodistância da base são encaminhadas para o móvel, acarretando numa maior precisão nas coordenadas do móvel. (MONICO, 2008; POLEZEL, 2010). Nesta pesquisa, o interesse maior consiste no posicionamento absoluto, especialmente no PPP em tempo-real, sendo os demais fora do escopo deste trabalho.

2.2.1 Posicionamento Absoluto

O posicionamento absoluto, também denominado Posicionamento por Ponto (PP), refere-se à obtenção das coordenadas do objeto de interesse em tempo real ou pós-processado com base em observações de pseudodistância derivada do código civil C/A modulado na fase da onda portadora L1. Neste posicionamento, necessita-se apenas de um receptor, e a posição é determinada no referencial vinculado ao sistema que está sendo utilizado (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). A condição para o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é a utilização das pseudodistâncias e fase da onda portadora em duas frequências, assim como as correções de

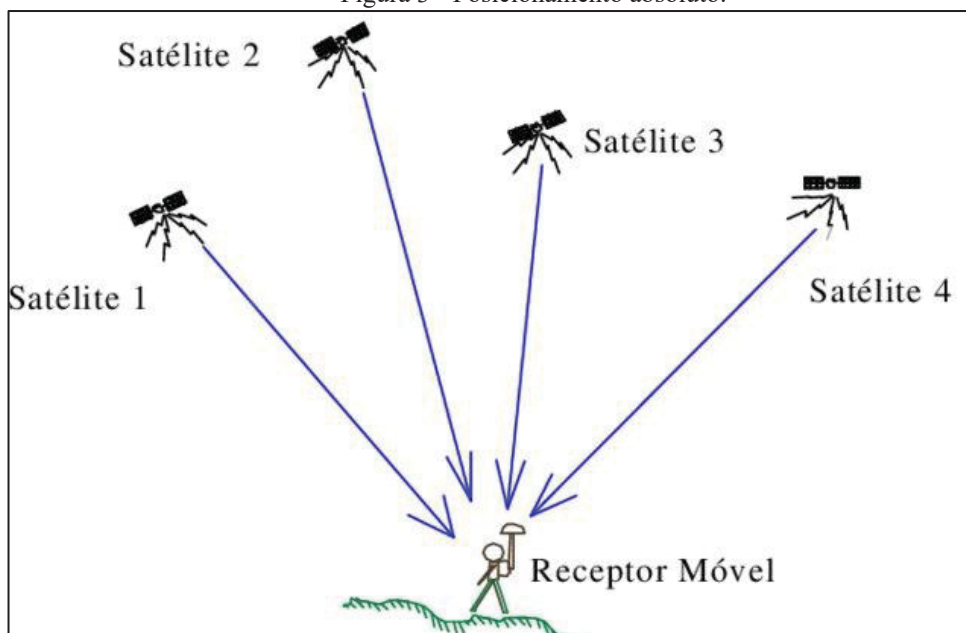
relógio e as efemérides precisas disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) (MONICO, 2008). A Tabela 1 apresenta a qualidade das efemérides precisas disponibilizadas pelo IGS. Adicionalmente, tem-se a correção de todos os erros sistemáticos envolvidos no processo de medição.

Tabela 1 - Qualidade das Efemérides Precisas do IGS

Órbita	Acurácia	Latência	Intervalo
Ultra Rápida (predita)	~5cm	Tempo Real	15 min
Ultra Rápida (observada)	~3cm	6 Horas	15 min
Rápida	~2,5cm	24 Horas	15min/5min
Final	~2,5cm	12-18 dias	15min/5min/30s

Fonte: Adaptado de IGS (2020)

Figura 3 - Posicionamento absoluto.



Fonte: Hasegawa et. al (2020).

Cabe destacar que algumas instituições têm disponibilizado serviços de PPP online, a exemplo do IBGE. O IBGE-PPP é um serviço para pós-processamento de dados GNSS totalmente online, ele permite a aquisição de coordenadas devidamente referenciadas ao SIRGAS 2000 e ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Esta plataforma faz uso do aplicativo de posicionamento CRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) desenvolvido pelo NRCan (*Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*) (IBGE, 2019).

2.3.1 PPP em tempo real

O PPP em tempo real apresenta vantagens em relação aos outros métodos de posicionamento em tempo real, pois o usuário necessita de apenas um receptor para obter uma solução posicional (MARQUES, et al. 2014). Porém, assim como no modo pós processado este método necessita de uma rede geodésica para a geração de produtos como as orbitas precisas e relógios dos satélites, torna-se necessário também realizar corretamente a modelagem dos erros relativos à propagação dos sinais GNSS com as estações tais como ionosfera, troposfera e outros (MARQUES, et al. 2014).

Contudo, para aplicação deste método se tem a necessidade da utilização das órbitas precisas ou dos erros do relógio em tempo real. Projetos como o centro de processamento do IGS e da EUREF (*European Reference Frame*) disponibilizam estas correções ao usuário, tornando viável a utilização deste método. A exemplo de aplicações práticas a nível usuário, tem-se o *software* BKG/BNC (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Ntrip Client*) que permite aplicar as correções das orbitas e do relógio disponibilizadas pelo IGS nos dados coletados no posicionamento. O compartilhamento dos dados é feito por satélites geoestacionários ou por intermédio da internet utilizando o pacote NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) com as correções viabilizadas no formato RTCM 3.X para correção das orbitas transmitidas (LEICK, 2004; MONICO, 2008; MARQUES et al., 2014).

2.3.2 Fixação das ambiguidades no PPP

A fixação de ambiguidades recebe mais atenção quando se trata de aplicações em levantamentos cinemáticos ou estáticos com um curto tempo de observação, onde as precisões são melhoradas significativamente. A solução das ambiguidades inteiras é comumente aplicada utilizando DD's das medidas de fase entre dois receptores, estas medidas são eficazes pois removem boa parte dos erros comuns no posicionamento envolvendo diferença dos sinais, facilitando a identificação das ambiguidades inteiras (LAURICHESSE et al., 2008). No entanto, nos últimos anos a solução fixa vêm tomado cada vez mais espaço quando se trata de PPP sendo considerado uma das questões mais inovadoras nas pesquisas, pois a correta fixação resultará em um posicionamento mais acurado e confiável (RIZOS, 2006; GE et al., 2008).

No PPP por se tratar de apenas um receptor envolvido, não há a formação de DD's tornando difícil a solução das ambiguidades por conta dos atrasos não calibrados da fase (UPD) com origem no satélite e no receptor. Uma vez determinado os UPD's, a solução se torna possível (LIMA et al., 2016). Ge et al. (2008), apresentou um método de solução das

ambiguidades baseado na estimativa dos UPD's da SD entre as ambiguidades dos satélites partindo de uma rede de estações GNSS, utilizando estas para solucionar as ambiguidades do PPP a nível usuário.

Para o usuário final do PPP, a solução destas ambiguidades pode ser dada por dois passos. O primeiro as simples diferenças das ambiguidades provenientes da *wide-lane* são derivadas da combinação *Melbourne-Wubbena* e então corrigidas das UPD estimadas pelos satélites (WEI & SCHWARZ, 1995; LI & ZHANG, 2015). A combinação MW elimina os atrasos relativos a ionosfera, troposfera e da distância geométrica mantendo assim a ambiguidade da WL com as observações de dupla frequência. A simples diferença das ambiguidades da WL pode ser corrigidas arredondando estas ambiguidades ao longo de várias épocas, após isso as ambiguidades da *narrow-lane* são derivadas das ambiguidades flutuantes da *ion-free* com as inteiras da WL. Então elas são fixadas após considerar as correções das UPD's da NL, uma vez que estas ambiguidades estão fortemente correlacionadas no PPP, uma estratégia baseada no método LAMBDA é aplicado para fixar as SD das ambiguidades da NL (TEUNISSEN, 1995; LI & ZHANG, 2015)

Segundo Li & Zhang (2015), a ambiguidade da *ion-free* é corrigida quando ambas, *wide* e *narrow-lane* são corrigidas, após essa validação as estimativas dos parâmetros de posição com seu real valor podem ser dadas por:

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{N}}Q_{\hat{N}}^{-1}(\hat{N} - \check{N}) \quad (3)$$

Onde, \check{b} e \hat{b} são as posições estimadas das soluções fixas e flutuantes respectivamente; \hat{N} é o vetor da ambiguidade flutuante com a matriz de variância e covariância $Q_{\hat{N}}$; \check{N} é o vetor de ambiguidade inteira e $Q_{\hat{b}\hat{N}}$ é a matriz de covariância de \hat{b} e \hat{N} .

2.4 Efeito e Modelagem da ionosfera

Devido a radiação solar, as camadas de altas altitudes da atmosfera sofrem fotoionização, tornando estas regiões com alta densidade de elétrons livres que acabam afetando na propagação de ondas de rádio nestas áreas, como as que são transmitidas pelos satélites GNSS, essa região é compreendida entre 50 a 1000 km acima da superfície terrestre, e é conhecida como ionosfera (McNAMARA, 1991; LEICK; 1995; CALDEIRA, 2016). Em resumo, a formação da ionosfera está ligada diretamente a radiação solar que incide na atmosfera terrestre. Por conta disso, seu comportamento depende do ângulo zenital solar, da estação do ano, da localização geográfica assim como o nível de atividade solar (FEDRIZZI, 1990).

As consequências dos erros ionosféricos são significantes, mesmo nas regiões com baixa atividade solar, este efeito é diretamente proporcional ao TEC que é o conteúdo total de elétrons presente ao longo do caminho que o sinal percorre. Com isso, o TEC é o parâmetro principal para quantificar o efeito ionosférico no posicionamento GNSS (DAVIES, 1990). A transformação dos valores de TEC em erro ionosférico de primeira ordem para pseudodistância e fase da portadora em uma determinada frequência i podem ser expressos por:

$$I_{irg}^S = \frac{40,3 \cdot TEC_r^S}{f_i^2}; \quad (4)$$

$$I_{ir\phi}^S = -\frac{40,3 \cdot TEC_r^S}{f_i^2}; \quad (5)$$

onde, I_{irg}^S e $I_{ir\phi}^S$ são o efeito ionosférico para pseudodistância e para as medidas de fase na portadora L_i respectivamente; f_i é a frequência da onda portadora utilizada; e TEC_r^S é o conteúdo total de elétrons existente entre o satélite (s) e o receptor (r). O TEC é dado em elétrons por metro quadrado (e/m^2), a frequência em Hertz (Hz) e a constante 40,3 é dada em Hz^2 (e/m^2), acarretando nos erros I_{irg}^S e $I_{ir\phi}^S$ dados em metros (m) (MATSOUKA e CAMARGO, 2008).

A partir das equações anteriores, pode-se observar que os erros relacionados a ionosfera para fase e pseudodistância possuem sentidos opostos, porém de mesma magnitude, sendo ambos inversamente proporcionais ao quadrado da frequência e diretamente proporcionais ao TEC (SEEBER, 2003; CALDEIRA, 2016).

2.5 Influência da tendência instrumental do receptor e dos satélites

Se tratando de posicionamento preciso utilizando o GNSS e para estimativa precisa do TEC, os efeitos relativos ao atraso instrumental devem ser removidos. Estes efeitos são decorrentes dos atrasos na propagação do sinal causados pelos *hardwares* do satélite e do receptor, as portadoras percorrem por estes componentes com velocidades distintas, então o código é demodulado, para obter essa tendência é necessário realizar a combinação entre as portadoras (ARIKAN et al., 2008; HONG, 2007; PROL & CAMARGO, 2014). Sabe-se também que estes valores não são fixos, pois apresentam valores diferentes para cada satélite e receptor, variando com o tempo e também com a localização geográfica (KAO et al. 2013; CORDEIRO, 2019). A tendência diferencial dos códigos P1 e P2, por exemplo, para satélite e receptor, pode ser dada por:

$$\Delta b_P^S = b_{P_2}^S - b_{P_1}^S, \quad (6)$$

$$\Delta b_{r,P} = b_{r,P_2} - b_{r,P_1} \quad (7)$$

Onde, b representa o tempo de propagação no hardware dos equipamentos, s e r são os índices relativos ao satélite e ao receptor, respectivamente, e P é referente às observações de código da pseudodistância em um determinado código (a exemplo P1 e P2). No posicionamento de alta precisão, este efeito é difícil de ser mitigado, afinal ele possui alta correlação com o erro devido à ionosfera (HONG, 2007; ZHANG; TEUNISSEN & YUAN, 2013).

O atraso do sinal GNSS decorrente da tendência diferencial do código (DCB) é considerado um efeito relativo de *hardware* proveniente da diferença entre o código L2 e L1. Ou seja, a estimativa destes valores de DCB são uma parte significativa na modelagem ionosférica a partir de dados GNSS quando utilizada as observáveis provenientes da *geometry-free*. Porém, para se obter uma melhor acurácia no posicionamento, tratando-se de PPP em tempo real e pós-processado, tem que ser mitigado o atraso instrumental absoluto e relacionado a fase para correta fixação das ambiguidades (HONG, 2007; KAO et al., 2012; CORDEIRO, 2019).

Para estimativa da tendência instrumental absoluta, Oliveira Jr., Monico e Morel (2020) adotaram uma estratégia que foi adaptada de Otsuka et al. (2002), onde são utilizadas como entrada, as observáveis ionosféricas obtidas através do PPP com solução das ambiguidades (PPP-AR), estimadas através do software PPP-WIZARD (PPP – *With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator*), ao invés das observáveis do código da combinação *geometry-free*. O valor mais próximo da realidade do TEC pode ser atingido com a correção da tendência instrumental do satélite e do receptor (b_r^s) em uma dada portadora, onde a observável ionosférica em um instante t pode ser obtida por:

$$I_r^s(t) = TEC_r^s(t) + b_r^s \quad (8)$$

$$TEC_r^s(t) = S(e^s(t))VTEC_r^s(t) \quad (9)$$

A equação 10 apresenta a função de mapeamento usada para transformar o TEC inclinado em VTEC é dada em relação ao ângulo de elevação dos satélites (e^s), onde:

$$S(e^s(t)) = \frac{1}{\cos \left\{ \arcsin \left[\frac{R}{R+h} \cos(e^s) \right] \right\}} \quad (10)$$

Essa função básica do mapeamento considera a ionosfera como uma camada infinitesimal com altitude h de 400 km assim como o raio da terra R , com isso, a observável ionosférica pode ser reescrita por:

$$I_r^s(t) = S(e^s(t))VTEC_r^s(t) + b_r^s \quad (11)$$

Apenas as observáveis ionosféricas de satélites com ângulos de elevação superiores a 30° foram utilizadas, reduzindo assim, problemas relacionados com a incorreta modelagem da função, assim como as medidas afetadas pelo multicaminho (OLIVEIRA JR; MONICO; MOREL, 2020). O método implementado estima por meio do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) as médias horárias de VTEC utilizando as observáveis ionosféricas de um único receptor. As tendências instrumentais são estimadas como um parâmetro adicional do modelo. Com isso, essa média horária para o VTEC pode ser dada por:

$$\overline{I_k/S(e_k^s)} = \overline{VTEC_k} + \overline{I/S(e_k^s)} b_r^s \quad (12)$$

Onde, k é o número de horas envolvida na estimação do processo e s o número de satélites que foram rastreados. A média horária do VTEC é dada como uniforme para uma camada com cerca de 1000 km na camada ionosférica. Visando minimizar os erros desta hipótese, Oliveira Jr. Monico e Morel (2020) modificaram este método implementado por Otsuka et al (2002), estimando assim os coeficientes horários para o plano ao invés de uma única média para o VTEC, considerando assim a variabilidade espacial dos efeitos ionosféricos. O parâmetro VTEC horário na equação 12 pode ser reescrito com os seguintes coeficientes:

$$\overline{VTEC_k} = \alpha_{0k} \overline{\Delta\varphi/S(e_k^s)} + \alpha_{1k} \overline{\Delta\lambda/S(e_k^s)} + \alpha_{2k} \overline{1/S(e_k^s)} \quad (13)$$

Na equação 13, $\Delta\varphi = \varphi_{IPP} - \varphi_r$ e $\Delta\lambda = \lambda_{IPP} - \lambda_r$, são as diferenças entre o ponto de entrada da ionosfera (*Ionospheric Piercing Point – IPP*) para latitude (φ_{IPP}) e longitude (λ_{IPP}) em relação a posição do receptor (φ_r e λ_r). A tendência instrumental dos satélites é utilizada como dado de entrada para o PPP-AR, cabendo ressaltar que esses atrasos não possuem natureza absoluta por conta de estratégia adotada para sua estimação. Contudo, isso não afeta as observáveis ionosféricas calculadas por este método. Sendo assim, a diferença da técnica implementada por Oliveira JR, Monico e Morel (2020) para Otsuka (2002) é a estimação da tendência em função ao receptor (b_r) ao invés do conjunto satélite receptor (b_r^s). Por isso, considerando o ajustamento, o número de observações se torna bem maior que o número de

parâmetros, onde estes parâmetros podem ser estimados minimizando a soma do quadrado dos resíduos por:

$$E = \sum_i^{N_S} \sum_k^{N_S} W_k^i \left[\overline{I_k/S(e_k^i)} - \overline{VTEC_k} + \overline{1/S(e_k^i)b_r} \right]^2 \quad (14)$$

Onde, W_k^i representa a matriz dos pesos, para reduzir os erros causados pela função de mapeamento, assim como a variação espacial das observações ionosféricas baseadas no PPP-AR, W_k^i é dado pelo inverso do fator inclinado ($1/S(e_k^i)b_r$). Assim que a tendência b_r é estimada, ela é introduzida novamente na equação 11 para assim obter o valor final do atraso ionosférico.

2.3 Controle de Qualidade

Para o ajustamento de observações na Geodésia pode ser utilizada a estimativa dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), proposto de forma independente por Gauss e Legendre. O MMQ adota uma única solução que irá minimizar a soma ponderada do quadrado dos resíduos de cada observação. Quando as observações são contaminadas somente por erros aleatórios, o MMQ pode ser considerado como o melhor estimador linear imparcial (*BLUE – Best Linear Unbiased Estimator*), porém como este não é um estimador robusto, se houverem *outliers* nas observações, eles irão influenciar na solução final do ajustamento. (HUBER, 1964; TEUNISSEN, 2003; KLEIN, 2014).

Segundo Lehman (2012), o modelo estatístico mais adotado para identificar *outliers* em dados geodésicos é o *Data Snooping* (DS) proposto por Baarda (1968). Neste método, se assume que os erros aleatórios não apresentam tendência, e, portanto, para cada i -ésima observação (y_i) do vetor das observações (y), as seguintes hipóteses podem ser formuladas (Baarda, 1968):

$$\begin{aligned} H_0: E\{y\} &= A\delta x \\ H_A: E\{y\} &= A\delta x + c_i \nabla_i; \quad \nabla_i \neq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Onde, na equação 15 c_i é um vetor unitário de dimensão $n \times 1$ que contém a unidade na linha da i -ésima observação testada e zero as demais, e ∇_i é um possível erro grosseiro nesta mesma observação testada. Com isso, para hipótese nula (H_0), assume-se que somente erros aleatórios contaminam o vetor das observações, enquanto na hipótese alternativa (H_A), assume-se que o

vetor das observações está contaminado com erro grosseiro na i -ésima observação (KLEIN, 2014).

Assim que as hipóteses forem formuladas, pode-se definir a estatística de teste que é dada em função dos resíduos. Essa estatística possibilita a decisão sobre rejeição ou aceitação das hipóteses. A estatística de teste de cada observação é dada por:

$$w_i = \frac{c_i^T W \hat{v}}{\sqrt{c_i^T W \Sigma_{\hat{v}} W c_i}} \quad (16)$$

Onde, \hat{v} é o vetor dos resíduos ajustados; W é a matriz peso das observações; $\Sigma_{\hat{v}}$ é a MVC (Matriz de Variância e Covariância) dos resíduos ajustados. Quando as observações não possuem correlação, a matriz dos pesos será diagonal a estatística de teste w_i será dada por:

$$w_i = \bar{v}_i = \frac{\hat{v}_i}{\sigma_{\hat{v}_i}} \sim N(0,1) \quad (17)$$

Ou seja, no caso da matriz W diagonal, a estatística de teste do DS será o “resíduo padronizado” da observação, ou seja, o resíduo da i -ésima observação dividido pelo seu respectivo desvio padrão. Neste caso, o DS pode ser considerado como uma generalização da regra dos três sigmas (KLEIN, 2014).

Na prática, não se sabe a priori qual observação pode estar contaminada, ou seja, todas são testadas individualmente por meio de suas estatísticas de teste. Desta forma, a hipótese nula será rejeitada, caso a estatística de teste máxima (em módulo) for maior que o valor crítico do teste $c_{\alpha_0/2}$ (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 2006; KLEIN, 2014):

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ se: } \max |w_i| > |c_{\alpha_0/2}| \quad (18)$$

Onde $c_{\alpha_0/2}$ é o valor crítico na distribuição normal padrão para um teste bi-caudal, uma vez que não se conhece a priori o sinal (positivo ou negativo) do outlier. Caso a hipótese nula seja rejeitada, a observação relativa a máxima estatística de teste ($\max |w_i|$) é excluída do ajustamento e o procedimento é realizado novamente em um processo iterativo até não haver mais nenhum outlier identificado nas observações. Mais detalhes podem ser obtidos em Klein (2014).

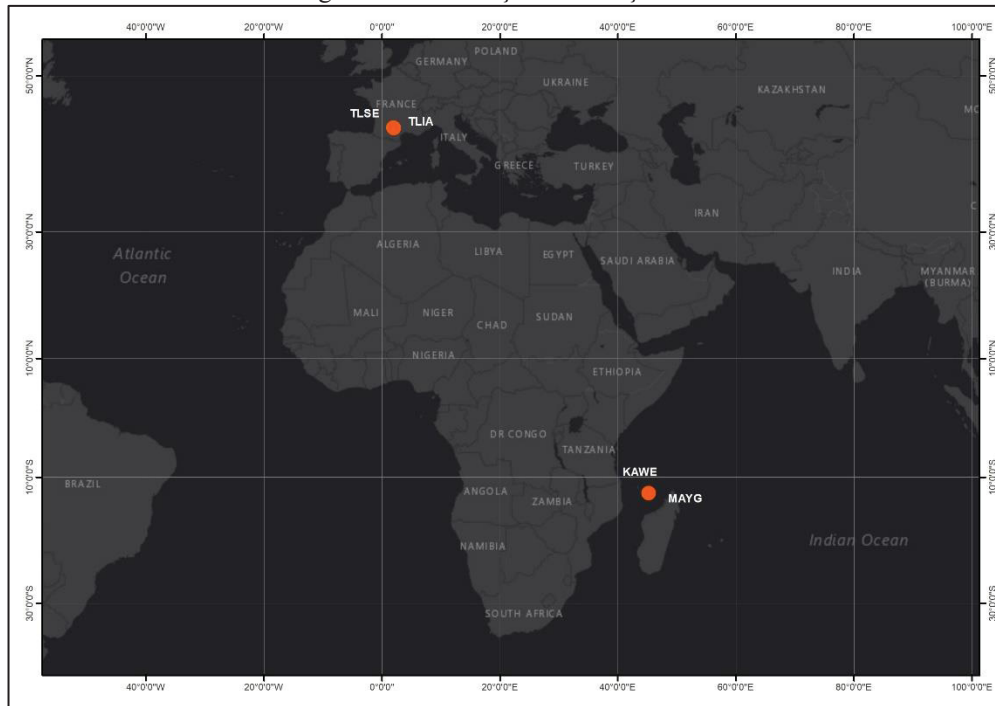
3 METODOLOGIA

Nesta seção, são descritos os procedimentos adotados para realização deste trabalho de pesquisa.

3.1 Conjunto de dados

Neste trabalho, para a estimativa dos valores de tendência instrumental foi utilizada a metodologia implementada por Oliveira Jr. Monico e Morel (2020) citada no item 2.5 deste documento, utilizando dados das estações TLIA e TLSE, pertencentes a rede GNSS francesa denominada RGP (*Réseau GNSS Permanent*) onde a taxa de amostragem dos dados disponíveis para download é de 1 segundo. Também foram consideradas as estações KAWE e MAYG localizadas em Madagascar com a mesma taxa de amostragem. A Figura 4 - Localização das estações utilizadas. apresenta a localização destas estações. Os pares de estações selecionadas são separados com uma distância de 87,13 m e 3961,14 m, respectivamente. Também é interessante notar que os modelos de receptores/antenas são distintos, os quais são apresentados na Tabela 2. Ao todo foram utilizados dados de 30 dias do mês de março a abril de 2018 de acordo com a disponibilidade (dia 61 a 100) onde, neste período não se encontraram perturbações na ionosfera segundo o modelo do IRI (*International Reference for Ionosphere*), possibilitando uma análise sem interferências da ionosfera.

Figura 4 - Localização das estações utilizadas.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 2 - Estações GNSS utilizadas.

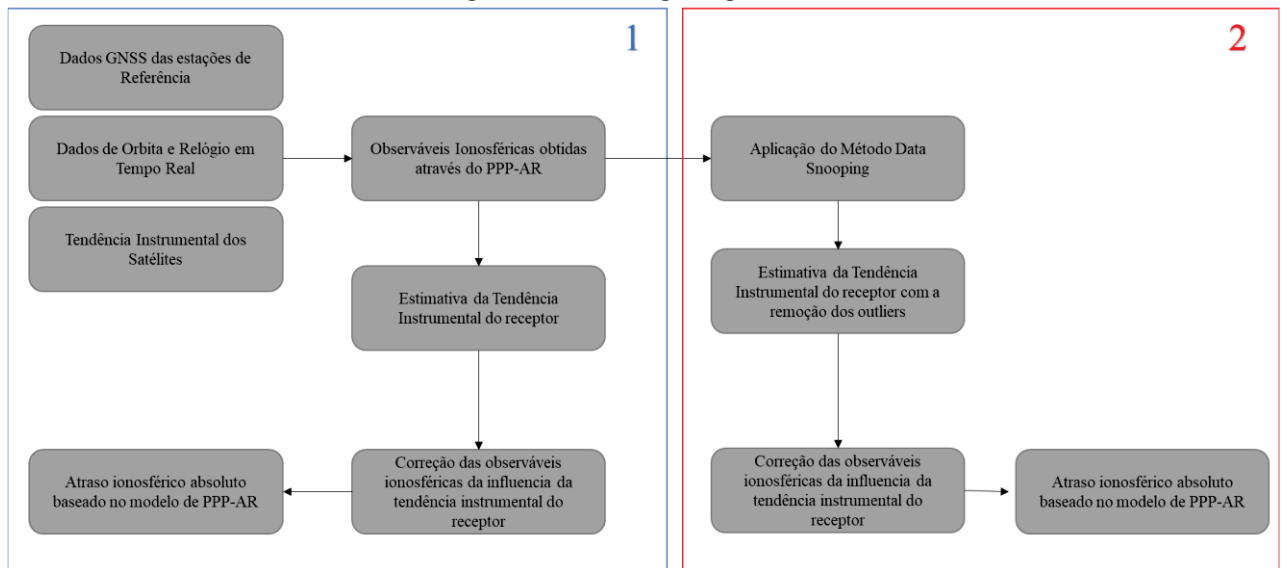
Estação	Receptor	Antena
TLIA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAR25 LEIT
TLSE	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00 NONE
KAWE	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAS10 NONE
MAYG	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00 NONE

Fonte: Adaptado de Oliveira Jr (2020).

3.2 Métodos

Como já mencionado, o método para cálculo dos valores de tendência instrumental foi o mesmo utilizado em Oliveria JR, Monico e Morel (2020), porém com adição do procedimento do DS para exclusão de *outliers* presentes nas observáveis de entrada no modelo implementado. Com isso o fluxo de trabalho representado pela Figura 5 expressa as duas etapas que foram adotadas na implantação desta pesquisa.

Figura 5 - Metodologia implementada.



Fonte: Adaptado de Oliveira Jr, Monico e Morel (2020)

De posse do fluxograma de etapas apresentado, foram obtidos dois cenários, o primeiro resultou na estimativa dos valores da tendência instrumental para o receptor obtidos por meio do PPP-AR, assim como o valor do atraso ionosférico corrigido de tais valores para as estações em análise. No segundo cenário, tem-se a aplicação do procedimento *Data Snooping* para exclusão de *outliers* no modelo inicial já implementado, conforme apresentado no tópico 2.3 deste trabalho. Sendo assim, é estimado um novo valor para as tendências de *hardware* do receptor onde os mesmos poderão ser aplicados no cálculo do atraso ionosférico, por meio da remoção das tendências instrumentais presentes nas observáveis ionosféricas.

O vetor de observações (L) de entrada para realizar o ajustamento é representado pelas observáveis ionosféricas calculadas a partir da equação 11, ressaltando que a mesma leva em consideração o fator de inclinação S e utiliza apenas satélites com ângulos de elevação superior a 30° para redução de demais erros não modelados.

A matriz *design* (A) relaciona as observações com os respectivos parâmetros, como nesta estimativa são utilizadas as variações de IPP em relação à respectiva posição da antena/receptor do usuário. Dessa forma, o modelo de equações se torna linear. Por fim, assim como o vetor das observações a matriz dos pesos (W) também é montada em função do ângulo de elevação dos satélites citados na equação 14, bem como na obra original de Otsuka (2022).

Foi implementada uma rotina no *software Matlab* onde foram gerados os valores de tendência instrumental para cada uma das estações nos respectivos dias estipulados, para cada

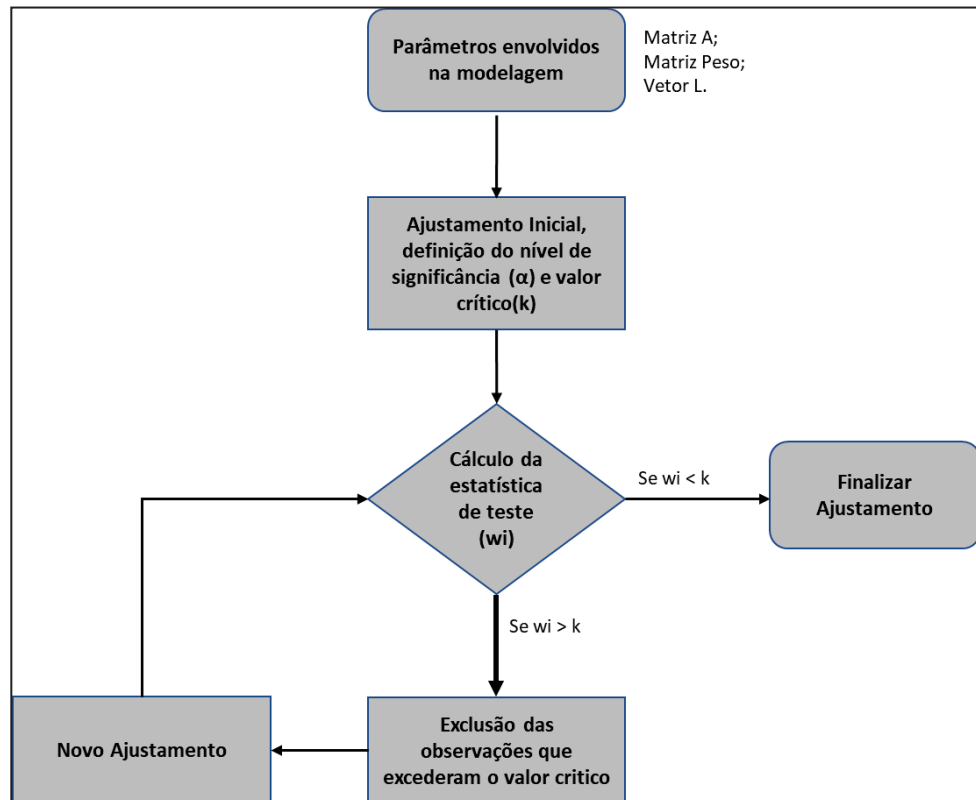
dia processado, utilizando os valores obtidos através do PPP-AR, de acordo com a estratégia adotada por Oliveira Jr., Monico e Morel (2020). Posteriormente, foram calculados os valores do atraso ionosférico diário para ambas estações, em seguida estes foram corrigidos com os valores da tendência instrumental calculados anteriormente.

A partir das observáveis utilizadas, foram extraídas a matriz design, a matriz dos pesos e o vetor das observações, com isso foi possível realizar o procedimento do DS, gerando assim, valores de tendência corrigidas de *outliers*, assim como no procedimento anterior, estes novos valores com o controle de qualidade foram usados para corrigir o atraso ionosférico das estações de análise.

Os valores calculados para tendência instrumental em cada cenário utilizado, sem e com CQ, foram comparados com a finalidade de verificar a estabilidade ao longo dos dias analisados. De posse destes dois cenários, os dados de atraso ionosférico corrigidos da tendência instrumental foram comparados. Como a linha de base entre os receptores é curta, a diferença nos atrasos deve ser o menor possível, então supõe-se que o método que apresentou as menores discrepâncias será o mais eficiente.

3.3 Controle de Qualidade

De posse do vetor das observações, matriz design e matriz dos pesos utilizado no cálculo da tendência instrumental a partir das observáveis ionosféricas, foi iniciado o processo de aplicação do procedimento *Data Snooping* a cada dia de rastreamento. Como a matriz dos pesos é diagonal, a estatística de teste foi considerada como sendo os resíduos dividido por seus respectivos desvios padrão (Equação 17). Porém, na aplicação deste procedimento torna-se necessário a utilização de um valor crítico de teste para que as observações com outliers sejam de fato excluídas com eficiência. Como a taxa de amostragem das estações GNSS utilizadas é de 1 segundo, as observações obtidas por meio das formulações são da casa das dezenas de milhares, aumentando assim o tempo para cálculo das estatísticas de teste e uma definição mais exata de um valor crítico de teste que seja mais adequado a cada caso. A estratégia de processamento dos dados a partir do *Data Snooping* é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Procedimento adotado para o *Data Snooping*.

Fonte: O Autor (2022).

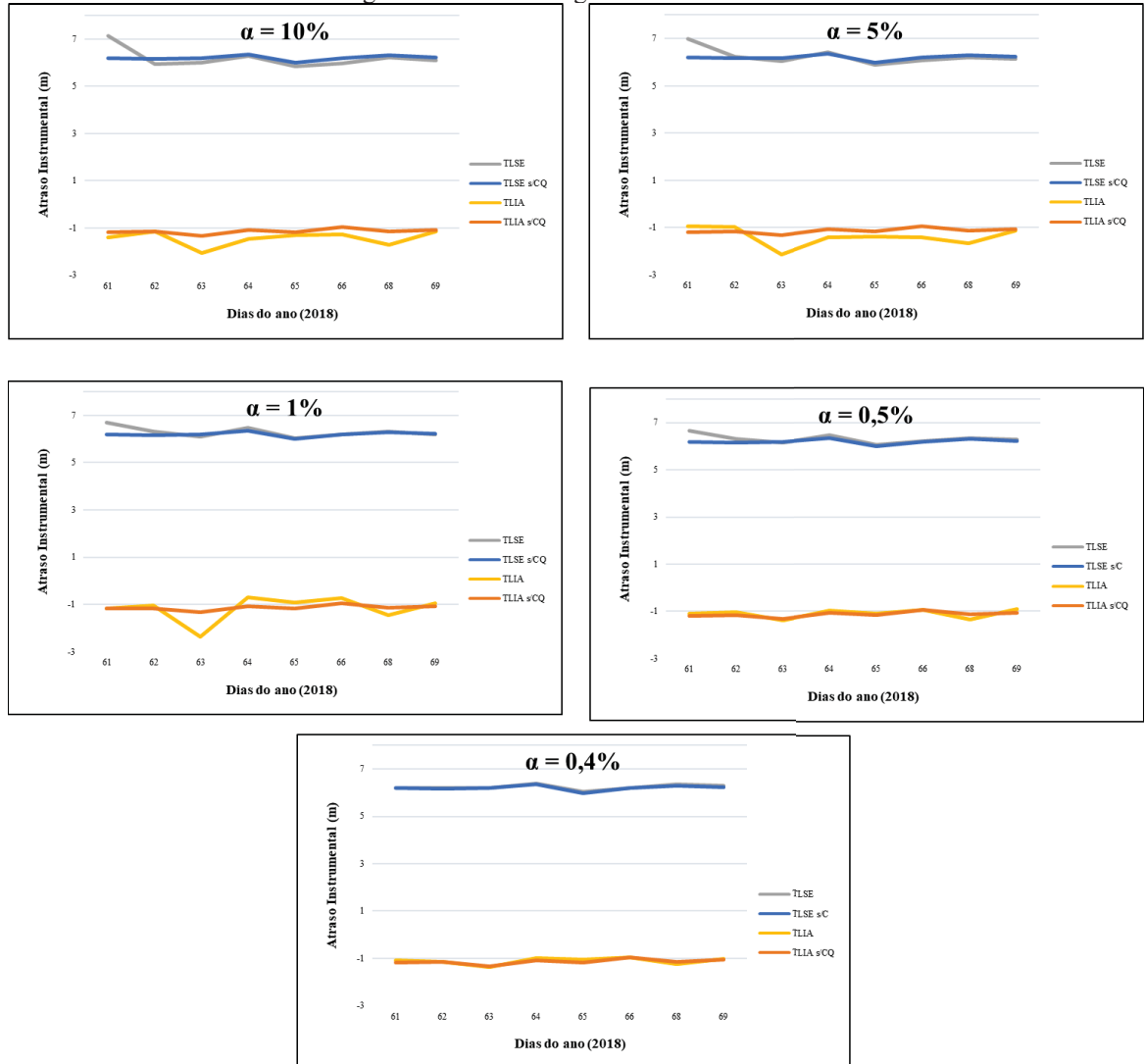
Como os valores de atraso instrumental possuem pouca variação temporal, assume-se um caráter de constância nestes através dos dias, este critério foi utilizado para estipular qual nível de significância seria o mais adequado para o estudo, para isso foram tabelados os valores médios diários de variação dos atrasos instrumentais assim como seu desvio padrão, de posse de tais valores, foram testados os níveis de significância de 10%, 5% e 1%.

Testou-se também os níveis de 0,5%, 0,4% e 0,1%, que são valores usuais em redes geodésicas densas. Os resultados mais pertinentes foram encontrados quando utilizado um nível de significância de 0,4% apresentando melhor estabilidade que os demais, cabe ressaltar que para o valor de 0,1%, também ocorreu uma estabilidade similar ao de 0,4%, porém isso foi devido a não ocorrer exclusões de nenhuma observação na maior parte dos dias de teste, portanto tal valor foi descartado para o trabalho. A Figura 7 apresenta a relação gráfica dos níveis de significância citados para o caso das estações TLSE e TLIA.

Aqui, uma ressalva deve ser feita: devido ao alto custo computacional, com inversão de matrizes da ordem de dezenas de milhares de linhas, ao contrário do *Data Snooping* iterativo atualmente adotado em redes geodésicas em geral, onde apenas uma observação é excluída por vez, nessa pesquisa todas observações que excederam o valor crítico de teste eram excluídas

em cada rodada do ajustamento, caso contrário o custo computacional seria muito elevado para aplicações práticas. Ressalta-se que o *Data Snooping* original apresentado em Baarda (1968) também não condiciona a exclusão de uma única observação por vez, sendo esta uma prática adotada posteriormente na Geodesia.

Figura 7 - Níveis de significância testados.



Fonte: O Autor (2022).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Diante da fundamentação e da metodologia exposta, esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da proposta mencionada.

4.1 Estimativa do Atraso instrumental

Este trabalho propõe utilizar o controle de qualidade para melhoria na estimativa de valores de tendência instrumental do receptor utilizando o método *Data Snooping* (DS).

Lembrando que o objetivo deste método é a melhoria dos dados de entrada a partir da exclusão de *outliers* presentes nas observações. A estimativa destes valores de tendência instrumental se deu a partir da metodologia utilizada por Oliveira Jr, Monico e Morel (2020) onde foi feita a adaptação do procedimento implementado por Otsuka et al. (2002) utilizando observáveis ionosféricas obtidas através do PPP-AR ao invés de valores obtidos pela combinação *geometry-free*. Cabe ressaltar que neste trabalho serão apresentados dois cenários que foram mencionados na Figura 5, o primeiro obtendo resultados sem a aplicação do controle de qualidade e o segundo com a aplicação do DS. Para execução deste trabalho foram utilizados os dados de 30 dias no ano de 2018 provenientes de dois pares de receptores GNSS localizados na França e na África (estações TLIA, TLSE, KAWE e MAYG). Os valores de atraso instrumental calculado antes da aplicação do DS para as estações citadas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores do atraso instrumental calculado sem aplicação do DS.

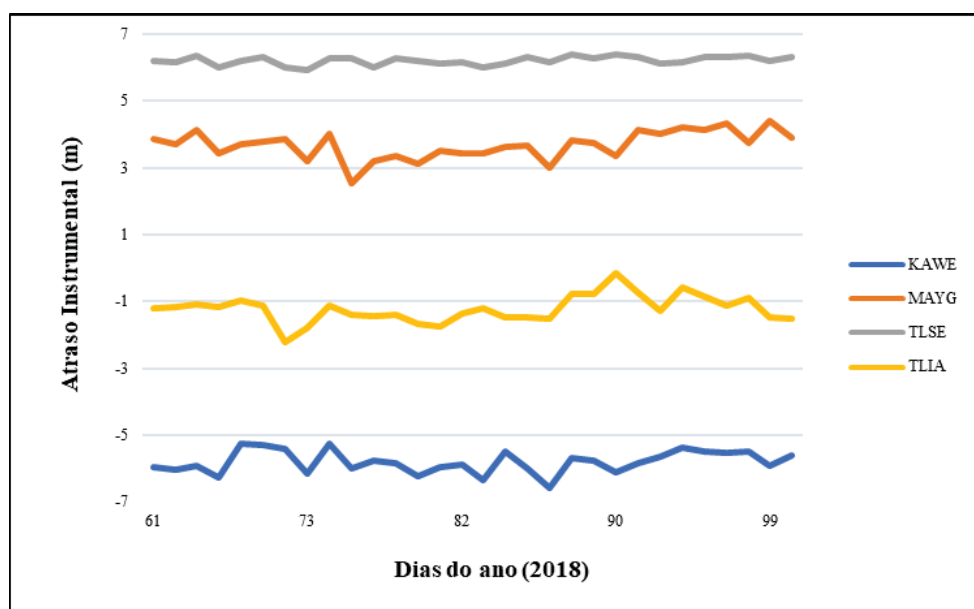
Dias	Atraso Instrumental (m)			
	KAWE	MAYG	TLSE	TLIA
61	-5,958	3,870	6,194	-1,179
62	-6,012	3,719	6,159	-1,153
64	-5,912	4,157	6,352	-1,070
65	-6,280	3,441	5,995	-1,163
66	-5,259	3,701	6,189	-0,951
68	-5,274	3,800	6,302	-1,134
70	-5,391	3,883	6,010	-2,198
73	-6,164	3,218	5,945	-1,793
75	-5,249	4,040	6,282	-1,140
76	-5,993	2,557	6,286	-1,387
77	-5,768	3,221	5,993	-1,452
78	-5,826	3,365	6,272	-1,399
79	-6,217	3,140	6,220	-1,666
80	-5,945	3,503	6,119	-1,731
82	-5,872	3,447	6,170	-1,346
83	-6,336	3,437	6,008	-1,210
84	-5,469	3,638	6,114	-1,474
85	-5,998	3,659	6,306	-1,482
86	-6,589	3,003	6,182	-1,498
87	-5,668	3,842	6,405	-0,751
89	-5,741	3,768	6,277	-0,777
90	-6,091	3,359	6,394	-0,158
91	-5,847	4,155	6,307	-0,739
92	-5,634	4,008	6,126	-1,269
93	-5,382	4,218	6,169	-0,565
94	-5,499	4,158	6,316	-0,839

96	-5,534	4,326	6,334	-1,109
97	-5,501	3,763	6,365	-0,896
99	-5,906	4,415	6,201	-1,456
100	-5,606	3,917	6,323	-1,522
σ	0,3420	0,4232	0,1285	0,4077

Fonte: O Autor (2022).

Conforme exposto na Tabela 3, os valores do atraso instrumental para todas as estações apresentaram desvio padrão abaixo dos 50 cm. Além disso, o menor valor de desvio padrão foi aquele obtido para estação TLSE com aproximadamente 10 cm, a Figura 8 apresenta a variação destes valores em função do período analisado.

Figura 8 - Atraso instrumental para as estações analisadas sem aplicação do DS.



Fonte: O Autor (2022).

Após a determinação dos valores, o procedimento foi repetido, porém agora com a aplicação do método *Data Snooping* para o controle de qualidade nas observações utilizadas como dado de entrada para este cálculo de acordo com item 3.2 e 3.3. A Tabela 4 e Tabela 5 apresentam as informações das estações utilizadas, relativas as observações antes e depois da aplicação do DS.

Tabela 4 - Quantitativo de observações presentes do modelo pra as estações KAWE e MAYG.

Dias	KAWE			MAYG		
	Obs. Iniciais	Obs. Finais	Obs. Excluídas	Obs. Iniciais	Obs. Finais	Obs. Excluídas
61	27813	27711	102	26518	26343	175
62	28404	28182	222	26776	26644	132
64	26652	26430	222	26866	26716	150
65	28683	28479	204	26944	26765	179

66	28183	27604	579	26992	26711	281
68	26545	26295	250	26390	26259	131
70	28249	27684	565	28345	28038	307
73	28979	28689	290	27044	26716	328
75	27597	27183	414	26884	26612	272
76	28830	28195	635	26968	26674	294
77	26950	26545	405	26285	26009	276
78	29002	28929	73	28389	28278	111
79	28925	28794	131	27015	26855	160
80	29013	28795	218	26165	25958	207
82	29013	28786	227	27039	26798	241
83	29018	28878	140	26937	26778	159
84	28910	28655	255	26997	26783	214
85	29019	28821	198	27015	26828	187
86	28041	27962	79	27041	26827	214
87	29003	28689	314	27018	26826	192
89	28978	28871	107	27005	26905	99
90	28972	28861	111	27051	26839	211
91	29001	28691	310	26833	26609	223
92	28918	28459	459	27009	26816	192
93	28974	28684	290	27003	26448	554
94	28951	28517	434	27016	26761	254
96	28244	27622	622	26819	26282	536
97	26374	25978	396	26930	26660	269
99	28947	28874	73	26773	26371	401
100	28205	28077	128	27034	26438	595
Média	28413	28131	282	26970	26718	251

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 5 - Quantitativo de observações presentes do modelo pra as estações TLSE e TLIA.

Dias	TLSE			TLIA		
	Obs. Iniciais	Obs. Finais	Obs. Excluídas	Obs. Iniciais	Obs. Finais	Obs. Excluídas
61	26281	25878	403	16364	16182	182
62	26031	25704	327	17687	17561	126
64	26810	26455	355	17516	17424	92
65	27698	27410	288	14334	14225	109
66	27792	27471	321	19487	19323	164
68	25863	25555	308	18447	18299	148
70	25922	25737	185	14343	14157	186
73	25072	24893	179	14759	14574	185
75	25337	25172	165	14951	14779	172
76	25616	25388	228	18593	18384	209

77	24806	24595	211	17425	17357	68
78	25354	25163	191	17063	16928	135
79	25154	24972	182	15043	14939	104
80	25513	25354	159	14111	14041	70
82	25410	25229	181	17149	16962	187
83	25431	25306	125	14238	14054	184
84	26317	26267	50	13279	13081	198
85	25063	24764	299	18778	18573	205
86	25345	25018	327	13754	13560	194
87	27141	26790	351	12954	12719	235
89	25182	24848	334	15751	15514	237
90	26282	26008	274	11563	11308	255
91	25456	25161	295	12589	12399	190
92	24527	24234	293	18191	18145	46
93	25380	25198	182	12657	12599	58
94	24373	24198	175	11675	11587	88
96	25634	25467	166	13325	13221	104
97	25747	25517	230	14381	14311	70
99	25840	25620	220	17016	16865	151
100	24344	24160	184	16405	16293	112
Média	25691	25451	240	15461	15312	149

Fonte: O Autor (2022)

Analisando as Tabelas 4 e 5, nota-se que o número de observações excluídas é da ordem de 1% para todas as estações, sendo que o nível de significância adotado foi de 0,4%. Ou seja, em condições normais (somente erros aleatórios), esperava-se uma taxa de exclusão da ordem de 0,4% (ditos “falsos positivos”). Como foram excluídas mais observações em todas as estações, de fato infere-se que havia outliers causados por erros grosseiros nos dados.

Ressalta-se que para outros níveis de significância, o número de observações excluídas era muito mais elevado, da ordem do milhar, resultando nas maiores irregularidades para o atraso instrumental ao longo dos dias conforme demonstrado na Figura 7. A partir das novas observações foi recalculado os valores para o atraso instrumental dos receptores, a tabela 6 traz estes novos valores sem a interferência de *outliers* removidos a partir do DS.

Tabela 6 - Valores do atraso instrumental calculado com a aplicação do DS.

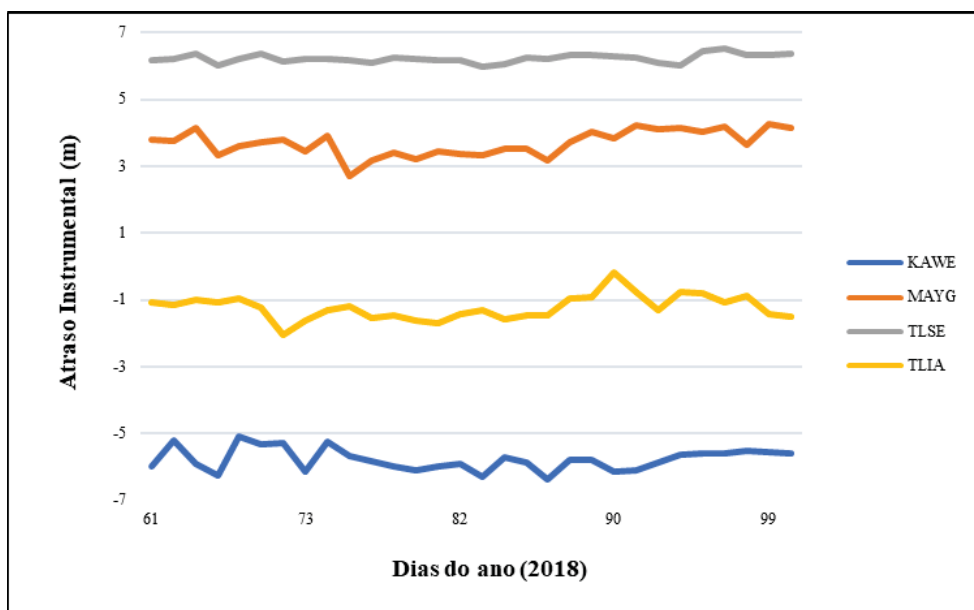
Dias	Atraso Instrumental (m)			
	KAWE	MAYG	TLSE	TLIA
61	-5,977	3,816	6,186	-1,088
62	-5,195	3,749	6,209	-1,131
64	-5,902	4,131	6,380	-0,988
65	-6,265	3,343	6,029	-1,065

66	-5,093	3,586	6,202	-0,947
68	-5,319	3,707	6,364	-1,237
70	-5,297	3,798	6,143	-2,054
73	-6,124	3,462	6,212	-1,623
75	-5,235	3,926	6,221	-1,288
76	-5,685	2,726	6,195	-1,187
77	-5,814	3,185	6,089	-1,534
78	-5,990	3,426	6,262	-1,476
79	-6,095	3,231	6,199	-1,598
80	-5,982	3,453	6,168	-1,685
82	-5,901	3,358	6,170	-1,439
83	-6,274	3,321	5,963	-1,299
84	-5,696	3,527	6,050	-1,569
85	-5,879	3,542	6,235	-1,480
86	-6,369	3,175	6,203	-1,473
87	-5,782	3,713	6,316	-0,946
89	-5,797	4,017	6,331	-0,929
90	-6,125	3,821	6,282	-0,186
91	-6,110	4,231	6,266	-0,753
92	-5,879	4,124	6,110	-1,306
93	-5,610	4,157	6,002	-0,757
94	-5,588	4,051	6,466	-0,817
96	-5,575	4,180	6,512	-1,072
97	-5,493	3,648	6,340	-0,868
99	-5,533	4,274	6,340	-1,410
100	-5,606	4,140	6,354	-1,509
σ	0,3373	0,3843	0,1299	0,3700

Fonte: O Autor (2022).

Assim como no caso anterior, os valores do atraso instrumental expostos na Tabela 6 também apresentam desvios padrões menores que 50 cm, e verificando cada estação em relação ao exposto anteriormente, pode-se notar uma redução de 1 cm à 4 cm nestes valores, com exceção da estação TLSE que manteve seu desvio padrão na casa dos cm, porém com a aplicação do DS este valor teve um aumento de aproximadamente 1 mm. A Figura 6 demonstra a variação destes valores em função do período de análise.

Figura 9 - Atraso instrumental para as estações analisadas com aplicação do DS.



Fonte: O Autor (2022).

Como exposto na Tabela 2, cabe ressaltar que as estações possuem fabricantes e modelos de receptores e antenas e cabeamentos diferentes, por isso o atraso instrumental de cada uma não será o mesmo, mesmo para estação TLSE e MAYG que possuem o mesmo modelo de antena e receptor, o atraso instrumental é próximo, porém não igual devido a fatores locais de ambas. Gráficamente, para o cenário com a aplicação do DS em relação ao original é possível perceber uma menor variação diária para todas as estações, sendo visualmente mais aparente entre os dias 73 e 90, onde essa variação é mais suave. Para estação KAWE essa suavização é bem perceptível a partir do dia 73 onde estes valores se encontram bem próximos e a curva na Figura 9 é bem mais suave que na Figura 8. A Tabela 7 apresenta os valores de variação diária par ambas estações nos dois cenários apresentados.

Tabela 7 – Porcentagem de variação diária do atraso instrumental.

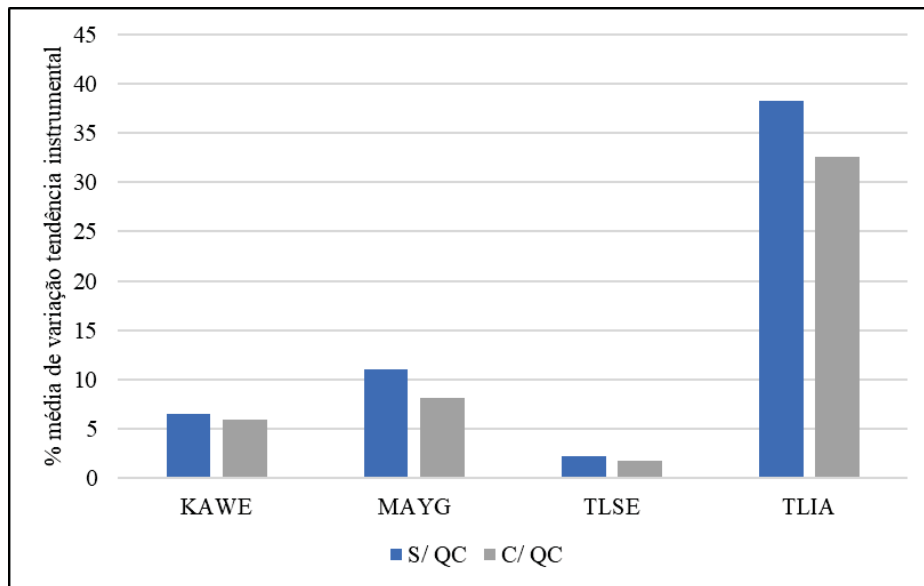
Dias	s/ Controle de Qualidade				c/ Controle de Qualidade			
	KAWE	MAYG	TLSE	TLIA	KAWE	MAYG	TLSE	TLIA
61-62	0,90%	3,90%	0,57%	2,24%	13,08%	1,77%	0,37%	3,92%
62-64	1,66%	11,76%	3,14%	7,20%	13,62%	10,21%	2,74%	12,61%
64-65	6,22%	17,21%	5,63%	8,74%	6,16%	19,09%	5,50%	7,82%
65-66	16,26%	7,56%	3,24%	18,29%	18,71%	7,29%	2,88%	11,14%
66-68	0,29%	2,66%	1,83%	19,33%	4,43%	3,38%	2,60%	30,64%
68-69	2,22%	2,19%	4,63%	93,81%	0,41%	2,45%	3,47%	66,08%

69-70	14,32%	17,14%	1,09%	18,42%	15,62%	8,84%	1,14%	20,97%
70-73	14,84%	25,56%	5,67%	36,44%	14,52%	13,38%	0,14%	20,65%
73-75	14,17%	36,71%	0,07%	21,69%	8,59%	30,55%	0,41%	7,89%
75-76	3,75%	25,96%	4,67%	4,67%	2,27%	16,82%	1,71%	29,29%
76-77	1,01%	4,48%	4,66%	3,61%	3,02%	7,57%	2,84%	3,77%
77-78	6,71%	6,68%	0,83%	19,07%	1,76%	5,69%	1,00%	8,25%
78-79	4,38%	11,56%	1,62%	3,91%	1,85%	6,86%	0,50%	5,46%
79-80	1,22%	1,61%	0,83%	22,25%	1,37%	2,74%	0,02%	14,64%
80-82	7,90%	0,29%	2,62%	10,11%	6,33%	1,13%	3,35%	9,68%
83-84	13,68%	5,86%	1,75%	21,81%	9,21%	6,22%	1,46%	20,76%
84-85	9,67%	0,58%	3,14%	0,56%	3,21%	0,42%	3,05%	5,69%
85-86	9,85%	17,93%	1,97%	1,09%	8,33%	10,37%	0,51%	0,49%
86-87	13,98%	27,94%	3,62%	49,86%	9,21%	16,97%	1,83%	35,75%
87-89	1,29%	1,94%	2,00%	3,49%	0,26%	8,19%	0,23%	1,83%
89-90	6,10%	10,86%	1,86%	79,66%	5,66%	4,88%	0,76%	79,94%
90-91	4,00%	23,72%	1,37%	367,24%	0,24%	10,71%	0,25%	303,97%
91-92	3,65%	3,55%	2,86%	71,80%	3,78%	2,53%	2,49%	73,49%
92-93	4,48%	5,24%	0,69%	55,50%	4,57%	0,81%	1,78%	42,06%
93-94	2,18%	1,41%	2,39%	48,50%	0,41%	2,55%	7,74%	8,00%
94-96	0,64%	4,04%	0,29%	32,18%	0,22%	3,17%	0,71%	31,15%
96-97	0,59%	13,02%	0,48%	19,20%	1,47%	12,71%	2,64%	18,96%
97-99	7,35%	17,32%	2,58%	62,60%	0,72%	17,14%	0,00%	62,35%
99-100	14,91%	11,29%	1,97%	4,50%	11,98%	3,12%	0,22%	7,04%
Média	6,5%	11,0%	2,3%	38,2%	5,9%	8,2%	1,8%	32,6%

Fonte: O Autor (2022).

A partir da tabela 7 temos as variações no valor do atraso instrumental de um dia para o outros expressos em porcentagem, onde, as relações apresentadas nas figuras 8 e 9 se tornam mais aparentes analisando cada dia. De forma geral, houve melhorias no cenário com aplicação do DS, pois, analisando a média de variação de todos os dias para todas as estações analisadas percebe-se que a constância destes dados foi maior, onde a maior diferença entre as médias se deu para estação TLIA com cerca de 6% discrepância ao cenário anterior. A Figura 10 expressa graficamente essas relações.

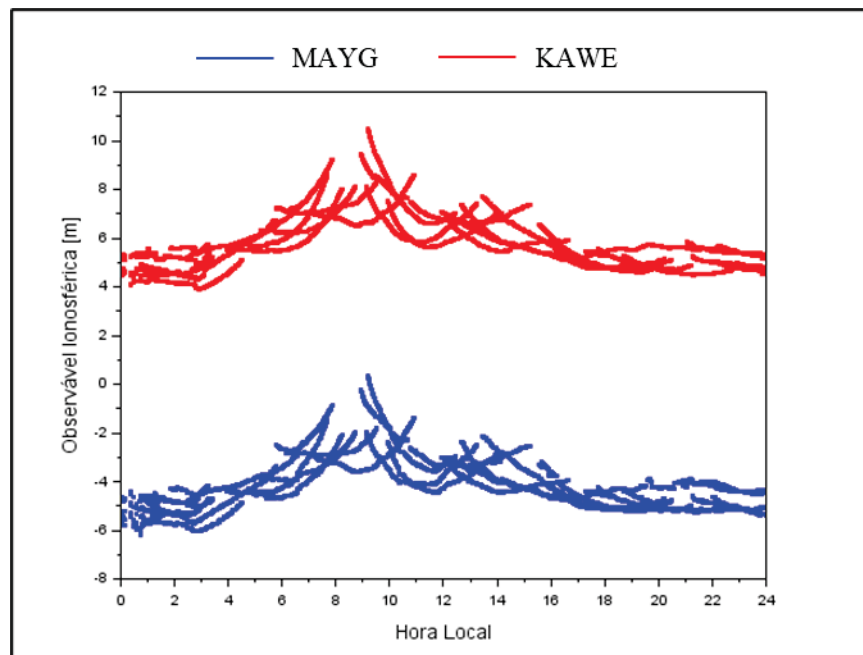
Figura 10 - Porcentagem média de variação diária da tendência instrumental.



Fonte: O Autor (2022).

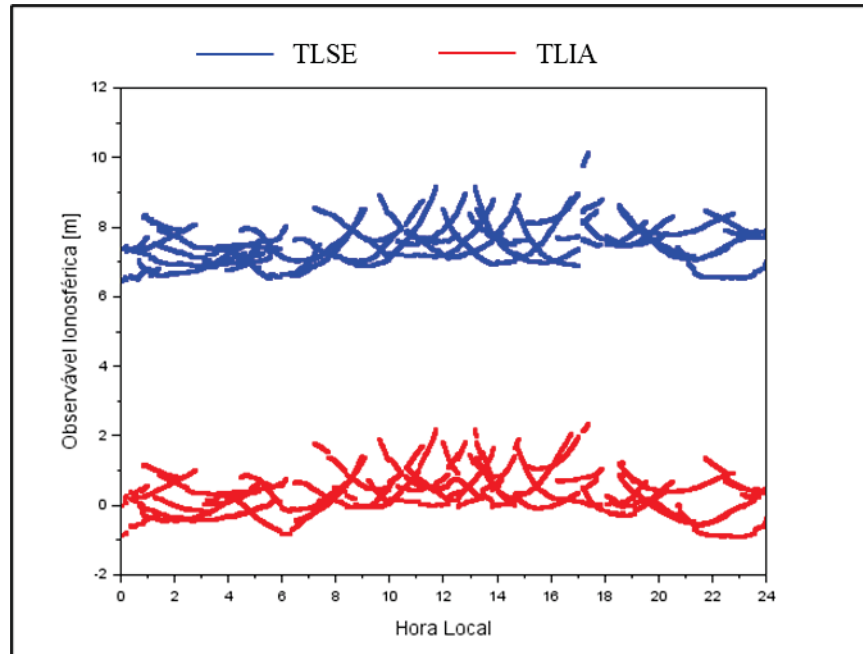
A partir deste ponto foram calculadas as observáveis ionosféricas, que são os valores sem correção do atraso instrumental (conforme citado na equação 14) relativas a cada par de estações analisadas. A Figura 11 e a Figura 12 expõe estes valores plotados para os pares KAWE e MAYG e TLSE e TLIA respectivamente para o dia 61.

Figura 11 - Observável Ionosférica no dia 61 para o par de estações KAWE e MAYG.



Fonte: O Autor (2022).

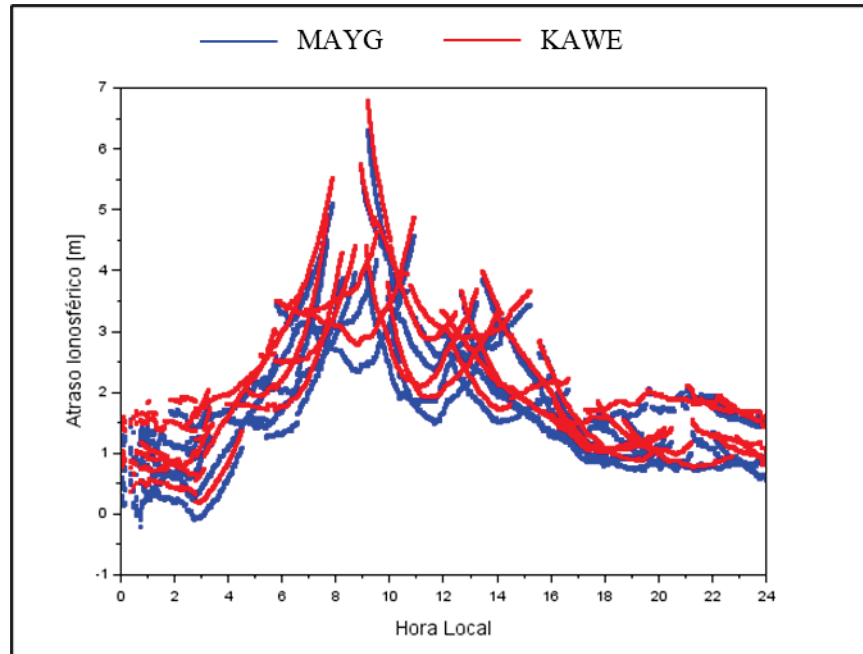
Figura 12 - Observável Ionosférica no dia 61 para o par de estações TLIA e TLSE.



Fonte: O Autor (2022).

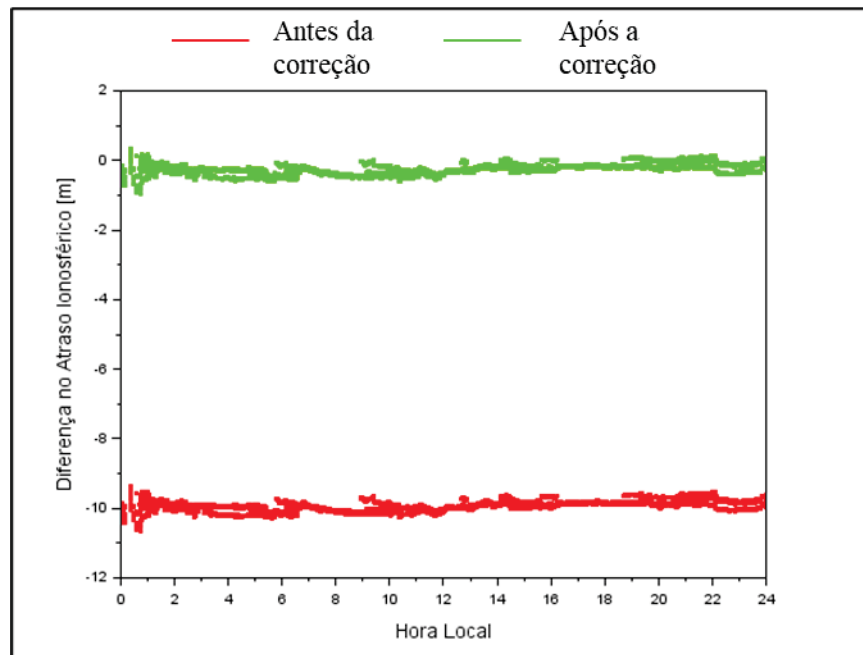
Os pares foram agrupados pois possuem distâncias curtas entre eles, logo, as estações estariam sobre as mesmas condições atmosféricas. No entanto as figuras anteriores demonstram que há uma diferença em cerca de 8 m em relação ao que seria considerado o atraso relativo à ionosfera. Ou seja, estes valores ainda necessitam de correção. Diante do exposto, temos os dois cenários apresentados pela Figura 5, onde os valores calculados para o atraso instrumental serão utilizados como correção para a estimação de fato do atraso ionosférico, a Figura 13 e a Figura 14 apresentam este atraso corrigido para o cenário 1, assim como a diferença deste mesmo atraso entre as estações analisadas são apresentados pela Figura 15 e Figura 16 novamente para o dia 61.

Figura 13 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações KAWE e MAYG s/CQ.



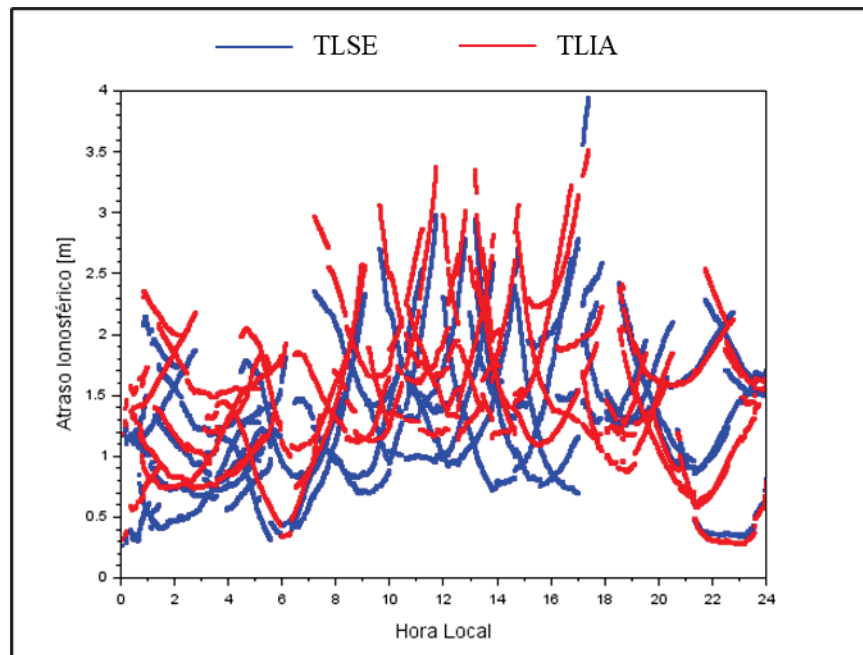
Fonte: O Autor (2022).

Figura 14 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações KAWE e MAYG s/CQ.



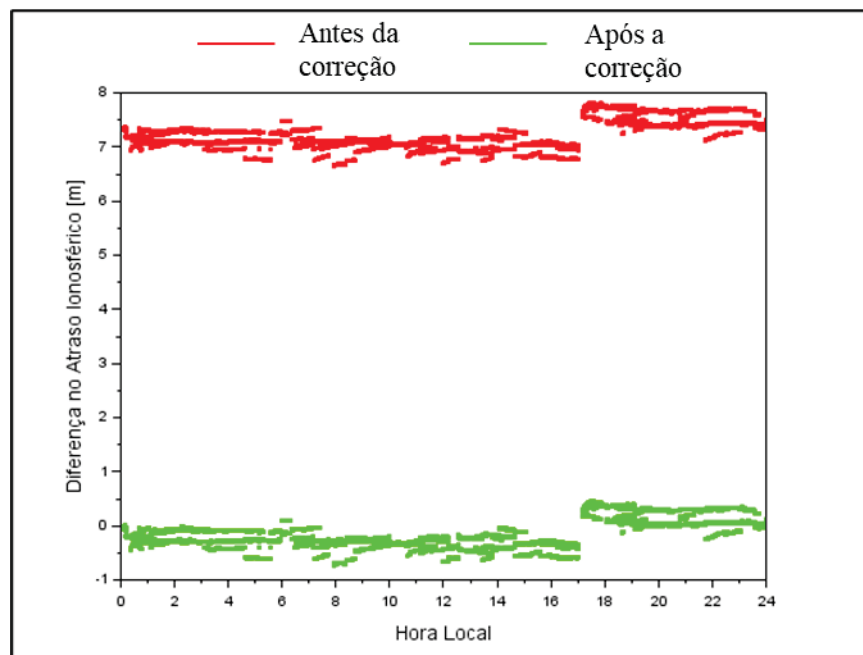
Fonte: O Autor (2022).

Figura 15 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações TLSE e TLIA s/ CQ.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 16 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações TLSE e TLIA s/ CQ.

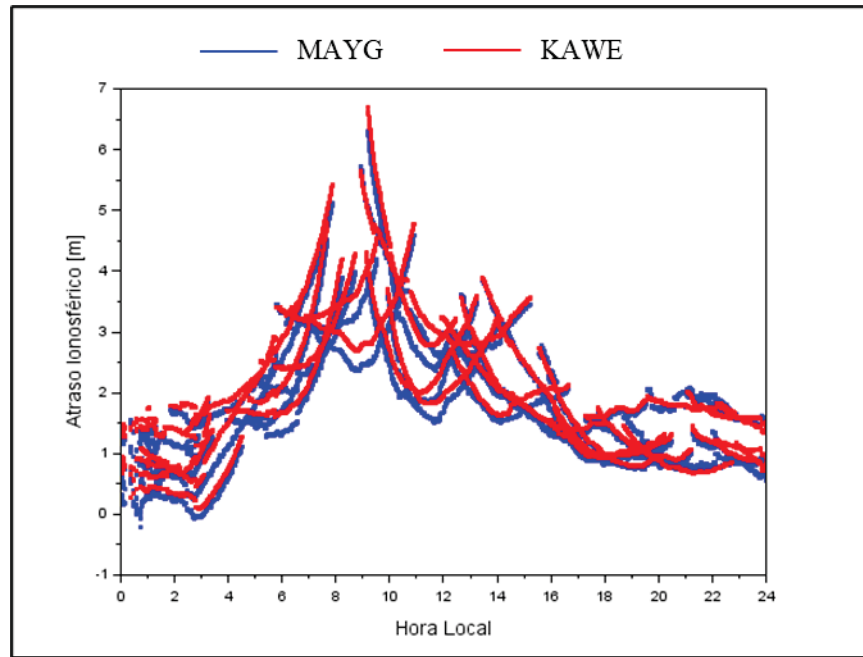


Fonte: O Autor (2022).

A partir das figuras expostas, para o cenário 1 já é perceptível a melhoria dos dados com correção do atraso instrumental, onde as diferenças que estavam próximas aos 10 m para o par KAWE-MAYG e 7 m para TLSE-TLIA ficaram próximos de 0, com diferenças abaixo dos 50 cm e 70 cm para os respectivos pares citados. Com essa relação já estabelecida, foram feitos os mesmos procedimentos para determinação do atraso ionosférico, porém agora com os valores

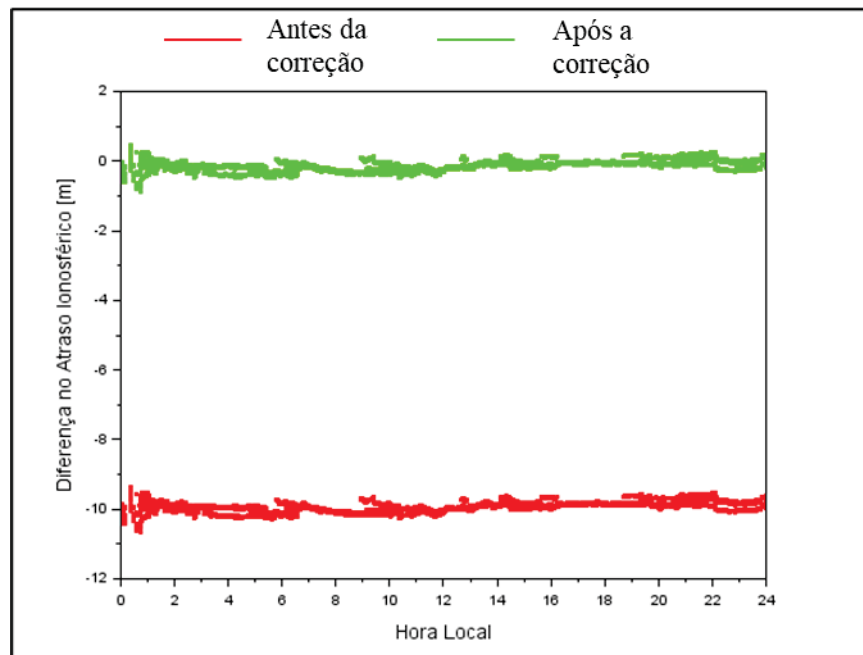
para o atraso instrumental estimados com a correção pelo DS. A Figura 17 e Figura 18 demonstram tal relação corrigida no cenário 2, assim como a Figura 19 e Figura 20 trazem a diferença no atraso entre as estações para o dia 61.

Figura 17 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações KAWE e MAYG c/CQ



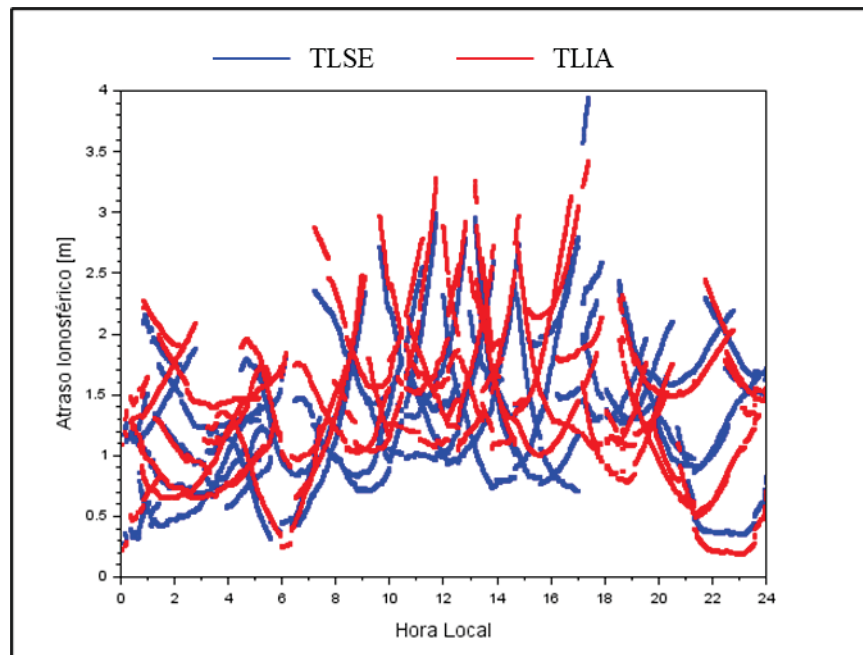
Fonte: O Autor (2022).

Figura 18 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações KAWE e MAYG c/CQ



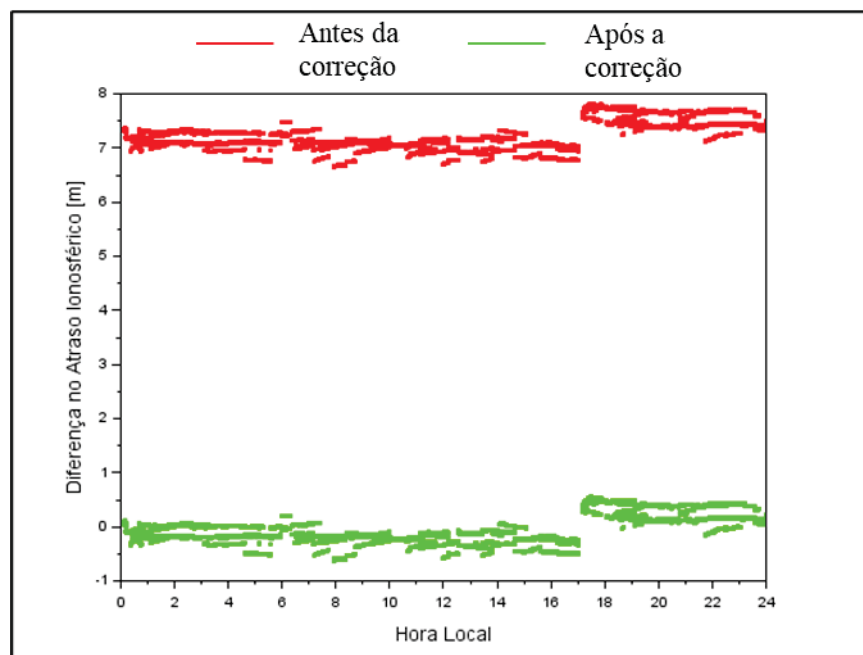
Fonte: O Autor (2022).

Figura 19 - Atraso ionosférico corrigido do atraso instrumental para as estações TLSE e TLIA c/ CQ.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 20 - Diferença no atraso ionosférico entre as estações TLSE e TLIA c/ CQ.



Fonte: O Autor (2022).

Apesar da similaridade entre os dois cenários, graficamente já podemos identificar algumas diferenças, a exemplo do par TLSE-TLIA onde, das 0h até as 10h as curvas estão mais próximas, ou seja, é mais aparente que o atraso ionosférico para ambas é mais equivalente no cenário 2. O dia 61 foi escolhido para exemplificar essas relações já citadas, os gráficos relativos aos demais dias podem ser encontrados no Apêndice A e Apêndice B. Como o volume

de dados diários é bastante extenso, para fins de comparação e análise foram extraídos de cada dia as médias das diferenças do atraso ionosférico, seus desvios padrões assim como o valor da maior discrepância encontrada entre o par de estações, estes dados podem são descritos nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Estatísticas das diferenças de atrasos ionosféricos calculadas entre as estações TLSE e TLIA.

Dias	s/ Controle de Qualidade			c/ Controle de Qualidade			Varição
	$\bar{\Delta}$	$\sigma\bar{\Delta}$	> Disc.	$\bar{\Delta}$	$\sigma\bar{\Delta}$	> Disc.	$\bar{\Delta}$
61	0,182	0,244	0,726	0,083	0,217	0,627	-54%
62	0,139	0,132	0,656	0,040	0,118	0,557	-71%
64	0,099	0,281	0,774	0,198	0,250	0,873	100%
65	0,137	0,195	0,733	0,038	0,174	0,634	-72%
66	0,062	0,169	0,561	0,037	0,150	0,512	-40%
68	0,116	0,143	0,529	0,017	0,127	0,539	-85%
70	0,154	0,167	0,758	0,054	0,148	0,659	-65%
73	0,210	0,176	0,640	0,111	0,156	0,541	-47%
75	0,338	0,211	0,757	0,237	0,188	0,720	-30%
76	0,316	0,187	0,814	0,305	0,166	0,913	-3%
77	0,122	0,209	0,716	0,023	0,186	0,617	-81%
78	0,043	0,177	0,526	0,042	0,157	0,549	-2%
79	0,298	0,215	0,821	0,288	0,191	0,920	-4%
80	0,096	0,187	0,562	0,004	0,166	0,543	-96%
82	0,060	0,156	0,528	0,040	0,139	0,466	-34%
83	0,220	0,222	0,825	0,121	0,198	0,726	-45%
84	0,052	0,180	0,694	0,047	0,160	0,595	-8%
85	0,048	0,170	0,700	0,051	0,151	0,601	5%
86	0,043	0,184	0,547	0,036	0,164	0,527	-17%
87	0,096	0,178	0,795	0,175	0,158	0,696	82%
89	0,225	0,165	0,616	0,020	0,146	0,511	-91%
90	0,318	0,155	0,614	0,113	0,138	0,411	-64%
91	0,372	0,173	0,992	0,167	0,154	0,787	-55%
92	0,209	0,180	0,646	0,004	0,160	0,501	-98%
93	0,242	0,183	0,683	0,037	0,163	0,599	-85%
94	0,375	0,291	1,016	0,171	0,259	0,811	-55%
96	0,338	0,205	0,900	0,133	0,182	0,695	-61%
97	0,523	0,224	1,265	0,318	0,199	1,060	-39%
99	0,443	0,280	1,219	0,238	0,249	1,014	-46%
100	0,593	0,292	1,173	0,388	0,260	0,968	-35%

Fonte: O Autor (2022).

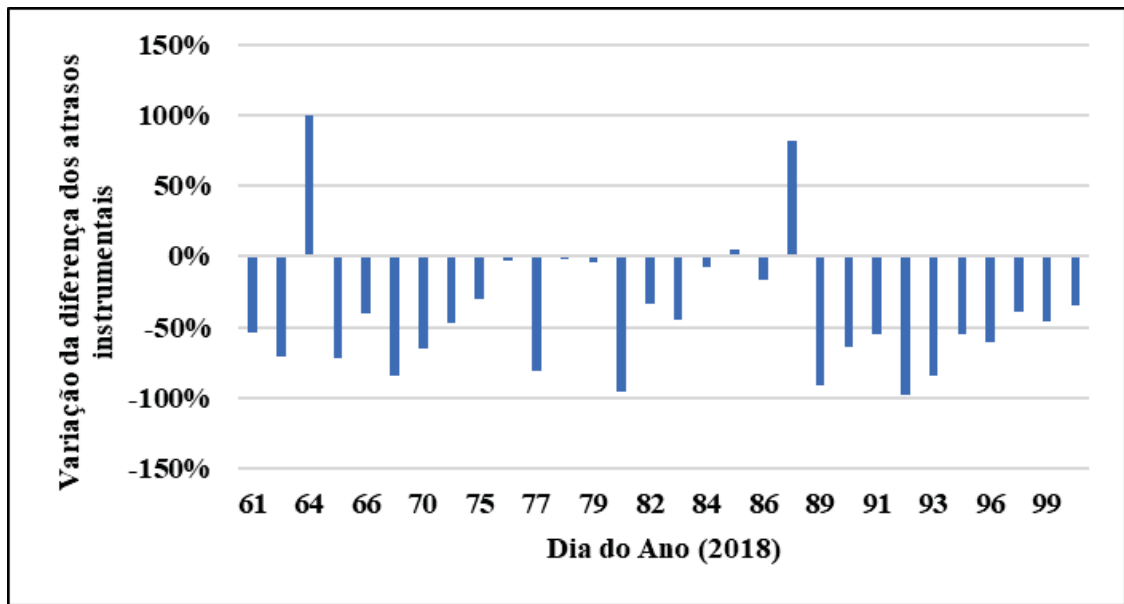
Tabela 9 - Estatísticas das diferenças de atrasos ionosféricos calculadas entre as estações KAWE e MAYG.

Dias	s/ Controle de Qualidade			c/ Controle de Qualidade			Variação $\bar{\Delta}$
	$\bar{\Delta}$	$\sigma\bar{\Delta}$	> Disc.	$\bar{\Delta}$	$\sigma\bar{\Delta}$	> Disc.	
61	0,252	0,140	0,983	0,136	0,127	0,867	-46%
62	0,237	0,169	0,802	0,121	0,153	0,686	-49%
64	0,620	0,432	1,486	0,505	0,393	1,370	-19%
65	0,072	0,195	0,731	0,043	0,177	0,615	-41%
66	0,688	0,713	1,581	0,674	0,649	1,697	-2%
68	0,448	0,585	1,377	0,563	0,532	1,493	26%
70	0,283	0,387	1,231	0,299	0,352	1,347	5%
73	0,238	0,229	0,882	0,154	0,209	0,998	-36%
75	0,587	0,382	2,583	0,402	0,348	2,699	-31%
76	1,296	0,814	2,099	1,011	0,741	2,215	-22%
77	0,357	0,496	1,342	0,272	0,451	1,458	-24%
78	0,550	0,186	0,903	0,465	0,169	1,019	-15%
79	0,672	0,252	0,943	0,388	0,230	1,059	-42%
80	0,095	0,172	0,560	0,051	0,156	0,676	-46%
82	0,476	0,134	0,751	0,392	0,122	0,867	-18%
83	0,095	0,189	0,654	0,020	0,172	0,653	-79%
84	0,439	0,559	1,314	0,395	0,509	1,430	-10%
85	0,003	0,202	0,615	0,006	0,183	0,731	71%
86	0,222	0,157	0,520	0,138	0,143	0,636	-38%
87	0,096	0,140	0,559	0,101	0,127	0,675	6%
89	0,120	0,128	0,598	0,116	0,116	0,727	-3%
90	0,203	0,170	0,651	0,303	0,155	0,957	49%
91	0,587	0,354	1,414	0,282	0,323	1,109	-52%
92	0,224	0,129	0,624	0,082	0,117	0,535	-63%
93	0,244	0,146	0,675	0,062	0,133	0,626	-74%
94	0,292	0,144	0,690	0,014	0,131	0,554	-95%
96	0,438	0,140	0,675	0,133	0,140	0,638	-70%
97	0,191	0,138	0,661	0,115	0,126	0,772	-40%
99	0,862	0,528	1,773	0,556	0,480	1,468	-35%
100	0,136	0,175	0,747	0,170	0,159	0,809	25%

Fonte: O Autor (2022).

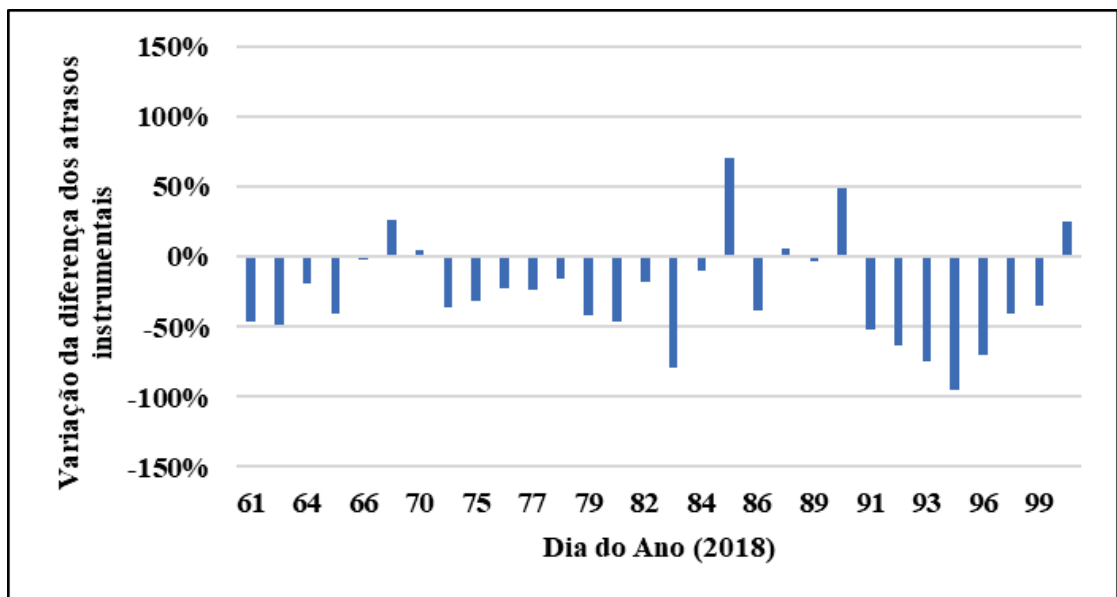
A partir das tabelas demonstradas, percebe-se que na maioria dos dias analisados houve uma redução na diferença média do atraso ionosférico entre as estações no cenário onde o controle de qualidade foi implementado, ou seja, a diferença entre o atraso foi menor e mais próxima de 0. Esse resultado indica que os dados após o CQ são mais confiáveis e com menores erros embutidos. A Figura 21 e Figura 22 apresentam de maneira gráfica a relação destas reduções.

Figura 21 - Redução na diferença entre os atrasos ionosféricos (TLSE-TLIA).



Fonte: O Autor (2022).

Figura 22 - Redução na diferença entre os atrasos ionosféricos (KAWÉ-MAYG).



Fonte: O Autor (2022).

De maneira geral, durante os 30 dias de análise ocorreram reduções na média de 40% para o par TLSE-TLIA, onde ocorreram casos em que essa a diferença entre os atrasos foi quase 0, a exemplo dos dias 80, 89 e 92 com mais de 90% de redução na média, porém ainda houve alguns dias em que essas médias aumentaram, nos dias 64, 85 e 87 com 100%, 5% e 82% de aumento na média respectivamente.

Para o par KAWE e MAYG essas reduções foram em média de 25%, tendo suas menores discrepâncias entre estações nos dias 83, 93, e 96 com reduções no valor médio em cerca de 70%. Já para o dia 94 observou-se o melhor resultado com 95% de redução. Assim como no par TLSE-TLIA, no par KAWE-MAYG também houve ocorrências de aumento nestes valores presentes nos dias 68, 70, 85, 87 e 90. Sendo os dias 70 e 87 com as menores variações com 5% e 6% respectivamente e os demais dias com pelo menos 20% de aumento no valor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi abordada a influência que Controle de Qualidade pode apresentar na estimativa de valores para atraso instrumental. De modo geral o CQ se mostrou de grande importância e eficiência. Haja vista que os parâmetros para geração dos valores de correção, no método estudado, são da ordem de milhares de observações, tendo altas probabilidades de apresentarem *outliers*.

A partir do processo adotado de controle de qualidade *Data Snooping*, objetivou-se encontrar um nível de significância ideal para o tratamento das observações nesta estimativa. Inicialmente, foi selecionado uma amostragem de 7 dias para experimentação do método, os níveis testados foram os convencionais aplicados em trabalhos na geodésia (10%, 5% e 1%). Contudo, é importante frisar estes níveis convencionais não se demonstraram eficazes pois a estabilidade no valor diário do atraso não foi maior ou igual aos valores já adotados. No entanto, quanto menor o valor do nível de significância testado, menor foi a variação encontrada para o valor em questão. Este resultado demonstrou que para estimativas que possuem milhares de dados a serem analisados, mais criterioso precisa ser o filtro do modelo de controle de qualidade adotado.

Foram testados os valores de 0.5%, 0.4% e 0.1%, onde no primeiro caso o modelo se mostrou mais estável que os convencionais, porém ainda apresentava maior variabilidade em relação aos dados normais, já o de 0.1% apresentou exclusões ínfimas comparadas ao quantitativo de observações, conservando assim os valores originais e apresentando a mesma taxa de variação original. O de 0.4% foi o que apresentou uma variação diária menor que os dados de origem demonstrando assim ser o mais estável e ideal para o prosseguimento do trabalho.

Para a aplicação da metodologia proposta, foram escolhidos um conjunto de dois pares de estações GNSS que já possuíam dados disponíveis a partir da pesquisa utilizada como norteadora deste trabalho. Estes pares de estações possuem linhas de base curtas e são relativas a períodos onde a perturbação atmosférica era mínima a fim de reduzir os efeitos ionosféricos já conhecidos e que influenciaram na amostragem dos dados, os pares estavam distribuídas em regiões de diferentes latitudes afim de não tendenciar os dados com relação a sua localização geográfica.

No período analisado, com a utilização do *Data Snooping* para o par de estações TLIA-TLSE, 90% dos valores apresentaram redução na média da diferença diária do atraso

ionosférico, e em apenas 3 dos dias em questão (representando 10%) esses valores foram maiores. Já para o par KAWE-MAYG, 80% dos valores apresentaram essa redução.

Como o valor do atraso instrumental tende a ser constante de um dia para o outro, o fato dos valores encontrados com a aplicação de um modelo de controle de qualidade através do procedimento *Data Snooping*, apresentarem menor variabilidade, demonstra a efetividade da proposta. Isso reflete-se também nos valores para o atraso ionosférico, como os pares de estações selecionadas são próximas, e a diferença entre os atrasos demonstrou uma redução quando comparada aos dados sem a aplicação do controle de qualidade, significa que a exclusão dos dados com *outliers* se demonstrou eficaz.

Para trabalhos futuros e continuidades da pesquisa, sugere-se a aplicação da metodologia em mais pares de estações por um período maior, como estes valores de atraso de *hardware* estão diretamente ligados ao modelo e marca do aparelho, essa aferição com um maior número de amostras ajudaria e densificar melhor a proposta.

Ressalta-se novamente que os dados das amostras são da ordem de milhares de observações, e boa parte dos cálculos utilizados nesta estimativa mais confiável envolvem inversões e transposições de matrizes com dimensões exorbitantes, então as operações exigem um alto custo computacional e que demandam um tempo considerável (dados referentes a 24h de observações levaram entre 5h e 48h para serem processados). Dito isso, para uma continuidade da pesquisa, é de importância a adoção de uma linguagem de programação que se adeque melhor a realizar essas operações com grande redundância de observações. Outra possibilidade é desenvolver uma metodologia que se utilize de curtos períodos de observação (algumas horas do dia). Isso poderia reduzir significativamente a quantidade de dados de entrada no modelo de estimativa das tendências instrumentais.

Por fim, mesmo com qualidade dos dados e a eficiência da estimativa, seria de suma importância aplicar essas correções em modelos de posicionamento que estejam no nível usuário, ratificando assim a eficácia e importância de uma correção confiável de valores de atraso de *hardware*.

REFERÊNCIAS

- ARIKAN, F., NAYIR, H., SEZEN, U., ARIKAN, O. Estimation of Single Station interfrequency receiver bias using GPS-TEC, **Radio Science**, v; 43, n. 4, p. 1-13, 2008.
- BAARDA, W. A testing procedure for use in geodetic networks. **Publications on Geodesy**, New Series, v. 2, n. 5, Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1968.
- BERTIGER W., DESAI S., HAINES B., HARVEY N., MOORE A. W., OWEN S, WEISS J. **Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data**. J Geod 84(5). 2010. p. 327–337.
- CALDEIRA, M. C. O., **Análise do Impacto do Efeito Ionosférico e Cintilação Ionosférica no Posicionamento Baseado em Redes e Por Ponto**. 2014. 122f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente (SP), 2016.
- CAMARGO, P. O., ARANA, D. PEREIRA, V. A. S. Erro sistemático relativo devido ao hardware dos receptores. **III Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente, v. 1, p. 268-273, 2012.
- CAMARGO, P.O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 1999.
- CORDEIRO, F. P. M. **Estimativa e Propagação de valores de DCB de um receptor GPS com vistas a correção de ordem superior do efeito ionosférico**. 2019. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990, 580p.
- FENG Y., GU S., SHI C., RIZOS. C. **A reference station-based GNSS computing mode to support unified precise point positioning and real-time kinematic services**. J Geod 87(10–12). 2013. p. 945–960
- FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados GPS**. 1999. 142f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP). 1999.

GABOR M.J., NEREM R.S. **GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite–satellite single differences**. In: Proceedings of the 12th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation, 1999 p. 1569–1578.

GE, M., GENDT, G., ROTHACHER, M., SHI, C., LIU, J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. **J Geod**, v. 82, n. 7, p. 389-399, 2008.

HERNÁNDEZ-PAJARES M. IGS Ionosphere WG status report: performance of IGS Ionosphere TEC Maps. **IGS Technical Meeting**, Bern, Switzerland, 2004.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE. E. **GNSS – Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer Wien New York. 2008. 546 p.

HONG, C. K. **Efficient differential code bias and ionosphere modeling and their impact on the network-based GPS positioning**. 2007. PhD Dissertation. The Ohio State University, Ohio, 2007.

HUBER, P. J. Robust estimation of location parameter. **Annals of Mathematical Statistics**. v. 35, p. 73-101, 1964

KAO, S., TU, Y., CHEN, W., WENG, D. J., JI, S. Y. Factors affecting the estimation of GPS receiver instrumental biases. **Survey Review**, v. 45, n. 328, p. 59-67, 2013.

KEE, C., & YUN, D. Extending Coverage of DGPS by Considering Atmospheric Models and Corrections. **Journal of Navigation**, 55(2). 2002. p. 305-322.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS/GNSS, Principles and Applications**. 3 ed. Boston: Artech House. 2017. 1016 p.

KLEIN, I. **Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas**. 2011. 322f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2011.

KOUBA, J., HÉROUX, P. **Precise point positioning using IGS orbit and clock products**. **GPS Solut** 5(2):12–28, 2001.

LANYI, G.E., ROTH, T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations. **Radio Sci.** 23, 483–492. 1988.

LEICK, A; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS satellite survey**. 4 ed. John Wiley & Sons. ARRUMAR, 1995.

LIMA, C. M. D. A., MONICO, J. F. G., MARQUES, H. A. PPP com solução inteira das ambiguidades da fase da onda portadora: fundamentos envolvidos e análise da acurácia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 5, 2016.

MAKELA, J.J., KELLEY, M.C., SOJKA, J.J., PI, X., MANUCCI, A.J. **GPS normalization and preliminary modeling results of total electron content during mid latitude space eather event**. Radio Sci. 36. p. 356–361.

MARINI, M. C. **Integração da Rede GPS ITESP ao Sistema Geodésico Brasileiro**. 2002. 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente (SP), 2002.

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

MARQUES, H. A., MONICO, J. F. G., SHIMABUKURU, M., OYAMA, R. T., WENTZ, J. P. Fundamentals, Computational Implementation and Results Analysis for Static and Kinematic Mode. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 66, v. 6, p. 1331-1345, 2014.

MATSOUKA, M. T., CAMARGO, P. O. Efeitos da Ionosfera nas Observáveis GPS e no Posicionamento Por Ponto na Região Brasileira: Revisão e Síntese das Investigações Realizadas. **Série em Geomática**, v. 2, p. 029-038, 2008.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and he direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da Cintilação Ionosférica no Brasil e Seus Efeitos no Posicionamento por GNSS**. 2013. 148p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

OLIVEIRA JR, P. S.; MONICO, J. F. G.; MOREL, L. Mitigation of receiver biases in ionospheric observables from PPP with ambiguity resolution. **Advances in Space Research**, v. 65, n. 8, p. 1941–1950, 2020.

OTSUKA, Y., OGAWA, T., SAITO, A., TSUGAWA, T., FUKAO, S., MIYAZAKI, S., A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. **Earth, Planets Space**, v. 54, n. 1, p. 63–70, 2002.

POLEZEL, W. G. C. **Investigações Sobre o Impacto da Modernização do GNSS no Posicionamento**. 2010. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2010.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa da Tendência Diferencial do Código nos Receptores GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, 2014.

ROCHA, R. S. M. **Posicionamento Geodésico com GPS no Suporte a Detecção de Deslocamento em Barragens**. 2014. 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente (SP), 2014.

SARDON E., RUIS A., ZARRAOA N. **Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from global positioning system observations**. *Radio Sci* 29(3). 1994. p. 577–586.

SCHAER S. **Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System**. Tese (Ph.D.), University of Bern, Switzerland, 1999.

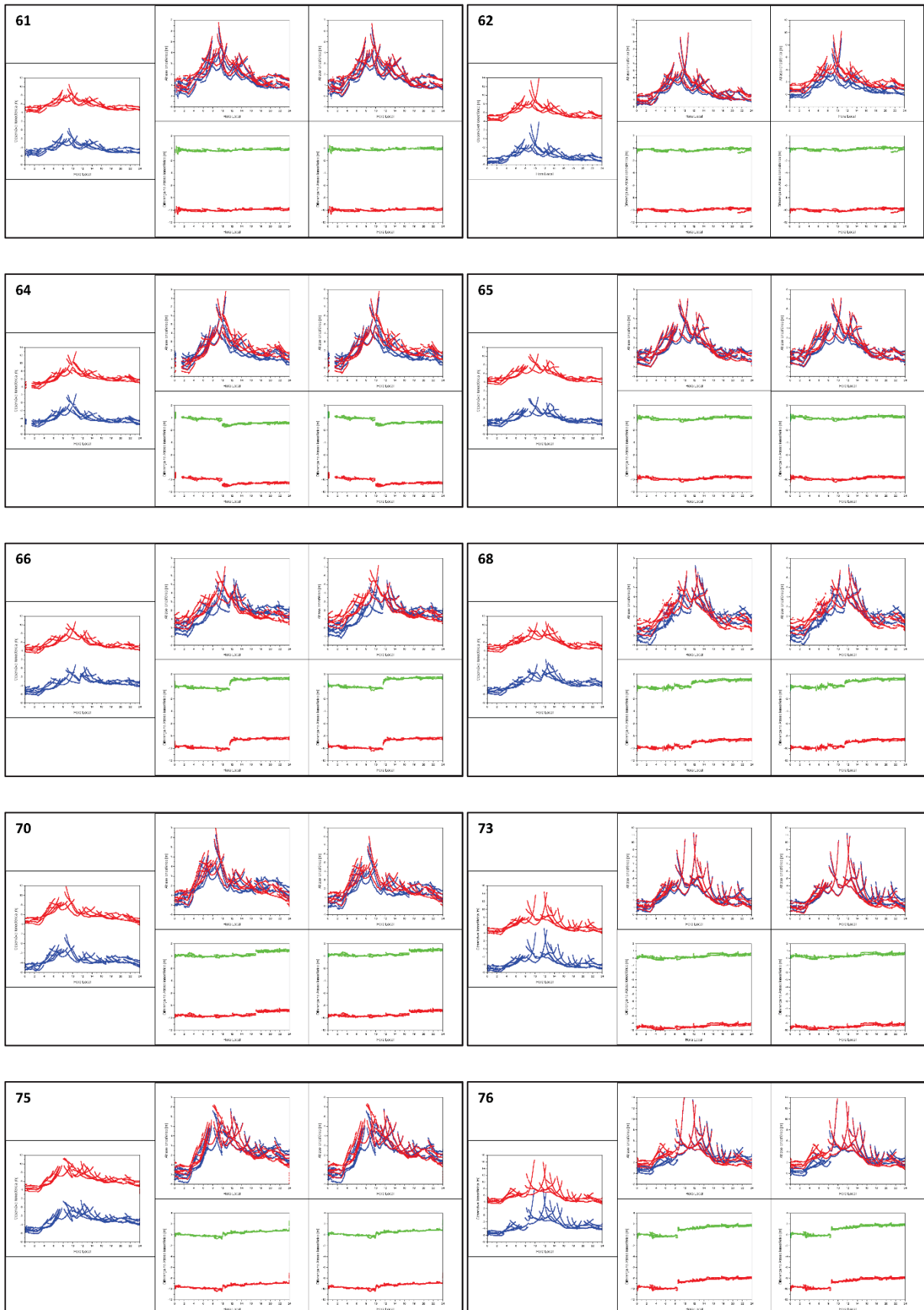
SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter Gruyter, 2003, 612p.

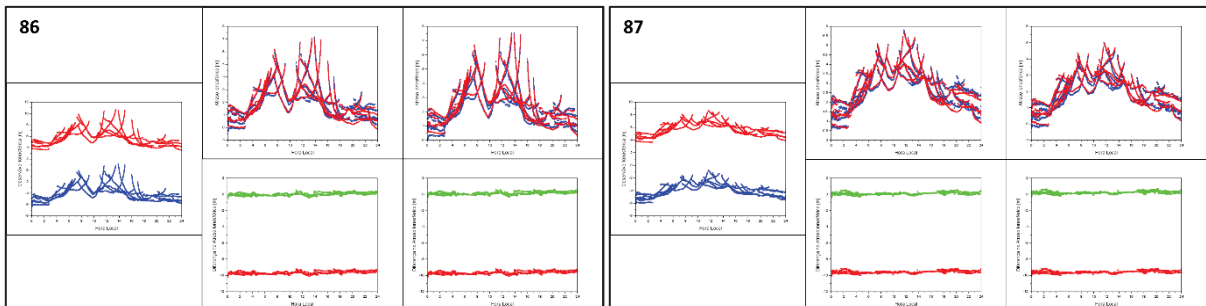
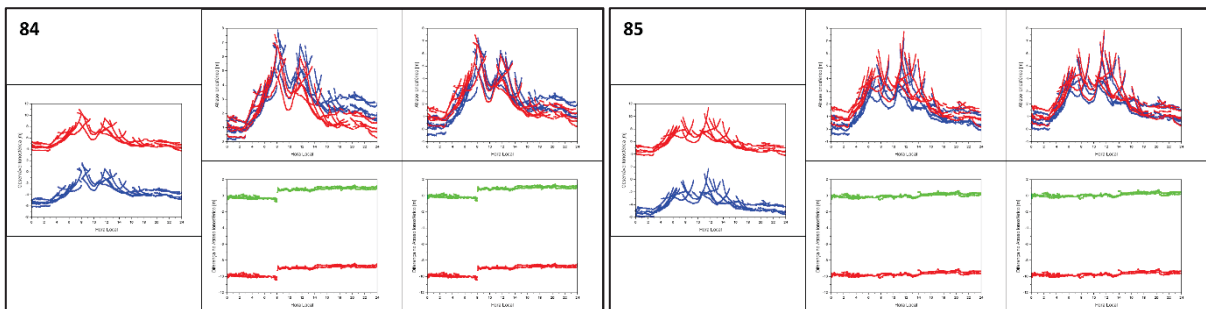
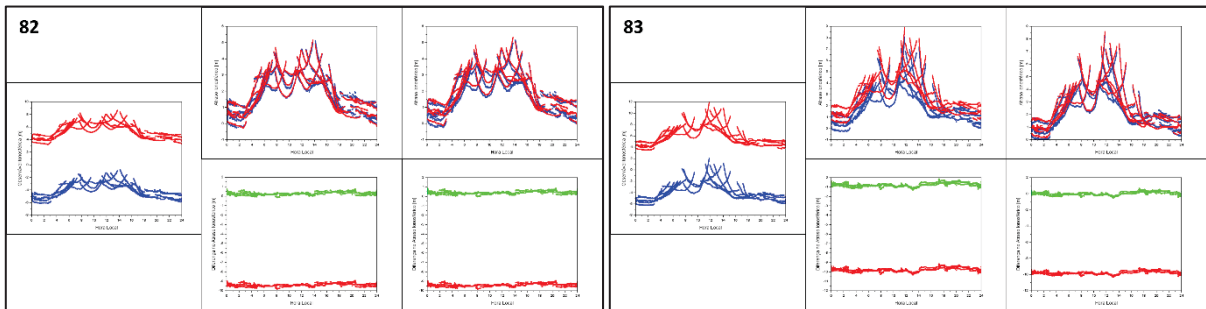
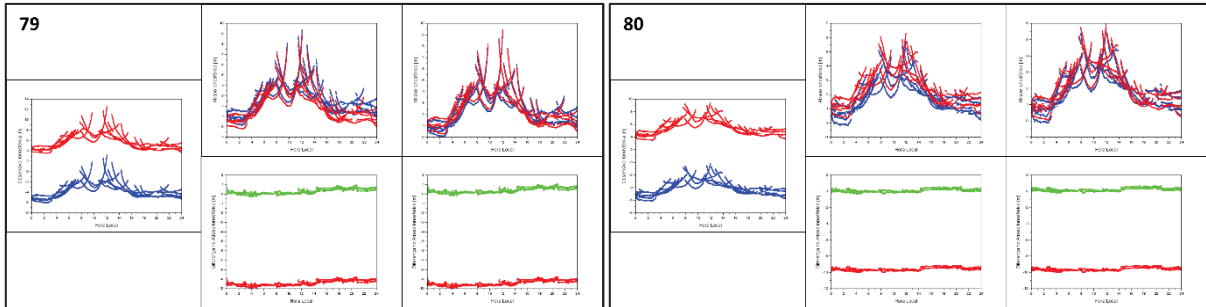
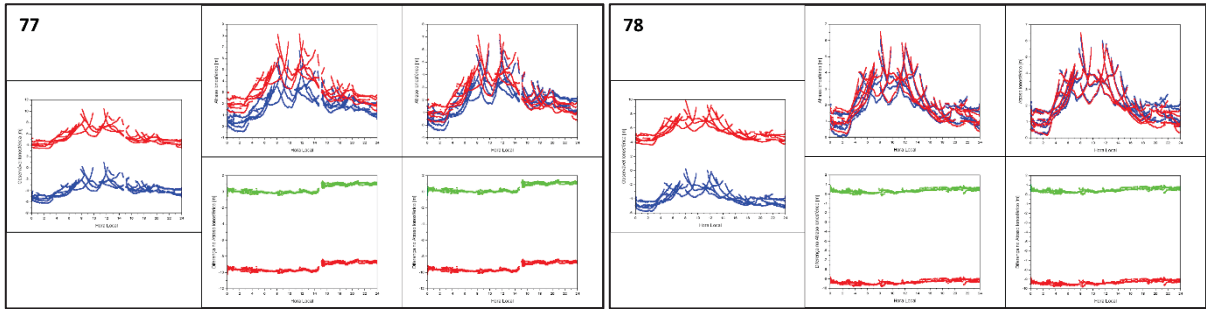
TEUNISSEN, P. J. G. **Adjustment Theory: an introduction**. Delft: Ed. Delft University Press, 2003, 193p.

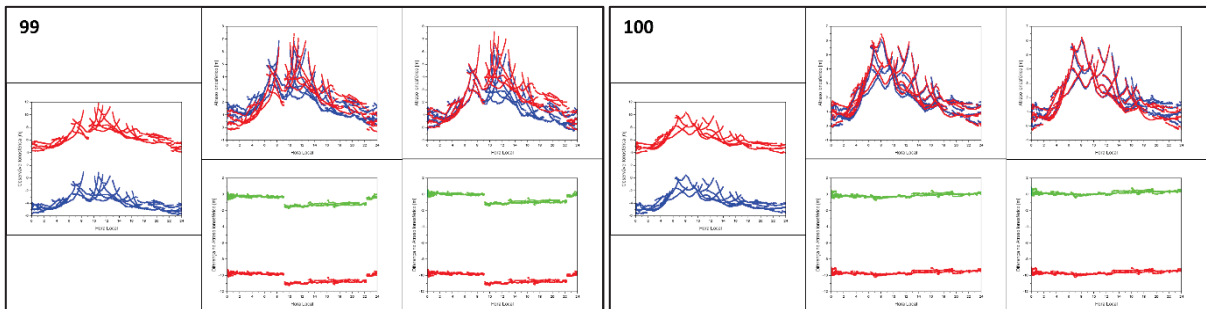
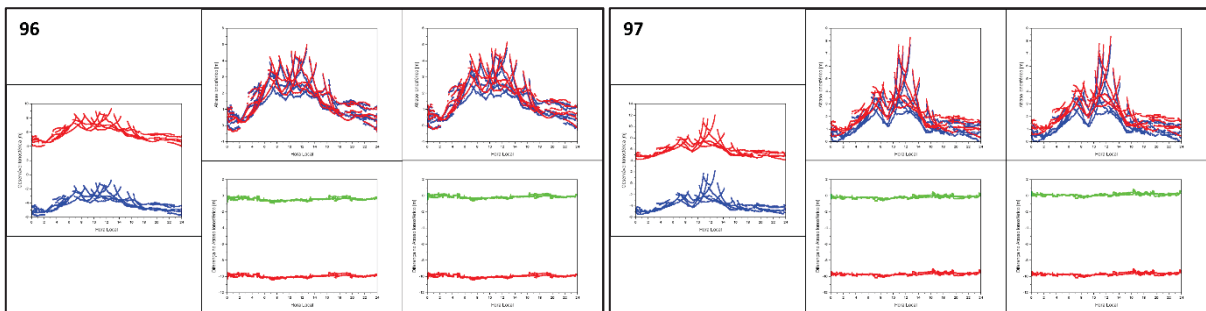
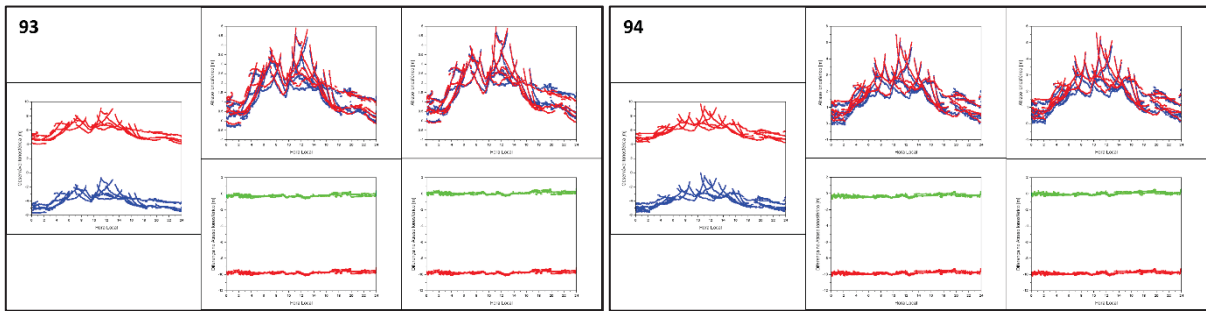
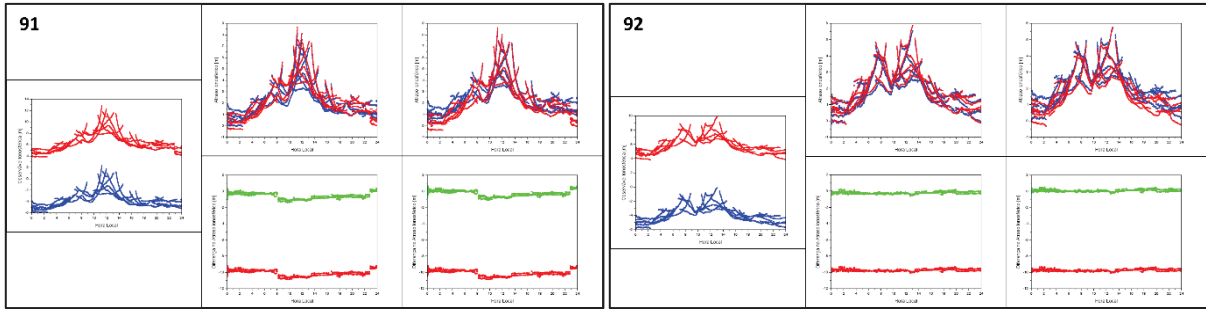
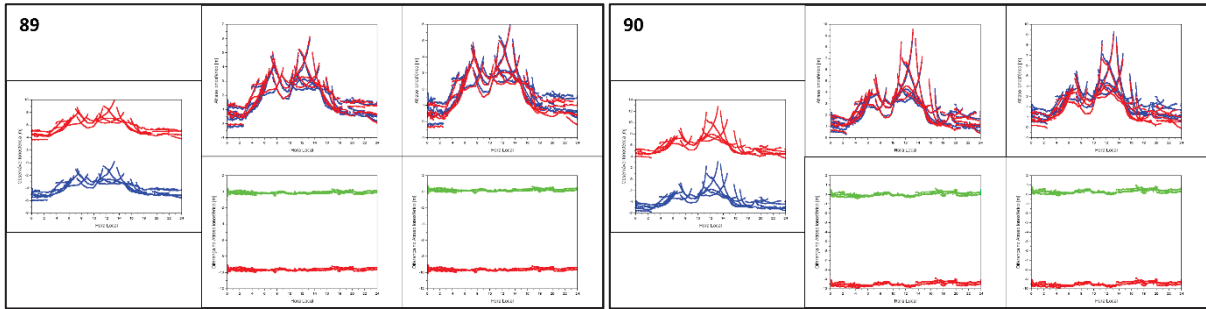
WARNANT, R. **Reliability of the TEC computed using GPS measurements - The problem of hardware biases**. *Acta Geod. Geophys.* 32 (3–4). 1997. p. 451–459.

ZHANG, B. TEUNISSEN, P. J. G., YUAN, Y. On the short-term temporal variations of GNSS receiver differential phase bias. **Journal of Geodesy**, v. 91, n. 5, p. 563-572, 2017.

APÊNDICE A – OBSERVÁVEL IONOSFÉRICA KAWE-MAYG







APÊNDICE B – OBSERVÁVEL IONOSFÉRICA TLIA-TLSE

