

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELIEL JESSÉ MORAIS DE JESUS JUNIOR

ESTIMAÇÃO E ANÁLISE DA ACELERAÇÃO HORIZONTAL EM ESTAÇÕES GNSS  
DE MONITORAMENTO CONTÍNUO



CURITIBA

2023

ELIEL JESSÉ MORAIS DE JESUS JUNIOR

ESTIMAÇÃO E ANÁLISE DA ACELERAÇÃO HORIZONTAL EM ESTAÇÕES GNSS  
DE MONITORAMENTO CONTÍNUO

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

Orientador: Prof.: Dr. Ivandro Klein

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior

CURITIBA

2023

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

Jesus Junior, Eliel Jessé Morais de

Estimação e análise da aceleração horizontal em estações GNSS de monitoramento contínuo / Eliel Jessé Morais de Jesus Junior. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Ivandro Klein

Coorientador: Paulo Sergio de Oliveira Junior

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Velocidade. 3. Aceleração. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Klein, Ivandro. IV. Oliveira Junior, Paulo Sergio de. V. Título.



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

ATA Nº375

## ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS

No dia dezolto de Julho de dois mil e vinte e tres às 14:00 horas, na sala Sala PI13 e videoconferência, Sala PI13 e videoconferência, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação do mestrando **ELIEL JESSE MORAIS DE JESUS JUNIOR**, intitulada: **Estimação e análise da aceleração horizontal em estações GNSS de monitoramento contínuo**, sob orientação do Prof. Dr. **IVANDRO KLEIN**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: **IVANDRO KLEIN** (INSTITUTO FED. DE EDUC., CIÊNC. E TECNOL. DE SANTA CATARINA), **REGIANE DALAZOANA** (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), **CHRISTIAN GONZALO PILAPANTA AMAGUA** (null). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela **APROVAÇÃO**. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, **IVANDRO KLEIN**, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 18 de Julho de 2023.

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 18:00:34.0

**IVANDRO KLEIN**

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

19/07/2023 09:04:58.0

**REGIANE DALAZOANA**

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 17:06:17.0

**CHRISTIAN GONZALO PILAPANTA AMAGUA**

Avaliador Externo (null)



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 **ELIEL JESSE MORAIS DE JESUS JUNIOR** intitulada: *Estimação e análise da aceleração horizontal em estações GNSS de monitoramento contínuo*, sob orientação do Prof. Dr. IVANDRO KLEIN, 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, 18 de Julho de 2023.

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 18:00:34.0

IVANDRO KLEIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

19/07/2023 09:04:58.0

REGIANE DALAZOANA

Avallador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 17:06:17.0

CHRISTIAN GONZALO PILAPANTA AMAGUA

Avallador Externo (null)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e meus pais, Pastores Sérgio e Eloísa, a cada passo que dei, recordo-me do impulso inicial e da paciência oferecida no início da jornada, não posso deixar de mencioná-los em cada vitória.

A minha bisavó Selma Andrade Corrêa, sua alegria e confiança é um pulso para seguir caminhando.

Agradeço aos meus orientadores acadêmicos, Dr. Ivandro Klein e Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Júnior, por suas instruções, paciência e correções.

À Prof. Dra. Claudia Pereira Krueger, por suas conversas e disponibilidade do laboratório.

Ao meu colega de trabalho, Renan Rodrigues Toledo Costa, por sua ajuda e explicações incansáveis.

A CAPES pelo apoio, sem o qual não teria sido possível realizar este trabalho.

E não podemos esquecer daqueles que geralmente passam despercebidos, os auxiliares de limpeza, cozinheiros e outros trabalhadores, sem os quais a universidade e todo o seu corpo não funcionariam. Todos Eles contribuem para o funcionamento desta grande instituição e seu progresso.

“À medida que exploramos os mistérios da Terra e desvendamos suas complexidades, somos constantemente lembrados de que nossa busca pelo conhecimento é um caminho interminável, impulsionado pela curiosidade incansável e pelo desejo de compreender as forças que moldam o nosso mundo.” - Autor desconhecido.

## RESUMO

Os estudos que envolvem a modelagem de dados geodésicos têm adquirido crescente importância e reconhecimento devido à ampla aplicação e utilização desses dados ao longo do tempo. Embora os levantamentos geodésicos com GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sejam relativamente acessíveis em termos de custo, a obtenção e representação precisa dos dados têm se mostrado um desafio significativo. A construção de modelos que representem de forma fidedigna a dinâmica e a interação complexa do planeta tem sido objeto de diversas pesquisas. Nesta dissertação, o objetivo principal é aprimorar a construção da variação temporal das coordenadas na superfície terrestre, por meio da integração dos cálculos de aceleração e velocidade, e analisar o impacto dessa abordagem na compatibilização entre épocas de referência. Os resultados preliminares indicam que a inclusão da aceleração pode aprimorar a modelagem e a precisão dos resultados em determinados cenários. Especificamente, observou-se que a inclusão da aceleração nos modelos resultou em melhorias na precisão quando feito a redução de coordenadas e nas estimativas dos parâmetros, especialmente em áreas onde há evidências de aceleração não linear com ganhos de modelagem variando de 36% a 88% em regiões geodinamicamente mais ativas e de 17% a 92% em regiões menos ativas. Essa pesquisa também destaca a importância de compreender o comportamento cinemático das estações GNSS ao longo do tempo para sua aplicação adequada. Em suma, esta dissertação visa contribuir para o avanço do conhecimento na área da geodésia, investigando a relevância da inclusão da aceleração na equação de transformação entre épocas de coordenadas GNSS e seu impacto nos estudos de séries temporais de dados geodésicos.

Palavras-chave: GNSS. Estações GNSS. Velocidade. Aceleração.

## **ABSTRACT**

Studies involving geodetic data modeling have gained increasing importance and recognition due to the widespread application and utilization of such data over time. Although geodetic surveys using GNSS (Global Navigation Satellite System) are relatively cost-effective, obtaining and accurately representing the data has proven to be a significant challenge. The construction of models that faithfully represent the dynamics and complex interaction of the planet has been the subject of various research efforts. In this dissertation, the main objective is to enhance the construction of temporal variations in coordinates on the Earth's surface by integrating acceleration and velocity calculations, and to analyze the impact of this approach on the compatibility between reference epochs. Preliminary results indicate that the inclusion of acceleration can improve the modeling and accuracy of results in specific scenarios. Specifically, it was observed that the inclusion of acceleration in the models led to improvements in accuracy when reducing coordinates and estimating parameters, especially in areas where there is evidence of nonlinear acceleration. Modeling gains ranged from 36% to 88% in more tectonically active regions and from 17% to 92% in less active regions. This research also highlights the importance of understanding the kinematic behavior of GNSS stations over time for their proper application. In summary, this dissertation aims to contribute to the advancement of knowledge in the field of geodesy by investigating the relevance of including acceleration in the transformation equation between GNSS coordinate epochs and its impact on the studies of geodetic data time series.

Keywords: GNSS. CORS. Velocity. Acceleration.

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

GNSS	- Global Navigation Satellite System
DORIS	- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
LLR	- Lunar Laser Ranging
MIDAS	- Median Interannual Difference Adjusted for Skewness
NGL	- Nevada Geodetic Laboratory
PPP	- Posicionamento por Ponto Preciso
SLR	- Satellite Laser Ranging
SGR	- Sistema Geodésico de Referência
VLBI	- Very Long Baseline Interferometry

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	16
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>18</b>
2.1 GEODÉSIA: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E CONCEITOS .....	18
2.2 GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM .....	18
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS .....	19
2.4 COMPATIBILIZAÇÃO DE COORDENADAS E MODELOS DE VELOCIDADES .....	21
2.5 SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS – GNSS .....	22
<b>3 ADAPTADO DO RESUMO ESTENDIDO PUBLICADO NOS ANAIS DO XII COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS/ V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA</b> .....	<b>24</b>
<b>ESTIMAÇÃO DA ACELERAÇÃO DE ESTAÇÕES GNSS ATIVAS</b> .....	<b>24</b>
<b>4 PROPOSTA DE ARTIGO A SER SUBMETIDO</b> .....	<b>30</b>
1 <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>30</b>
2 <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
2.1    PROCESSAMENTO NO <i>SOFTWARE HECTOR</i> .....	34
2.2    PROCESSAMENTO NO <i>SOFTWARE SCILAB</i> .....	35
3 <b>RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>38</b>
4 <b>DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
5 <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>
<b>ANEXO 1 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO CLL1</b> .....	<b>49</b>
<b>ANEXO 2 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO QLAP</b> .....	<b>50</b>
<b>ANEXO 3 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO MIZU</b> .....	<b>51</b>
<b>ANEXO 4 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO BELE</b> .....	<b>52</b>
<b>ANEXO 5 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO BRAZ</b> .....	<b>53</b>
<b>ANEXO 6 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO UFPR</b> .....	<b>54</b>

<b>APÊNDICE 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO GERAL.....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE 2 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BELE.....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE 3 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BRAZ.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE 4 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO UFPR.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA CLL1 .....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE 6 – ESTAÇÃO GNSS CLL1 – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE 7 – ESTAÇÃO GNSS CLL1 – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE 8 – ESTAÇÃO GNSS QLAP – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE 9 – ESTAÇÃO GNSS QLAP – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE 10 – ESTAÇÃO GNSS MIZU – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE 11 – ESTAÇÃO GNSS MIZU – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE 12 – ESTAÇÃO GNSS BELE – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE 13 – ESTAÇÃO GNSS BELE – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE 14 – ESTAÇÃO GNSS BRAZ – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE 15 – ESTAÇÃO GNSS BRAZ – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE 16 – ESTAÇÃO GNSS UFPR – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE 17 – ESTAÇÃO GNSS UFPR – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE 18 – MENÇÃO HONROSA – CATEGORIA MESTRADO GEODÉSIA E LEVANTAMENTOS .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O planeta Terra é um sistema físico complexo que passa por diversas interações para se manter em equilíbrio. Essas interações são estudadas, analisadas e posteriormente representadas por ciclos, como o ciclo das rochas, ciclo da água, ciclos dos gases, ciclo climático, entre outros. A compreensão da geodinâmica do globo terrestre e o desenvolvimento de modelos realistas que o representem envolvem diferentes abordagens e combinações de dados. No entanto, para que um modelo físico em escala reduzida reproduza de forma realista um exemplo natural, é necessário reduzir proporcionalmente as propriedades físicas da melhor maneira possível (HAAKON FOSSEN, 2010).

Diversos pesquisadores têm se dedicado a esse objetivo, testando e analisando diferentes técnicas de observação para entender, descrever e monitorar o movimento crustal, por exemplo, os receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) têm sido amplamente utilizados para diversas finalidades, como monitoramento de estruturas, locações de obras, georreferenciamento de imóveis rurais e urbanos, entre outros, isto, devido ao seu baixo custo e facilidade de uso (DA SILVA; DE FREITAS, 2020b; LIZARAZO; MORA PÁEZ; SANTA, 2014; MARQUES, 2013; MÔNICO, 2008; OKU TOPAL et al., 2023; SAVCHYN; BRUSAK; TRETAK, 2023).

Os deslocamentos e deformações das placas tectônicas são causados pela interação entre a crosta terrestre e o manto de material fluido. Esses processos ocorrem continuamente ao longo do tempo, resultando em uma dependência temporal para representá-las, ou seja, estão associadas ao momento de coletas das coordenadas (DE FREITAS, 2022). O uso das séries de coordenadas geradas através de dados GNSS têm sido amplamente utilizada como uma ferramenta fundamental para analisar, compreender e modelar o comportamento de fenômenos geofísicos (FREITAS; DAL POZ; NASCIMENTO, 2022; HOLDEN et al., 2017), todavia, a aplicação de dados GNSS é abrangente e possui diversas utilizações, que vão desde estudos de geodinâmica e geofísica até engenharia, agricultura de precisão, meteorologia, aeronáutica, navegação e atividades cotidianas de localização. Em resumo, as observações feitas pelos receptores GNSS permitem calcular a posição, velocidade, tempo e aceleração (MÔNICO, 2008).

Utilizando os dados de rastreamento GNSS, é possível obter e/ou estimar a variação temporal das coordenadas de um ponto específico na superfície terrestre. Isso pode ser realizado por meio de observações que permitem calcular as velocidades correspondentes ou através da aplicação de modelos de velocidade ou deformação (DREWES; HEIDBACH, 2005; TORSVIK et al., 2008).

Estudos envolvendo cinemática, deformações e receptores GNSS para modelar comportamentos estruturais ou determinação posicional de séries temporais de coordenadas são objetos de pesquisa, porém não costumam relacionar velocidade e aceleração em seus cálculos (BAYRAK et al., 2015; CARDOSO; GIORGINI; PAULA, 2020; MORAIS, 2017; RAMOS; DAL POZ; CARVALHO, 2021; SILVA; TRABANCO, 2016). Embora já tenham sido realizadas pesquisas explorando o tema, como a relação entre a combinação de dados de aceleração das estações GNSS e a análise de ruído, este estudo conduzido por Bogusz et al (2016), busca contribuir através da combinação de dados de aceleração e ruído. Isso pode proporcionar uma análise mais precisa e abrangente. Os resultados obtidos fornecem observações importantes sobre a influência da aceleração na precisão das medições GNSS. As conclusões indicam que a inclusão de um termo de aceleração quadrático pode trazer melhorias na modelagem e na precisão dos resultados em determinados cenários. Especificamente, quando há evidências claras de aceleração não linear nos dados, a inclusão desse termo quadrático pode resultar em ajustes mais precisos e estimativas aprimoradas dos parâmetros. Nesse viés, existe outro estudo que aborda a confiabilidade dos modelos utilizados em diferentes cenários de deformação, simulados por meio de uma rede geodésica. De acordo com os resultados obtidos, os modelos quadráticos demonstraram maior eficácia quando a aceleração é considerada como zero ou diferente de zero (DURDAG; HEKIMOGLU; ERDOGAN, 2018). Em síntese, a investigação da aceleração e sua integração com a velocidade emerge como um tema de importância substancial no estudo de séries temporais de coordenadas.

Ao determinar a coordenada de um ponto, essa coordenada está relacionada a um Sistema Geodésico de Referência (SGR) específico, o qual é previamente definido, materializado e realizado. A definição do SGR envolve um conjunto de convenções, parâmetros e configurações estabelecidas, enquanto a materialização ou realização corresponde à implantação dos pontos geodésicos (DALAZOANA,

2001; DALAZOANA; CORREIA DE FREITAS, 2020). Sendo assim, podemos afirmar que o SGR é gerado por meio de modelos, parâmetros e constantes (COSTA, 1999).

Quando temos um conjunto de pontos geodésicos materializados e ajustados a um sistema de coordenadas, temos o que chamamos de rede geodésica (OLIVEIRA, 1998). A rede geodésica consiste em um conjunto de pontos materializados e interligados cujas coordenadas foram ajustadas, além de estarem associados a uma dada época de referência (SUCI, 2012).

A época de referência está relacionada ao momento em que o levantamento foi realizado em campo, ou seja, significa que além dos três componentes que definirão a posição espacial, os dados de observação serão vinculados a informações temporais, nos trazendo a conceito do que hoje é conhecido como geodésia 4D, permitindo a análise de fenômenos geofísicos. (COSTA, 1999; DURDAG; HEKIMOGLU; ERDOGAN, 2018; LAMBECK, 2005; MATHER, 1978).

Com o intuito de validação de seus dados ou em busca de métodos que apresentem melhores resultados, é a justa razão pela qual a ciência enfatiza a necessidade de desenvolver novas ferramentas e técnicas para promover uma melhor compreensão dos fenômenos ao qual o Planeta e seus ciclos naturais estão sujeitos (EYO et al., 2014).

E em meio a este cenário, a presente pesquisa se apresenta com a proposta de incorporar um novo parâmetro para compatibilização de coordenadas. Através da análise da adição da aceleração na equação de compatibilização de coordenadas situadas em diferentes épocas. Pretende-se verificar a relevância deste parâmetro na equação e seu impacto em estudos de séries temporais de dados GNSS.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os dados das redes geodésicas são utilizados para diversas finalidades como implantação de referenciais geodésicos, cadastro de municípios, monitoramento de estruturas, locação de obras de engenharia, na implantação e manutenção de diversos serviços de infraestrutura, no monitoramento de fenômenos de natureza dinâmica na superfície terrestre, dentre outros (DREWES; HEIDBACH, 2012), (FAZAN, 2010), (PINTO, 2010), (IBGE, 1983), (DREWES & HEIDBACH, 2009). (DA SILVA; DE FREITAS, 2020b), A confiabilidade desses dados é fundamental, uma vez que as deformações na superfície terrestre refletem os complexos processos da

dinâmica do planeta. Portanto, é crucial entender essa interação para garantir a segurança da humanidade, prever o comportamento físico e otimizar o uso dos recursos naturais (SAVCHYN; BRUSAK; TRETAYAK, 2023), ao utilizar dados de posicionamento geodésico para criar séries temporais, é necessário garantir a compatibilidade entre as épocas de referência, e só assim a evolução temporal das coordenadas pode ser analisada adequadamente (SAPUCCI et al., 2000).

É essencial destacar que, para garantir a precisão e confiabilidade do processo, é imprescindível que os parâmetros estejam referenciados à mesma época das coordenadas de origem, ou seja, à época em que os dados geodésicos foram coletados. A correta compatibilização das coordenadas e épocas desempenha um papel crítico na obtenção de resultados acurados durante a aplicação do método de Helmert, assim como em outras transformações geodésicas similares. Essa abordagem aprimora a integração de dados provenientes de diferentes épocas, possibilitando a compreensão e análise de fenômenos geodésicos e geofísicos ao longo do tempo de forma consistente e precisa (RAMOS; DALPOZ; CARVALHO, 2022).

O método de Helmert é uma técnica amplamente utilizada para relacionar diferentes sistemas referenciais geodésicos, empregando um conjunto de 14 parâmetros, que incluem três parâmetros de translação, três de rotação, fator de escala e suas respectivas variações temporais, é importante salientar que os parâmetros deverão estar na mesma época das coordenadas de origem (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2015).

## 1.2 OBJETIVOS

Com base no exposto na introdução e salientado na justificativa, este trabalho tem como objetivos os listados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Calcular e analisar o impacto do uso da aceleração como parâmetro adicional na equação utilizada para realizar a compatibilização de coordenadas planimétricas entre épocas de referência.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Pode se listar como objetivos específicos:

- a) Realizar o cálculo da velocidade e aceleração das coordenadas em Estações GNSS ativas.
- b) Avaliar o impacto da inclusão da aceleração como parâmetro na determinação das velocidades das coordenadas.
- c) Investigar as implicações da aceleração na conversão de coordenadas entre diferentes épocas.
- d) Verificar a adequação do modelo que utiliza velocidade e aceleração, comparando-o com modelos externos disponíveis, como o VEMOS2017 e as velocidades fornecidas pelo site do SIRGAS e NGL (MIDAS).
- e) Realizar uma comparação e análise das coordenadas com e sem aceleração, utilizando o modelo de velocidade e aceleração desenvolvido neste trabalho e os serviços do IBGE-PPP.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação será apresentada em formato de artigo, onde será apresentado o resumo expandido que foi exposto no XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas/ V Simpósio Brasileiro de Geomática que ocorreu na cidade de Curitiba em 2022 e a proposta de artigo que será submetido a Revista Brasileira de Cartografia, sendo estruturado com os seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução - Neste capítulo, será apresentada uma introdução ao tema, fornecendo uma visão geral sobre o assunto, sua importância e contextualizando o leitor acerca da relevância do tema abordado.
- Capítulo 2: Contextualização - Este capítulo consiste em uma apresentação de conceitos relevantes para a compreensão do tema discutido, proporcionando ao leitor uma base teórica necessária.

- Capítulo 3: Resumo Expandido - Esta seção corresponde à versão completa e adaptada do resumo expandido apresentado no XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas/ V Simpósio Brasileiro de Geomática.
- Capítulo 4: Proposta de Artigo - Neste capítulo será apresentada a proposta de artigo que será submetido à Revista Brasileira de Cartografia, contendo os resultados e análises obtidos durante a pesquisa.
- Capítulo 5: Referências - Nesta seção são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da dissertação.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

### 2.1 GEODÉSIA: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E CONCEITOS

A Geodésia é uma ciência que se dedica ao estudo da forma e dimensões da Terra, buscando compreender sua estrutura e geometria (MÔNICO, 2008).

Nesse contexto, a Geodésia emergiu como uma ciência que, por meio de observações e análises, coleta dados e informações sobre fenômenos quanto a movimentação natural terrestre e seus efeitos. E para atingir seus objetivos, a Geodésia emprega uma variedade de técnicas, tais como GNSS, SLR (*Satellite Laser Ranging*), Nivelamento Geométrico, VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*), Gravimetria Terrestre, Gravimetria Marinha, Gravimetria Aérea, dentre outras (De Freitas, Dalazoana, & Ferreira, 2012).

Essa diversidade de técnicas permite realizar cálculos e gerar modelos que fornecem informações sobre a Geometria, Cinemática, Rotação e Campo Gravitacional do Planeta Terra, estes que são considerados os pilares fundamentais da Geodésia. Após a compatibilização dos resultados obtidos por essas técnicas, eles podem ser utilizados para atualizar ou até mesmo gerar novos Sistemas e Redes Geodésicas de Referência (DE FREITAS; DALAZOANA; FERREIRA, 2012; DREWES, 2006).

Dentre as várias técnicas disponíveis e mencionadas anteriormente, o presente trabalho utilizará observações provenientes da técnica GNSS como fonte de dados para análise.

### 2.2 GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

O NAVSTAR-GPS, também conhecido como GPS (*Global Position System*), foi desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos na década de 1970. Simultaneamente, a antiga URSS desenvolveu a constelação GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*). Mais tarde, na década de 1990, a Agência Espacial Europeia iniciou o desenvolvimento do sistema Galileo. Inicialmente, esses projetos possuíam diferentes conceitos de uso e controle, alguns com finalidades militares e outros com uso civil. No entanto, durante a 10ª Conferência de Navegação

Aérea, o termo GNSS foi adotado no meio científico, unificando todas as constelações sob um único conceito, tanto as antigas quanto as mais recentes (MÔNICO, 2008).

Cada sistema de navegação por satélite é composto por três segmentos essenciais. O segmento espacial, que está relacionado à quantidade de satélites, sua cobertura e plano orbital. O segmento do usuário, que se refere aos receptores e suas configurações específicas para diferentes finalidades. E o segmento de controle, responsável por monitorar, controlar, calcular efemérides dos satélites e correções, além de realizar atualizações periódicas (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MÔNICO, 2008), as constelações se diferem uma da outra em suas especificações quanto a estes segmentos.

A operação fundamental do GNSS se baseia nas observações de pseudodistâncias entre um receptor e, pelo menos, quatro satélites. Ao rastrear com sucesso essa quantidade mínima de satélites, o usuário tem a capacidade de determinar as coordenadas de um ponto específico, independentemente de sua localização na superfície terrestre. Diferentemente das técnicas convencionais, o GNSS não requer visibilidade direta entre pontos (MÔNICO, 2008).

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS

Os levantamentos geodésicos são classificados e recebem diferentes denominações com base nas abordagens e técnicas empregadas ao longo do processo, tanto durante as observações de campo quanto no tratamento dos dados. Essas, podem ser: relativas, absolutas, estáticas e cinemáticas. Quanto ao método de processamento dos dados, eles podem ser classificados como pós-processados, onde as observações são processadas após a coleta, ou em tempo real, durante a própria coleta das observações (ALVES, 2008; DE OLIVEIRA JUNIOR, 2015; MÔNICO, 2008).

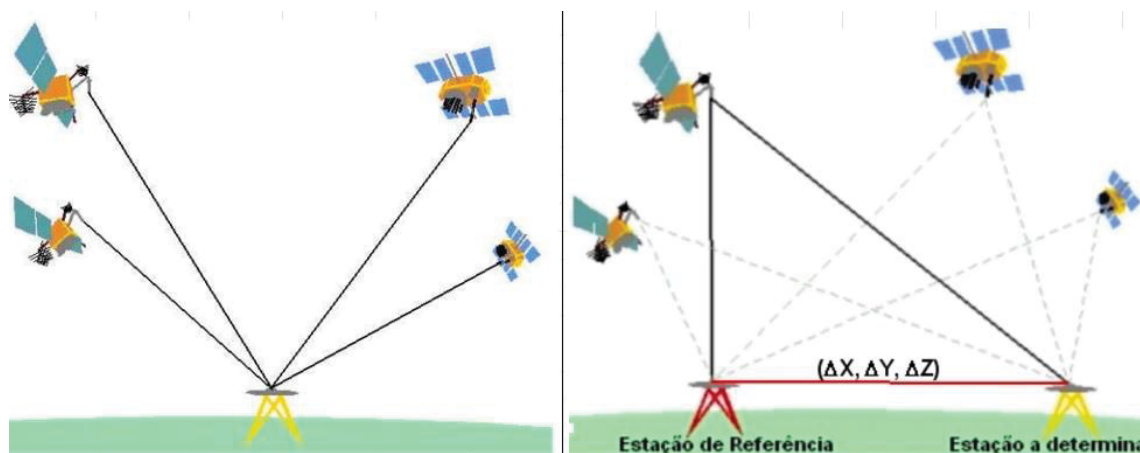
O método relativo consiste no uso de dois ou mais receptores GNSS, que são simultaneamente implantados e posicionados tanto em marcos geodésicos previamente estabelecidos e das quais suas coordenadas já estão calculadas, e os outros receptores em locais cujas coordenadas necessitam de determinação. Esses receptores captam os sinais emitidos por satélites em comum, registram as observações e mediante processamento e combinação dessas observações, juntamente com informações cruciais sobre tempo e posição dos satélites, torna-se

viável o cálculo preciso das coordenadas. Quanto ao método absoluto os receptores GNSS são posicionados nos pontos de interesse sem a necessidade de marcos geodésicos pré-existentes como referência. Esses receptores rastreiam os sinais emitidos por satélites GNSS e utilizam informações precisas de tempo e posição dos satélites para calcular diretamente as coordenadas geodésicas. Esse método oferece uma abordagem independente de estruturas terrestres locais e proporciona uma obtenção direta das coordenadas globais. Ainda há a classificação quanto ao emprego do receptor, estes podem estar parado ou em movimento, e no qual são denominados de estáticos ou cinemáticos respectivamente (MÔNICO, 2008).

O método de Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP) é caracterizado pelo uso de um único receptor, em que o equipamento ocupa um ponto específico e as coordenadas são determinadas independentemente, sem a necessidade de conexão com outras estações. Isso difere dos levantamentos relativos, nos quais uma linha de base é estabelecida, conforme é representado na Figura 1. No entanto, essa abordagem também pode apresentar desvantagens, como dificuldade ou impossibilidade, em alguns casos, de realizar análises de fechamento de circuitos, aplicação de testes estatísticos em rede e análises de confiabilidade (COLLISCHONN; MATSUOKA, 2016). Apesar dessas limitações, nos últimos anos, diversos estudos têm sido conduzidos sobre esse método (COLLISCHONN; MATSUOKA, 2016; FREITAS; DAL POZ; NASCIMENTO, 2022; KLEIN; MATSUOKA; SOUZA, 2010; MARQUES et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2017).

Ainda sobre o método PPP podemos dizer que ele consiste na determinação de coordenadas de uma Estação fixando-se a órbita e demais parâmetros dos satélites. Para isso, são utilizados dados de efemérides precisas e correções de relógios. As efemérides referem-se às informações (elementos keplerianos ou orbitais) que descrevem a posição do satélite quando ocorre a coleta de dados. Quando esses dados são processados posteriormente, são chamados de efemérides precisas. Por outro lado, quando as informações são obtidas diretamente dos sinais dos satélites, são denominadas de efemérides transmitidas (*broadcast*) (MÔNICO, 2008).

FIGURA 1 – Método de Posicionamento PPP X Relativo



Fonte: IBGE (2008).

## 2.4 COMPATIBILIZAÇÃO DE COORDENADAS E MODELOS DE VELOCIDADES

Os modelos de velocidades de placas tectônicas são fundamentais para compreender o movimento e a dinâmica das placas que compõem a litosfera terrestre. Através de observações geodésicas, como dados de GPS e informações geofísicas, esses modelos fornecem detalhes cruciais sobre as taxas de deslocamento das placas, os limites e interações entre elas, e possibilitam a previsão de atividades sísmicas e vulcânicas. Essas informações são essenciais para avaliar o risco geológico em áreas de interesse e para estudar a geodinâmica da Terra. Como resultado, os modelos de velocidades de placas tectônicas são ferramentas poderosas para avançar em nosso conhecimento sobre a tectônica de placas e suas implicações em termos de atividade geológica (DA SILVA; DE FREITAS, 2020; SAPUCCI; MONICO, 2000)

Os movimentos das placas devem ser considerados para que se tenha êxito nas transformações em dados GNSS de diferentes épocas, o acompanhamento da variação de coordenadas ao longo do tempo produz determinada velocidade, que por sua vez auxiliam no estabelecimento de modelos de velocidades, utilizando se destes modelos, são feitas as devidas compatibilizações (BRASSAROTE, 2020; COSTA, 1999).

Na presente pesquisa, foram empregados os seguintes modelos matemáticos de velocidades:

- VEMOS - É um modelo regional de velocidades de placas tectônicas desenvolvido para a América do Sul. Ele foi obtido por meio da análise conjunta de dados de duas técnicas geodésicas: DORIS e SLR. O VEMOS oferece uma representação detalhada das velocidades de deslocamento horizontal das placas tectônicas na região sul-americana. Existem diferentes versões do VEMOS, sendo a mais recente a VEMOS2017 (DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020).
- MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness*) - É um método estatístico robusto desenvolvido com base no estimador de tendência Theil-Sen. Esse método foi projetado especialmente para estimar com precisão a velocidade de estações GPS, levando em consideração características como insensibilidade à variaç sazonal e resistência a descontinuidades abruptas na série temporal. Ao contrário dos métodos tradicionais de mínimos quadrados, o MIDAS incorpora a mediana das diferenças interanuais entre todos os possíveis pares de dados, resultando em estimativas de tendência resistentes a valores atípicos e refletindo o relacionamento predominante entre os pontos (BLEWITT et al., 2016).
- SIRGAS - O portal do SIRGAS fornece valores de velocidades derivados de séries de coordenadas semanais, posteriormente essas velocidades são utilizadas para determinação e elaboração dos cálculos do VEMOS, no qual essas velocidades individuais são sujeitas a um processo de interpolação e normalização, resultando em múltiplas versões. Essa variação ocorre em virtude das atualizações das coordenadas geodésicas (DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020).

## 2.5 SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS – GNSS

Uma série temporal pode ser definida como uma sequência de observações coletadas ao longo do tempo, selecionadas a partir de um conjunto de trajetos possíveis para um estudo específico (LIZARAZO; MORA PÁEZ; SANTA, 2014).

No caso de séries de coordenadas, elas consistem em um conjunto de variáveis ordenadas no tempo. A análise dessas séries contribui para revelar características de eventos específicos que ocorrem ao longo do tempo no planeta Terra e a geodinâmica envolvida. Às séries temporais são documentadas em várias áreas, como geofísica, meteorologia, sismologia, geodésia, entre outras. Cada área está associada a dados específicos que compõem as séries, permitindo obter informações sobre as influências temporais dos fatores que afetam o fenômeno em análise (MORETIN; TOLOI, 2004), exemplos desses estudos e relação com o tempo constam no Quadro 1, assim como suas referências que poderão ser consultadas na integra.

QUADRO 1 – ESTUDOS ENVOLVENDO SÉRIES TEMPORAIS EM DIVERSAS TEMÁTICAS

<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Autor</b>
2012	Análise de deformação por variação do geopotencial: estudo de caso para o terremoto maule (Mw 8,8) com base em dados mensais da missão Grace	Castro, H. M. et al
2013	Modelo estocástico para dados GNSS e séries temporais de coordenadas GNSS	Marques, H. A. S.
2015	Spatio-temporal variations of b-value in and around north Pakistan	Rehman, K. et al
2015	A utilização de filtros digitais em séries temporais GNSS	Lima, J. N.
2016	Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no datum vertical brasileiro de Imbituba-SC	Dalazoana, R.
2016	Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP	Nascimento, L. A.
2018	The Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network (COCONet): Data Products and Application to GPS and Tsunami Hazard.	Blewitt, G. et al
2020	Estimativas do Nível do Mar na América do Sul a partir de Registros Maregráficos e Coordenadas SIRGAS-CON.	Calado, L. G. L. P. et al
2023	Avaliação de índices de vegetação NDVI e EVI na bacia hidrográfica do rio Pajeú/Pernambuco/Brasil a partir de séries temporais MODIS MOD13A1	Pacheco, A. P. et al.

Fonte: O Autor (2023).

### 3 ADAPTADO DO RESUMO ESTENDIDO PUBLICADO NOS ANAIS DO XII COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS/ V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA

Neste capítulo, introduzimos o resumo que se segue, o qual foi apresentado e laureado no Colóquio com menção honrosa (Apêndice 18), na categoria Mestrado - Geodésia e Levantamentos no XII CBCG e V SBG, IEEE/GRSS Brazil. Este reconhecimento atesta a sua relevância e contribuição para o campo em questão. Sua premiação em um evento de tal renome solidifica a sua posição como um destaque no âmbito da pesquisa em Geodésia e Levantamentos, reforçando sua significância proeminente.

#### ESTIMAÇÃO DA ACELERAÇÃO DE ESTAÇÕES GNSS ATIVAS

ELIEL JESSE MORAIS DE JESUS JUNIOR<sup>1</sup>

RENAN RODRIGUES TOLEDO COSTA<sup>2</sup>

IVANDRO KLEIN<sup>3</sup>

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná – [elieljesse@ufpr.br](mailto:elieljesse@ufpr.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná – [renanrtc@gmail.com](mailto:renanrtc@gmail.com)

<sup>3</sup>Curso Técnico de Agrimensura (IFSC) / Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (UFPR) – [ivandroklein@gmail.com](mailto:ivandroklein@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal do Paraná – [paulo.junior@ufpr.br](mailto:paulo.junior@ufpr.br)

Estudos de cinemática são desenvolvidos com o intuito de modelar deformações obtendo assim dados que permitem conhecer o comportamento e ou movimento das placas tectônicas, a exemplo temos o NNR-NUVELL1-A (*No Net Rotation - Northern University Velocity Model*) [1,2]. Estes deslocamentos são ocasionados devido a posição da Crosta sobre o manto de material fluido e as interações entre as múltiplas placas que formam a Crosta, devido a esta dinâmica as coordenadas sofrem alteração contínua no decorrer do tempo ocasionando assim uma dependência temporal a época em que foram observadas, e por isso a variação temporal de posição tem sido utilizada como uma das principais ferramentas para analisar e entender os fenômenos geofísicos [3] através de sua decomposição vetorial [4]. Sendo assim, as séries temporais de redes GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ativas são objeto de estudo e na sua grande maioria tem-se a estimação de velocidades como foco principal [5]. Poucas pesquisas na literatura sobre o tema relacionam velocidade e aceleração, em nosso conhecimento todas estas relacionadas ao monitoramento geodésico de estruturas [6,7]. Desta forma, esta pesquisa visa analisar a aceleração de estações GNSS ativas, contribuindo assim para os estudos que consideram a dinâmica crustal da superfície terrestre. A metodologia desse trabalho fez uso de dados de estações GNSS ativas disponibilizados pelo laboratório da Universidade de Nevada (*Nevada Geodetic Laboratory - NGL*) [8], sendo estes arquivos com coordenadas calculadas e suas respectivas precisões, os mesmos se utilizam do *software* GipsyX (versão 1.0) do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). O método de processamento utilizado pelo NGL é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), e os dados são vinculados ao referencial IGS14 (ITRF2014) com base na posição da época de 2013,9713, resultando no fornecimento de soluções diárias GNSS, denominadas de NGL14 [9]. Após uma análise dos dados disponíveis no *website* do NGL, a estação CLL1 foi selecionada pelo comportamento do gráfico de suas coordenadas, com aceleração evidente na componente este. A estação CLL1 faz parte de uma rede localizada na Universidad de Concepción, na cidade de Chillan, numa região vulcânica da Região de Ñuble no Chile. Foi escolhida uma data de referência, 01/06/2011, e o período analisado compreende 10 anos, ou seja, entre 01/06/2011

a 01/06/2021, sendo considerados valores de deslocamento nas direções “Este” (E) e “Norte” (N) em períodos anuais. A direção vertical foi desconsiderada, pois em geral apresenta variações cíclicas mais complexas, como por exemplo, padrão senoidal. Selecionada a data de referência para contagem inicial (01/06/2011), utilizou-se dados a cada 365 dias, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados considerados no experimento

Data	Tempo: $\Delta t^{0 \rightarrow i}$ (anos)	Deslocamento Este: $\Delta E^{0 \rightarrow i}$ (m)	Deslocamento Norte: $\Delta N^{0 \rightarrow i}$ (m)	Desvio- padrão Este (m)	Desvio-padrão Norte (m)
01/06/2011	0	0	0	0,0008	0,0008
01/06/2012	1	-0,0647	0,0132	0,0007	0,0008
01/06/2013	2	-0,1075	0,0333	0,0007	0,0008
01/06/2014	3	-0,1297	0,0515	0,0007	0,0008
01/06/2015	4	-0,1459	0,0710	0,0007	0,0008
01/06/2016	5	-0,1623	0,0794	0,0006	0,0008
01/06/2017	6	-0,1686	0,0939	0,0006	0,0008
01/06/2018	7	-0,1750	0,1053	0,0007	0,0008
01/06/2019	8	-0,1756	0,1212	0,0007	0,0008
01/06/2020	9	-0,1795	0,1356	0,0007	0,0008
01/06/2021	10	-0,1760	0,1468	0,0007	0,0008

Fonte: Os Autores (2022).

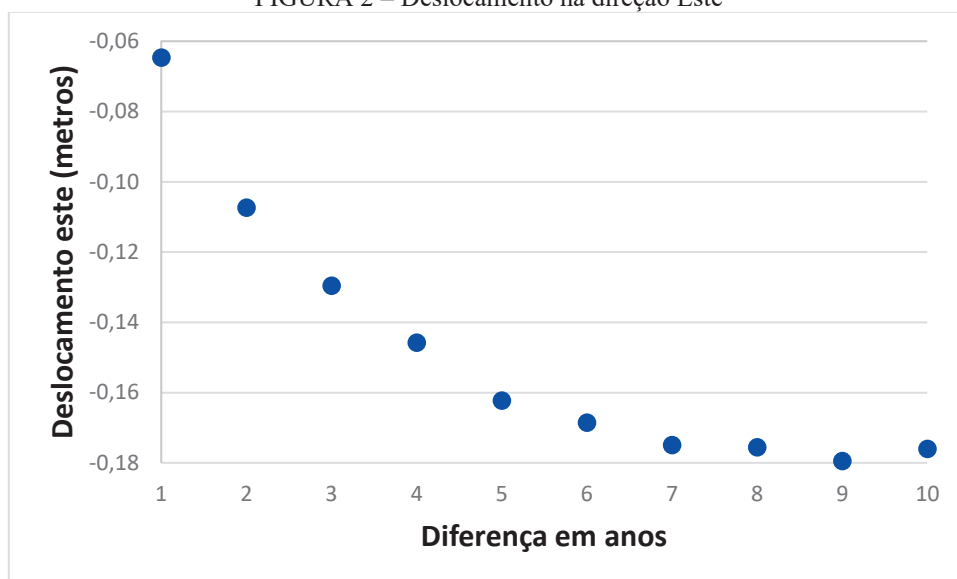
As matrizes do ajustamento pelo modelo paramétrico para obtenção de velocidade e aceleração foram elaboradas considerando as equações clássicas de movimento retilíneo uniformemente acelerado da Física (Equação 1).

$$\Delta E^{0 \rightarrow i} = V_E \Delta t^{0 \rightarrow i} + \frac{1}{2} a_E (\Delta t^{0 \rightarrow i})^2 \quad (1)$$

$$\Delta N^{0 \rightarrow i} = V_N \Delta t^{0 \rightarrow i} + \frac{1}{2} a_N (\Delta t^{0 \rightarrow i})^2$$

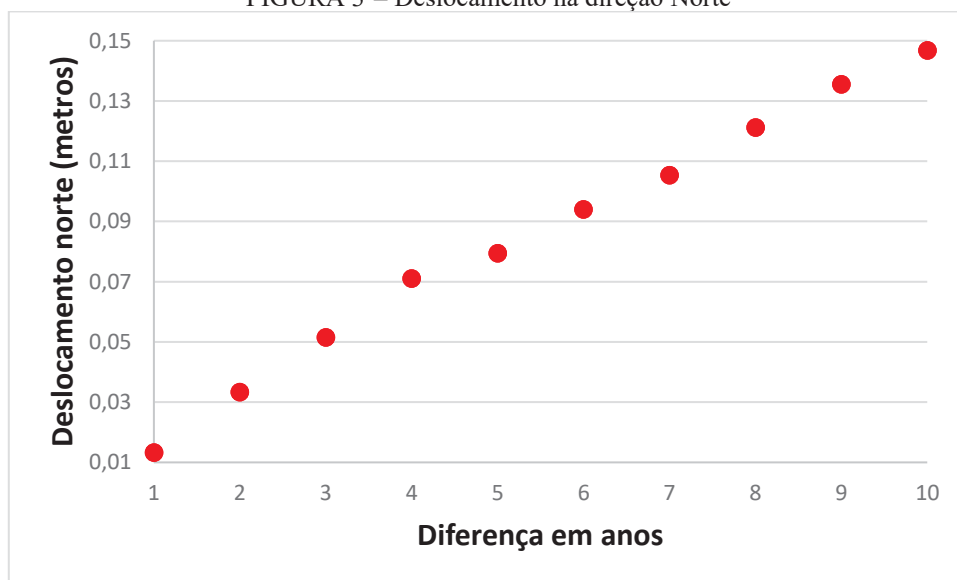
No caso, a matriz jacobiana (matriz A) é obtida por meio do modelo de ajustamento, que expressa as observações (deslocamentos) em função dos parâmetros a serem estimados (velocidade e aceleração), enquanto os desvios-padrões (inicialmente das coordenadas) permitem obter a matriz de variância-covariância (MVC) dos deslocamentos e, portanto, a matriz peso do ajustamento [6]. O vetor das observações (deslocamentos) é dado pelos elementos da terceira coluna, a partir da segunda linha da Tabela 1 para a componente este e pelos elementos da quarta coluna, a partir da segunda linha da Tabela 1 para a componente norte. Note que o modelo de ajustamento é linear em relação aos parâmetros (velocidade e aceleração). As Figuras 2 e 3, relativas à série temporal no período analisado, indicam claramente um deslocamento não linear (com aceleração) na componente este (Figura 2), e um deslocamento relativamente linear, sem ou com baixa aceleração, na componente norte (Figura 3).

FIGURA 2 – Deslocamento na direção Este



Fonte: Os Autores (2022).

FIGURA 3 – Deslocamento na direção Norte



Fonte: Os Autores (2022).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos considerando no ajustamento a estimação da velocidade e aceleração em ambos os casos; enquanto a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos considerando no ajustamento a estimação somente da velocidade (considerando aceleração nula) em ambos os casos.

Tabela 2: Velocidade e Aceleração estimadas (componentes Este e Norte)

	Velocidade e Aceleração Estimadas	
	Este	Norte
v (mm/ano)	$-49,9 \pm 0,21$	$17,6 \pm 0,23$
a(mm/ano <sup>2</sup> )	$6,7 \pm 0,05$	$-0,6 \pm 0,06$

Fonte: Os Autores (2022).

Tabela 3: Velocidade estimada considerando aceleração nula (componentes Este e Norte)

v (mm/ano)	Velocidade Estimada (Aceleração Nula)	
	Este	Norte
	$-23,6 \pm 0,05$	$15,3 \pm 0,06$

Fonte: Os Autores (2022).

As velocidades estimadas pelo NGL [8] foram de  $-0,97$  mm/ano e  $14,34$  mm/ano nas componentes: E e N (este e norte), respectivamente. Os valores obtidos para a componente norte estão de acordo com os estimados pelo NGL, mas a velocidade na componente este está muito discrepante, o que requer uma análise mais profunda da estratégia adotada pelo NGL. Por fim, foi realizado um teste estatístico ao nível de significância de 5% para verificar se a aceleração estimada é estatisticamente significativa em ambos os casos, por meio da razão de verossimilhança, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados estatísticos testando a significância da aceleração estimada (nível de significância de 5%)

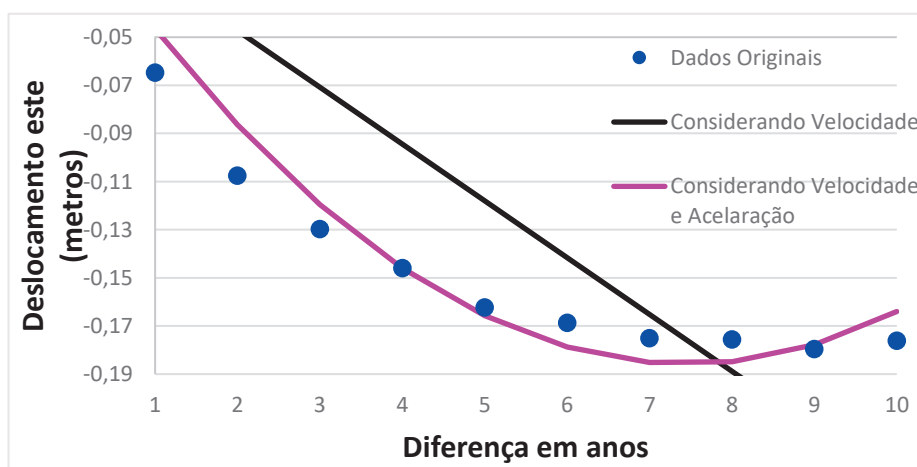
Valor crítico de teste	Estatística de teste calculada	
	Componente Este	Componente Norte
3,84	17.047,52	102,95

Fonte: Os Autores (2022).

No caso, a estatística de teste é dada pela diferença entre a soma ponderada do quadrado dos resíduos do modelo sem aceleração (hipótese nula) e do modelo com aceleração (hipótese alternativa). Se esta estatística de teste for maior que o valor crítico segundo o nível de significância estipulado, a hipótese alternativa é aceita [10].

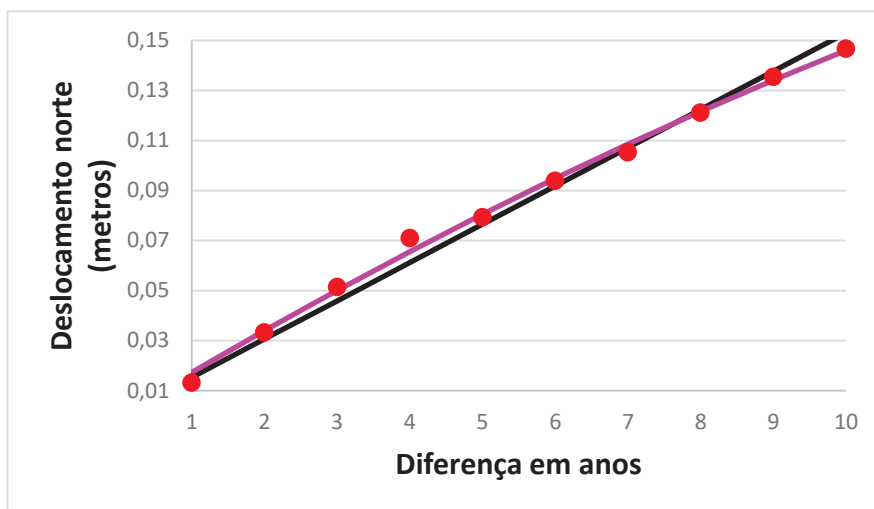
Analisando a Tabela 4, como as estatísticas calculadas superam o valor crítico de teste, nota-se que a aceleração foi estatisticamente significativa em ambos os casos, ou seja, a consideração da aceleração produz uma modelagem mais adequada dos deslocamentos tanto na direção este quanto na direção norte para a estação GNSS ativa considerada no período analisado. Para visualizar estas diferenças, as Figuras 4 e 5 apresentam a reta (em preto) do modelo com somente velocidade e da curva (em magenta) do modelo com velocidade e aceleração para as componentes este e norte, respectivamente. Embora visualmente a diferença seja maior na componente este, destaca-se que a aceleração estimada foi estatisticamente significativa em ambos os casos.

FIGURA 4 – Modelos estimados para a série da componente Este



Fonte: Os Autores (2022).

FIGURA 5 – Modelos estimados para a série da componente Norte



Fonte: Os Autores (2022).

Estes resultados preliminares demonstram a importância da estimação da aceleração em séries temporais de estações GNSS ativas, como proposto nesta pesquisa. Para a sua continuidade, pretende-se analisar mais estações GNSS ativas em uma área maior, podendo-se investigar estimações de velocidades e acelerações conjuntas (mesma aceleração e velocidade “de bloco” para todas as estações ativas consideradas), bem como individuais (como realizado neste primeiro experimento), visando compreender melhor o padrão de deformações geodinâmicas que ocorrem nestas regiões. Nas próximas etapas dessa pesquisa outras fontes de dados para séries temporais de estações GNSS ativas além da Universidade de Nevada também devem ser usadas, como dados da rede SIRGAS-CON [11]. Além disso, serão propostas novas alternativas para medição do grau de confiabilidade, tendo como objetivo obter valores que expressem a “menor aceleração detectável do modelo”, em função das matrizes do ajustamento e da Teoria de confiabilidade convencional proposta em Baarda (1968) [12].

**Palavras-chaves:** deformação cinemática; GNSS; estações ativas; aceleração; geodinâmica.

### Referências

- [1], LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3.ed. United States: John Wiley, 2004. 435p.
- [2], McCARTHY, D.D.; PETIT, G. IERS Conventions (2003). **IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt. 2004. 127p**
- [3], DE FREITAS, Krisley Xavier Soares; DAL POZ, William Rodrigo; NASCIMENTO, Lécio Alves. Potencial da Utilização de Multivelocidade no Processo de Atualização Temporal de Coordenadas no PPP. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 74, n. 3, 2022.
- [4] Rosa, Guilherme Poleszuk dos Santos. R694a Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS : uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais / Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa. - Presidente Prudente: [s.n], 2008 106 f.: il.
- [5], BAYRAK, TEMEL et al. Desenvolvimento de um método de monitoramento de deslizamento de terra alternativo de baixo custo usando dados da Rede GNSS TUSAGA-Aktif. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, p. 610-623, 2015.
- [6], LIMA, José Nuno et al. A Integração do GNSS no Controlo de Segurança de Grandes Estruturas, **5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**, 2014.
- [7], LIMA, José Nuno; OLIVEIRA, Sérgio; HENRIQUES, Maria João. Fusão de deslocamentos medidos com o GNSS e acelerações.
- [8], University of Nevada, Reno, 2022. Disponível em: < <http://geodesy.unr.edu>>. Acesso em: 15, janeiro de 2022.

- [9], GIEHL, Samoel; DALAZOANA, Regiane; SANTANA, Túlio Alves. Comparação da componente vertical GNSS determinada pelas soluções do SIRGAS e do NGL para propósitos de análise da variação do nível do mar em Imbituba-SC. In: **GeoInfo**. 2021. p. 240-245.
- [10], TEUNISSEN, P. Testing Theory: an introduction. 2º ed. **Delft University Press**, 2006.
- [11], SIRGAS, <<https://www.sirgas.org/pt/>>.
- [12], BAARDA, W. A testing procedure for use in geodetic networks. **Pub. on Geod., New Series**, v. 2, n. 5, 1968.

## 4 PROPOSTA DE ARTIGO A SER SUBMETIDO

**Resumo:** As séries de coordenadas oriundas de estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) são utilizadas para as mais diversas finalidades, como, por exemplo, na estimação de modelos de velocidades. Estes modelos são aplicados na atualização temporal de coordenadas, compatibilizando dados de uma determinada data do levantamento para uma época de referência. Entretanto, o padrão de deslocamento horizontal pode não ser perfeitamente descrito por um modelo linear com velocidade constante ao longo do tempo. Neste trabalho, apresentamos a proposta de inclusão da aceleração horizontal em estações GNSS de monitoramento contínuo. Foram analisadas as componentes horizontais (Este e Norte) de estações localizadas no Brasil (BRAZ, BELE e UFPR), Chile (CLL1 e QLAP) e Japão (MIZU), por meio da modelagem linear com polinômio de grau 1 (somente velocidade) e não linear com polinômio de grau 2 (velocidade e aceleração). Além disso, atualizações temporais para dada época de referência também foram analisadas em ambos os modelos. Em geral, a inclusão da aceleração melhora significativamente os resultados para as estações do Chile e Japão, localizadas próximo a borda de placas tectônicas. Entretanto, mesmo para o caso de estações no Brasil a inclusão da aceleração pode apresentar melhoras significativas ( $\approx 10$  mm em termos absolutos e  $\approx 92\%$  em termos relativos) na atualização temporal de coordenadas. Desta forma, a principal recomendação é a inclusão da modelagem não linear da atualização temporal de coordenadas na próxima realização do Sistema Geodésico Brasileiro, seguindo a tendência das últimas realizações do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) e também seu uso pode ser estendido ao monitoramento de grandes estruturas, ao qual requer a elaboração de dados em série que representem perfeitamente o seu comportamento ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** aceleração, séries temporais, estações GNSS; atualização temporal de coordenadas.

**Abstract:** Coordinate time series of CORS (Continuous Operating Reference Stations) GNSS (Global Navigation Satellite System) are used for various purposes, such as estimating velocity models. These models are applied in Epoch transformation of coordinates, aligning data from a specific Positioning survey date to a reference epoch. However, the pattern of horizontal displacement may not be perfectly described by a linear model with a constant velocity over the time. In this study, we propose the inclusion of horizontal acceleration in continuous monitoring GNSS stations. We analyzed the horizontal components (East and North) of stations located in Brazil (BRAZ, BELE, and UFPR), Chile (CLL1 and QLAP), and Japan (MIZU), using linear modeling with a first-degree polynomial (velocity only) and nonlinear modeling with a second-degree polynomial (velocity and acceleration). Additionally, Epoch transformation for a given reference epoch were also analyzed in both models. Overall, the inclusion of acceleration significantly improves the results for stations in Chile and Japan, located near tectonic plate boundaries. However, even for stations in Brazil, the inclusion of acceleration can lead to significant improvements ( $\approx 10$  mm in absolute terms and  $\approx 92\%$  in relative terms) in the temporal update of coordinates. Therefore, the main recommendation is to include the nonlinear model of temporal coordinate updates in the next realization of the Brazilian Geodetic System, following the trend of recent realizations of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Furthermore, its use can be extended to monitoring big structures, which requires the development of time series data that accurately represent their behavior over time.

**Keywords:** acceleration, time series, CORS; temporal coordinate adjustment.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) possui diversas aplicações em áreas da Ciência como a Geodésia e a Geodinâmica. Dados de estações GNSS de monitoramento contínuo, isto é, que operam de forma ininterrupta, quando coletados por diversos anos fornecem séries de coordenadas (posições) que podem ser utilizadas, por exemplo, permitem estudar o movimento da superfície terrestre ao longo do tempo (SELLA; DIXON; MAO, 2002; ALVES; SANTOS; GEMAEL, 2003). No caso, uma das principais causas do deslocamento físico da posição da estação ao longo do tempo é o movimento das placas tectônicas, mas outros sinais também podem ser devidamente modelados, como por exemplo, devido as redistribuições sazonais de massas (BOGUSZ; KLOS, 2016).

Desta forma, em geral os países adotam uma realização e a época esta associada a essa realização, concomitante aos seus respectivos sistemas geodésicos de referência. No caso do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), atualmente temos o SIRGAS (Sistema de Referência Geodésico para as Américas) na realização SIRGAS2000, cuja época de referência das coordenadas ou posições em relação ao geocentro é Maio de 2000 ou 2000,4 (IBGE, 2005). Portanto, regressões ou atualizações temporais de coordenadas de uma dada época (por exemplo, a época do levantamento geodésico) para a época de referência (por exemplo, Maio de 2000) são necessárias e rotineiramente utilizadas (ver, por exemplo, MONICO, 2008).

Em geral, os modelos adotados neste sentido, como o VEMOS (*VElocity MOdel for SIRGAS*), consideram somente uma modelagem linear dos deslocamentos horizontais de longo termo ou período (DREWES; HEIDBACH, 2012; DREWES; SANCHEZ, 2020). Entretanto, sabe-se que os modelos lineares não refletem todo o grau de complexidade da série temporal, especialmente em regiões de zonas geodinamicamente ativas com ocorrência de grandes sismos, motivo pelo qual o ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) passou a incorporar modelagens não lineares e pós-sísmicas em suas últimas realizações denominadas ITRF2014 e ITRF2020 (ALTAMIMI *et al.*, 2016, 2023).

Em *softwares* de modelagem de séries temporais como o *Hector*, desenvolvido por Bos (2013), é possível estimar a aceleração horizontal das estações GNSS ativas por meio da modelagem de um polinômio de grau 2 (BOS *et al.*, 2013; BOS, 2022). Desta forma é possível analisar o impacto da inclusão da aceleração no modelo comparando os resultados do polinômio de grau 1 (somente velocidade) com o de grau 2 (velocidade e aceleração). A modelagem dos deslocamentos verticais é mais

complexa e está fora do escopo deste trabalho (ver, por exemplo, BRASSAROTE, 2020).

No contexto da Geodésia nacional, considerando os principais periódicos científicos da área, há poucos estudos tratando da aceleração de estações GNSS ativas ou da modelagem de séries temporais no *software Hector*, sendo esse um dos objetivos deste trabalho, uma vez que o referido *software* é de acesso livre. Nesse sentido, destaca-se o recente estudo de De Freitas; Dal Poz e Nascimento (2022), que propõem o uso de modelos “multivelocidade” para a atualização temporal de coordenadas, considerando a não linearidade da série. Desta forma, embora não tratem diretamente da estimação da aceleração, como aqui proposto, esta referência demonstra a relevância deste tema de pesquisa.

Além disso, embora o *software Hector* realize a modelagem da série temporal, não é capaz de efetuar a regressão ou atualização temporal de uma época para outra através dos coeficientes estimados para um dado ponto de interesse. Desta forma, foram realizados dois testes. O primeiro envolveu o cálculo da velocidade considerando a aceleração nula, e o segundo, o cálculo da velocidade considerando a aceleração não nula. Em seguida, foi analisado o impacto da inclusão da aceleração na estimativa de velocidades por meio de critérios estatísticos de informações e a verificação dos coeficientes do fator de variância a posteriores. Para esses testes foram utilizadas seis estações de monitoramento contínuo, sendo elas: CLL1, QLAP, MIZU, BELE, BRAZ e UFPR).

Como uma segunda contribuição inédita, estimamos valores de velocidade e aceleração para uma amostragem reduzida dos dados das estações GNSS ativas analisadas no *software* gratuito *Scilab*, e posteriormente realizando então a regressão das componentes Este e Norte destas estações para uma época de referência. Estes resultados foram comparados com modelos lineares considerando somente a velocidade das estações, como o VEMOS, MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness*) (BLEWITT *et al.*, 2016) e velocidades disponíveis no site do SIRGAS. Por fim, apresentamos algumas discussões sobre estes experimentos e as respectivas conclusões e recomendações, as mesmas estações utilizadas no *software Hector* também foram usadas no *Software Scilab*.

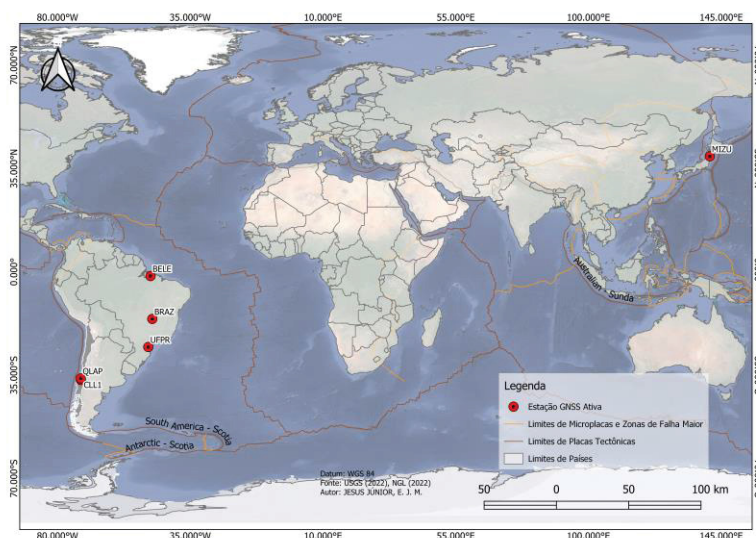
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando analisar o efeito da inclusão da aceleração na modelagem de séries temporais de estações GNSS, dois experimentos foram realizados. O primeiro consistiu na modelagem destas por meio do *software* gratuito *Hector* versão 2.1 (BOS *et al.*, 2013); enquanto o segundo consistiu no cálculo de velocidades e aceleração e posterior regressão ou atualização temporal de coordenadas por meio do *software* gratuito *Scilab*.

Para isto, foram utilizados dados obtidos no *site* do NGL (*Nevada Geodetic Laboratory*) da Universidade de Nevada, o qual disponibiliza coordenadas diárias de estações GNSS e suas respectivas precisões em um sistema local topocêntrico no seguinte endereço eletrônico: <http://geodesy.unr.edu/>. O NGL utiliza o *software* *GipsyX* (versão 1.0) do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) com solução via Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) no referencial IGS14 (ITRF2014, época de referência 2013,9713), resultando em soluções diárias denominadas de NGL14 (BLEWITT; HAMMOND; KREEMER, 2018). Detalhes sobre o PPP ou referenciais geodésicos são obtidos, por exemplo, em Mônico (2008).

Foram selecionadas estações GNSS sujeitas a interações e forças geodinâmicas distintas (Figura 6), sendo que os gráficos das séries temporais de cada estação utilizada constam no Anexo I ao Anexo VI.

Figura 6 – Mapa de localização das estações GNSS ativas utilizadas nos experimentos.



Fonte: Os Autores (2023).

No caso, analisando a Figura 6 e as Figuras 14-25 dos Anexos I ao Anexo VI, temos três estações próximas de bordas de placas tectônicas em regiões de maior atividade geodinâmica (CLL1 e QLAP localizadas no Chile e MIZU localizada no Japão) e três estações em regiões centrais da placa tectônica, em regiões de menor atividade geodinâmica (BELE, BRAZ e UFPR localizadas no Brasil). Como o modelo de deformações pós-sísmicas do ITRF2014 implementado no *software Hector* versão 2.1 não contempla a estação MIZU, foram utilizados os dados do ano 2012 em diante.

## 2.1 PROCESSAMENTO NO SOFTWARE HECTOR

O *Hector* é um *software* acadêmico de código aberto utilizado para estimar trajetórias em séries temporais com estimação tanto do modelo funcional quanto do modelo estocástico, disponível gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: <https://teromovigo.com/hector/>. A solução é obtida pelo estimador de máxima verossimilhança, sendo o tipo de ruído dos dados previamente definido ou calculado pelo usuário (BOS, 2022).

Neste trabalho, foi utilizada uma combinação, assumiu-se que as séries temporais de todas as estações GNSS analisadas possuem ruído branco (“*white noise*”) e GGM (*Gauss Markov*). Quanto aos modelos de trajetória considerados foram os polinômios de grau 1 (somente velocidade) ou de grau 2 (velocidade e aceleração), acrescidos das variações cíclicas ou sazonais (anuais e semi-anuais) e dos saltos (*offsets*) por meio da equação 2 (BOS, 2022).

$$\Delta x = v\Delta t + \frac{a}{2}\Delta t^2 + \sum_{i=1}^2 a_i \sin(w_i t) + b_i \cos(w_i t) + \sum_{i=1}^k c_i H(t - t_j) \quad (2)$$

Onde  $\Delta x$  é a diferença da componente horizontal (Este ou Norte) entre uma época considerada  $t$  e a época de referência  $t_0$  (em mm),  $\Delta t = t - t_0$  é a diferença entre a época considerada e a época de referência (em anos),  $v$  é a velocidade (em mm por ano),  $a$  é a aceleração (em mm por ano<sup>2</sup>),  $a_i$  e  $b_i$  são coeficientes relacionados a amplitude (em mm) dos efeitos cíclicos ou sazonais das componentes anual ( $i = 1$ ) e semianual ( $i = 2$ ),  $w_i$  é a frequência associada (em

radianos por ano),  $c_j$  é o valor do  $j$ -ésimo salto (em mm) na época de ocorrência correspondente  $t_j$  e  $H(t - t_j)$  é a chamada “função de Heaviside” ou “função degrau” associada. Detalhes sobre o modelo da Equação (1) são obtidos em Bevis e Brown (2014) ou Montillet e Boss (2020).

No relatório de saída do processamento, são apresentados os valores dos coeficientes estimados no modelo e os respectivos desvios-padrões. É fornecida ainda a raiz quadrada do fator de variância *a posteriori* (ver, por exemplo, MONICO, 2008), termo este denominado de “*standard driving noise*” (SDN). Quanto menor o valor do SDN, melhor a qualidade do ajustamento ou modelagem da série temporal. Além disso, também são apresentados valores para os critérios de informação de Akaike e Bayes (ver, por exemplo, LEHMANN; LÖSLER, 2016). Estes critérios de informação são utilizados para definir qual o modelo de trajetória mais adequado, por exemplo, se somente com velocidade ou se com velocidade e aceleração. Modelos de trajetórias se referem a formulações matemáticas e algoritmos que descrevem o movimento de objetos sobre a superfície terrestre ou em relação a um sistema de referencial geodésico. Esses modelos desempenham um papel fundamental na determinação precisa da posição e trajetória de entidades em movimento, como satélites em órbita ou veículos terrestres, considerando fatores como a influência gravitacional, a rotação da Terra e perturbações atmosféricas. Essas abordagens são cruciais para sistemas de posicionamento global (TORGE; MÜLLER, 2012). Quanto menor o valor obtido em determinado critério de informação, melhor é o ajuste do respectivo modelo. Detalhes sobre o relatório de saída do *software Hector* são obtidos em Bos (2022).

## 2.2 PROCESSAMENTO NO SOFTWARE SCILAB

O *software* utilizado (*Hector*) possui limitações, este não fornece certos tipos de análises, como por exemplo, a regressão ou atualização temporal de uma época considerada para outra época de referência.

Desta forma, visando analisar o efeito que a inclusão da aceleração exerce na atualização temporal de coordenadas, no *software* gratuito Scilab foi estimado pelo método dos mínimos quadrados os modelos somente com velocidade (linear) e com velocidade e aceleração (não linear) para as estações GNSS ativas analisadas. No caso, devido a impossibilidade de implementar no *software* Scilab toda

a complexidade ao longo de anos de desenvolvimento do *software Hector*, somente soluções diárias com latência semestral foram consideradas como dados de entrada e o modelo matemático se restringiu ao polinômio de grau 1 ou 2 sem os demais termos da Equação (1), semelhante aos estudos de Jesus Jr *et al.* (2022). Ressalta-se que neste experimento o objetivo é somente comparar os resultados obtidos por modelos com e sem aceleração, e não uma modelagem rigorosa da série temporal como no experimento anterior.

Desta forma, com os valores de velocidade e aceleração estimados, é possível atualizar a componente Este ou Norte da última época considerada para a época inicial (aqui considerada como época de referência) por meio da seguinte expressão:

$$\hat{x} = x - v\Delta t - \frac{a}{2}\Delta t^2 \quad (3)$$

Onde  $\hat{x}$  é o valor da coordenada regredida ou atualizada para a época de referência  $t_0$  (em mm),  $x$  é o valor da coordenada original na época  $t$  (última época considerada) e os demais termos são análogos a Equação (2). Desta forma, é possível obter o “erro” da regressão do modelo ou atualização temporal da coordenada por meio da seguinte expressão:

$$\Delta = \hat{x} - x_0 \quad (4)$$

Onde  $\Delta$  é o valor do “erro” ou diferença obtida (em mm) e  $x_0$  é o valor conhecido ou de referência da componente analisada (Este ou Norte) em  $t_0$ . Estas discrepâncias obtidas pelo modelo estimado com velocidade e aceleração foram comparadas com as discrepâncias obtidas por modelos que consideram somente a velocidade, como o modelo MIDAS do NGL (BLEWITT *et al.*, 2016), modelo VEMOS2017 (DREWES; SANCHEZ, 2020) e as velocidades disponíveis no site do SIRGAS.

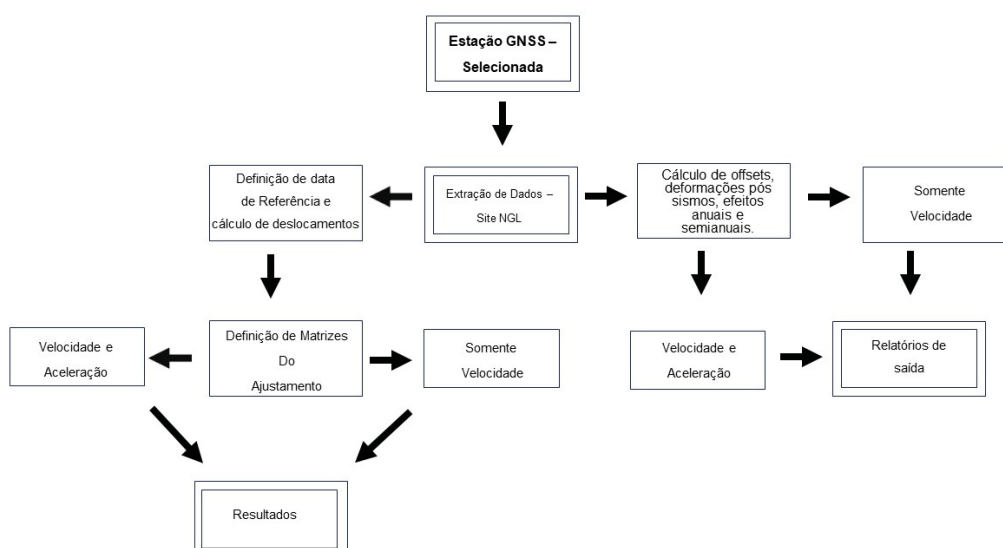
Por fim, em um último experimento, as estações localizadas no Brasil (BELE, BRAZ e UFPR) tiveram seus arquivos diários com 24h de observação referentes ao dia 15/05/2023 obtidos na página da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e processados no serviço IBGE-PPP. As soluções obtidas no relatório de

processamento para as componentes Este e Norte no sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) foram então convertidas para a época de referência do SIRGAS2000 (Maio de 2000 ou 2000,4) por meio do modelo com velocidade e aceleração e comparadas com as coordenadas oficiais em SIRGAS2000 destas estações. Além disso, no próprio relatório de processamento do IBGE-PPP, são fornecidas as coordenadas UTM Este e Norte regredidas para Maio de 2000 ou 2000,4 por meio do modelo linear VEMOS2009. Desta forma, foi possível comparar as discrepâncias obtidas pelo modelo com velocidade e aceleração estimado no *software Scilab* com as discrepâncias obtidas por meio da atualização temporal do próprio serviço do IBGE-PPP em relação as coordenadas oficiais das estações em SIRGAS2000.

Ressalta-se que neste tipo de análise, com discrepâncias sub-métricas em relação a uma posição de referência, a adoção de uma projeção cartográfica ao invés do SGL não afeta as conclusões obtidas. Por exemplo, no meridiano central do fuso, cuja deformação linear do sistema UTM é da ordem de 400 mm por km, uma discrepância de 0,1 m (10 cm) está sujeita a efeitos de apenas 0,04 mm decorrentes da distorção da projeção, sendo perfeitamente negligenciável neste tipo de análise. Detalhes sobre o serviço IBGE-PPP são obtidos em IBGE (2020).

Posto isso, as etapas realizadas no *software Hector* e no *software Scilab* foram ordenadas segundo o seguinte Fluxograma (figura 7):

Figura 7 – Fluxograma de Trabalho no Software Scilab e no Software Hector



Fonte: Os Autores (2023)

### 3 RESULTADOS OBTIDOS

As Tabelas 5 e 6 apresentam um resumo dos resultados obtidos no *software Hector* para as componentes Este e Norte, respectivamente.

Tabela 5 – Valores de velocidade e aceleração estimados no *software Hector* (componente Este)

Estação GNSS	Velocidade sem aceleração (mm/ano)	SDN (sem aceleração)	Velocidade com aceleração (mm/ano)	Aceleração (mm/ano <sup>2</sup> )	SDN (com aceleração)	Modelo Selecionado pelo critério Akaike e Bayes
CLL1	-76,9 ± 55,97	1,08096	-71,3 ± 44,44	20,68 ± 2,64	1,07976	Com Aceleração
QLAP	-3,5 ± 0,53	12,94756	-7,9 ± 0,20	4,07 ± 0,05	3,32251	Com Aceleração
MIZU	105,8 ± 11,41	2,08223	101,3 ± 3,78	-13,54 ± 0,57	2,06886	Com Aceleração
BELE	-4,5 ± 0,10	1,64507	-4,5 ± 0,09	0,07 ± 0,01	1,64901	Sem Aceleração
BRAZ	-3,5 ± 0,31	2,29453	-3,4 ± 0,30	0,08 ± 0,02	2,29526	Sem Aceleração
UFPR	-3,3 ± 0,21	1,53773	-3,3 ± 0,21	-0,02 ± 0,02	1,53793	Sem Aceleração

Fonte: Os Autores (2023)

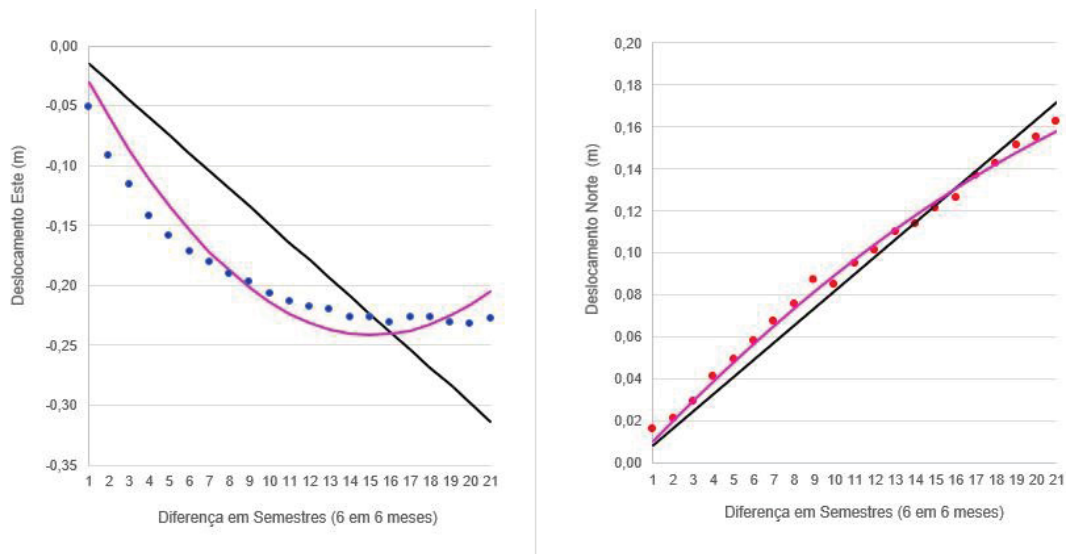
Tabela 6 – Valores de velocidade e aceleração estimados no *software Hector* (componente Norte)

Estação GNSS	Velocidade sem aceleração (mm/ano)	SDN (sem aceleração)	Velocidade com aceleração (mm/ano)	Aceleração (mm/ano <sup>2</sup> )	SDN (com aceleração)	Modelo Selecionado pelo critério Akaike e Bayes
CLL1	14,9 ± 0,33	1,34626	15,5 ± 0,37	-0,33 ± 0,05	1,35316	Sem Aceleração
QLAP	16,4 ± 0,22	3,71633	16,4 ± 0,10	-0,05 ± 0,02	2,01230	Com Aceleração
MIZU	-52,9 ± 3,02	2,22884	-51,8 ± 1,26	4,94 ± 0,24	2,22564	Com Aceleração
BELE	12,9 ± 0,08	1,60662	12,9 ± 0,08	0,02 ± 0,01	1,60751	Sem Aceleração
BRAZ	12,6 ± 0,09	1,68952	12,6 ± 0,09	0,01 ± 0,01	1,68964	Sem Aceleração
UFPR	56,7 ± 43,05	13,26883	56,4 ± 42,35	10,19 ± 2,88	13,27860	Sem Aceleração

Fonte: Os Autores (2023)

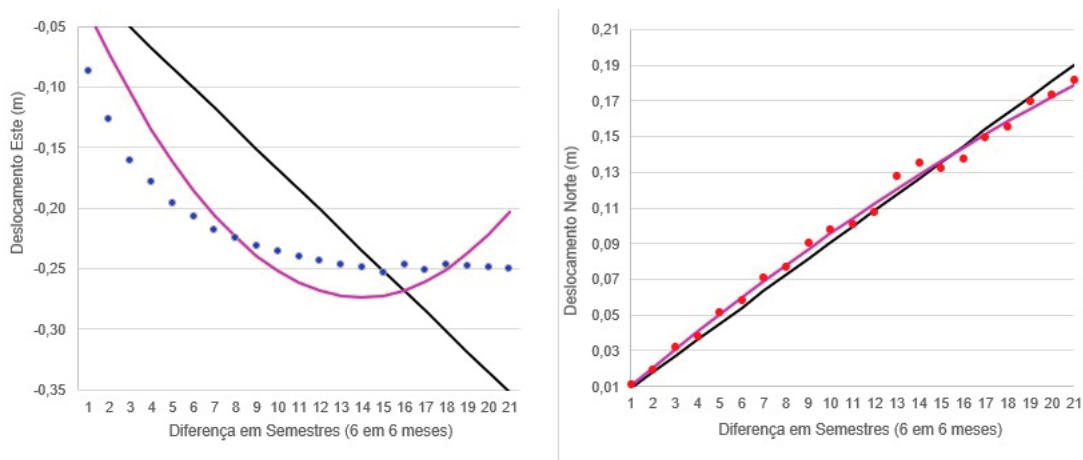
As Figuras 8-13 apresentam os dados originais (pontos em azul na componente Este ou em vermelho na componente Norte) e os modelos obtidos considerando somente velocidade (linha preta) ou velocidade e aceleração (curva magenta) no *software Scilab* para cada estação GNSS ativa considerada.

Figura 8 – Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – CLL1



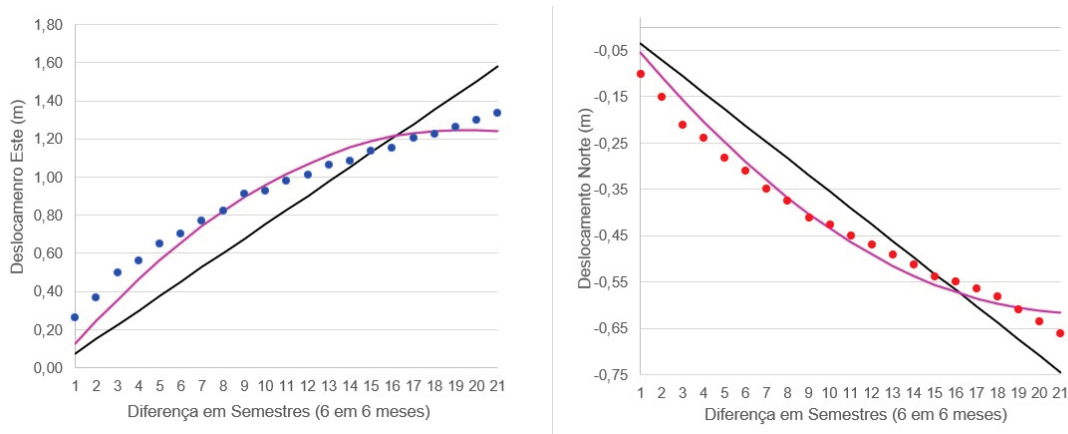
Fonte: Os Autores (2023)

Figura 9 – Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – QLAP



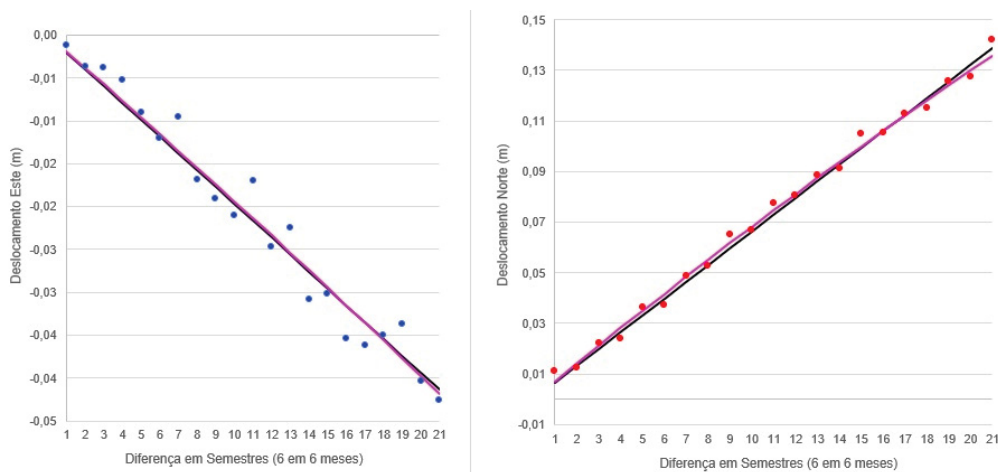
Fonte: Os Autores (2023)

Figura 10 –Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – MIZU



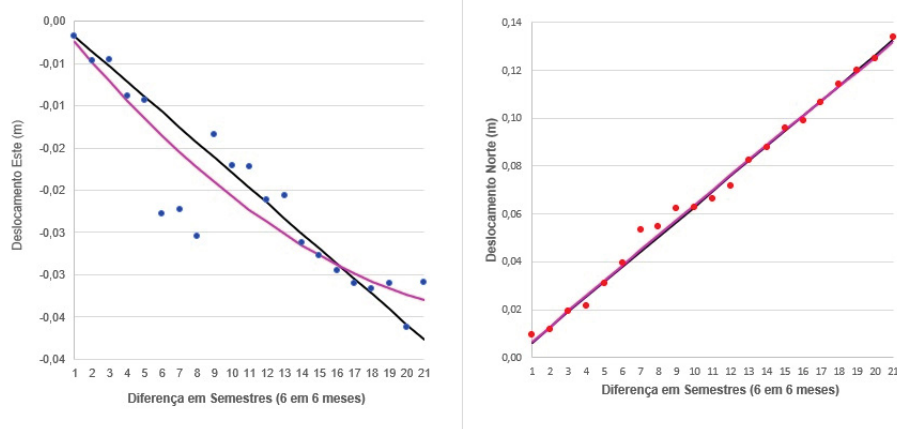
Fonte: Os Autores (2023)

Figura 11 –Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – BELE



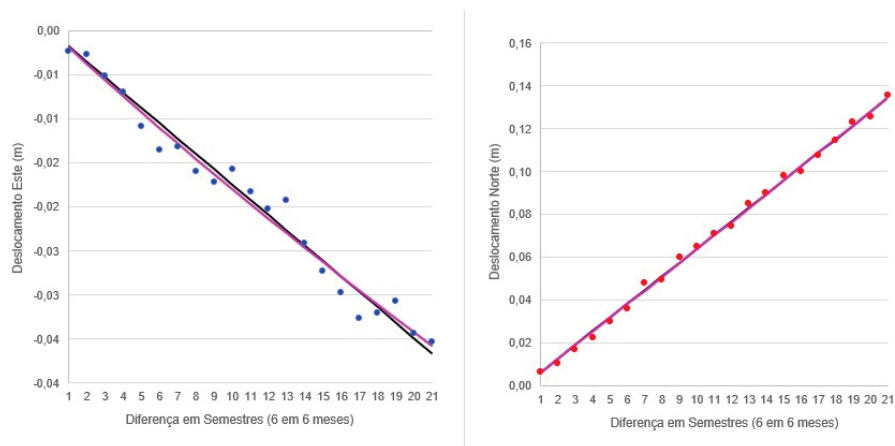
Os Autores (2023)

Figura 12 –Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – BRAZ



Os Autores (2023)

Figura 13 – Ajuste dos Modelos Sem Aceleração e com Aceleração, nas Direções Este e Norte – UFPR



Os Autores (2023)

A Tabela 7 apresenta a época considerada e a época de referência nas regressões ou atualizações temporais de coordenadas realizadas com os modelos estimados no software Scilab.

Tabela 7 – Época inicial e época final das estações GNSS analisadas

<b>Estação GNSS</b>	<b>Época de Referência</b>	<b>Época a Regredir/ Época da Observação</b>
CLL1	2011,0	2021,5
QLAP	2010,5	2021,0
MIZU	2011,5	2022,0
BELE	2010,5	2021,5
BRAZ	2010,5	2021,0
UFPR	2010,5	2021,0

Fonte: Os Autores (2023)

A Tabela 8 apresenta as velocidades obtidas e o respectivo modelo externo de referência nestes experimentos.

Tabela 8 – Valores de velocidade obtidos nos modelos de referência externos (VEMOS2017/SIRGAS/NGL)

<b>Estação GNSS</b>	<b>Este (mm/ano)</b>	<b>Norte (mm/ano)</b>	<b>Modelo utilizado</b>
CLL1	-9,0	18,0	VEMOS2017
QLAP	2,3	16,9	MIDAS
MIZU	74,2	-41,7	MIDAS
BELE	-2,9	12,4	VEMOS2017
BRAZ	-3,7	12,5	SIRGAS
UFPR	-3,2	13,1	SIRGAS

Fonte: Os Autores (2023)

As Tabelas 9 e 10 apresentam as discrepâncias obtidas com o modelo não linear estimado (velocidade e aceleração) e o respectivo modelo linear externo (somente velocidade) para as componentes Este e Norte, respectivamente.

Tabela 9 – Erros obtidos nas regressões temporais para componente Este (em mm)

<b>Estação GNSS</b>	<b>Modelo não linear estimado</b>	<b>Modelo linear de referência externo</b>	<b>Melhora usando o modelo não linear</b>
CLL1	-22,5	-132,7	83%
QLAP	-46,1	-273,3	83%
MIZU	96,3	556,1	82%
BELE	1,3	-10,7	88%
BRAZ	2,2	8,0	72%
UFPR	0,4	-1,7	76%

Fonte: Os Autores (2023)

Tabela 10 – Erros obtidos nas regressões temporais para componente Norte (em mm)

<b>Estação GNSS</b>	<b>Modelo não linear estimado</b>	<b>Modelo linear de referência externo</b>	<b>Melhora usando o modelo não linear</b>
CLL1	5,0	-26,3	81%
QLAP	2,8	4,4	36%
MIZU	-45,7	-223,2	79%
BELE	0,4	5,7	92%
BRAZ	2,4	2,9	17%
UFPR	0,9	-2,2	59%

Fonte: Os Autores (2023)

As Tabelas 11 e 12 apresentam as discrepâncias obtidas em relação as coordenadas oficiais das estações em SIRGAS2000 pelo modelo estimado com velocidade e aceleração e pela média da atualização temporal do próprio IBGE-PPP para as componentes Este e Norte, respectivamente.

Tabela 11 – Média dos erros obtidos nas regressões temporais para componente Este via PPP (em mm)

<b>Estação GNSS</b>	<b>Modelo não linear estimado</b>	<b>Resultado fornecido pelo IBGE-PPP</b>
BELE	-3,7	0,8
BRAZ	-75,0	-10,8
UFPR	-13,6	-31,7

Fonte: Os Autores (2023)

Tabela 12 – Erros obtidos nas regressões temporais para componente Norte via PPP (em mm)

<b>Estação GNSS</b>	<b>Modelo não linear estimado</b>	<b>Resultado fornecido pelo IBGE-PPP</b>
BELE	36,7	23,2
BRAZ	8,7	3,9
UFPR	-14,1	8,0

Fonte: Os Autores (2023)

## 4 DISCUSSÕES

Analisando os resultados das Tabelas 5 e 6, nota-se que para as estações em zonas de maior atividade geodinâmica (CLL1, QLAP e MIZU), em geral, o desvio-padrão da velocidade e o SDN reduzem no modelo com inclusão da aceleração, sendo indicativos da melhor modelagem deste, o que também é corroborado pelo fato deste

ser o modelo selecionado pelos critérios de informação em todos os casos. Nota-se ainda diferenças significativas nos valores de velocidade com e sem aceleração, como no caso da componente “Este” da estação CLL1, onde a velocidade se alterou de –76,9 mm por ano para –71,3 mm por ano.

Nas estações localizadas em zonas de menor atividade geodinâmica (BELE, BRAZ e UFPR), a inclusão da aceleração no modelo praticamente não altera os resultados em termos de desvio-padrão da velocidade ou qualidade de ajuste do modelo (valor do SDN). Isso é corroborado pelo fato do modelo somente com velocidade ser selecionado pelos critérios de informação em todos os casos. Além disso, a maior diferença no valor da velocidade nos modelos com e sem aceleração foi para a componente Norte da estação UFPR, sendo essa diferença de apenas 0,3 mm por ano.

Portanto, analisando os resultados do *software Hector*, pode-se dizer que a inclusão da aceleração não apresentou resultados significativos na modelagem das séries temporais para as estações localizadas no Brasil (BELE, BRAZ e UFPR), ao contrário das estações localizadas no Chile (CLL1 e QLAP) e Japão (MIZU).

Analisando as Figuras 8-13, as conclusões gerais das Tabelas 5 e 6 são reforçadas: para as estações CLL1, QLAP e MIZU, nota-se uma clara diferença entre o modelo não linear (curva magenta com aceleração) e o modelo linear (linha preta com somente velocidade). Quanto mais próximo o modelo se situar dos dados originais (pontos), menores são os resíduos, ou seja, melhor é o ajuste do modelo. Para as estações situadas no Brasil, a diferença entre os modelos é claramente perceptível somente para a componente Este da estação BRAZ (Figura 12).

Entretanto, ao considerar as discrepâncias em relação as coordenadas de referência apresentadas nas Tabelas 9 e 10, mesmo para as estações localizadas no Brasil (BELE, BRAZ e UFPR), em geral o modelo estimado com velocidade e aceleração fornece melhores resultados do que o modelo linear externo de referência. Por exemplo, para a componente “Este” da estação BRAZ, a discrepância em módulo ao valor de referência reduz de 10,7 mm no modelo linear externo (VEMOS2017) para apenas 1,3 mm no modelo não linear estimado. Para a componente “Norte” da estação BELE, a redução do erro no modelo foi de 92% com a inclusão da aceleração. Destaca-se que para aplicações que exigem acurácia milimétrica, uma redução da margem de erro da ordem de 10 mm para apenas 1 mm devido somente a atualização temporal das coordenadas para a época de referência deve ser significativa. Destaca-

se que nestes experimentos a janela temporal considerada é cerca de uma década para todas as estações, mas no caso do SGB, essa janela temporal da data do levantamento para a época de referência (Maio de 2000) já excede duas décadas.

Além disso, para as estações situadas em regiões de maior atividade geodinâmica, em geral as discrepâncias obtidas são decimétricas para os modelos lineares externos e centimétricas para o modelo não linear estimado. Portanto, nestes casos a inclusão da aceleração se mostrou realmente significativa nos resultados.

Por fim, analisando as discrepâncias apresentadas nas Tabelas 11 e 12, em alguns casos o modelo não linear estimado apresentou melhores resultados que a regressão linear realizada pelo próprio IBGE-PPP, como para a componente “Este” da estação UFPR, mas esse padrão não se verificou para todos os casos. Contudo os valores apresentados são a média do processamento calculado para a época 2023,4, todavia quando se consulta os resultados diários (Apêndice 2-4), os valores demonstram que há dias em que haveria impacto o uso da aceleração na regressão, Para uma análise mais robusta, um conjunto maior de dados deve ser considerado. Desta forma, verifica-se que a atualização temporal de coordenadas é um tema complexo e cuja modelagem adequada depende das características de cada região, mesmo para o caso do Brasil.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, investigamos de forma inédita no cenário nacional a influência da aceleração horizontal na modelagem de séries temporais de estações GNSS ativas, comparando os resultados obtidos pelo polinômio não linear de grau 2 (com aceleração inclusa) e pelo polinômio linear de grau 1 (somente com velocidade). A principal vantagem dessa abordagem em relação a soluções recentes encontradas na literatura, como o modelo “multivelocidades” de De Freitas; Dal Poz e Nascimento (2022), é que menos parâmetros adicionais são necessários: somente uma aceleração ao invés de múltiplas velocidades. Além disso, não é necessário definir critérios para a divisão da série temporal em diferentes janelas para cada velocidade a ser estimada, sendo está uma tarefa relativamente complexa e que impacta diretamente nos resultados obtidos.

Neste sentido, destacamos a importância de *softwares* gratuitos para esta finalidade, como o *software Hector*, uma vez que embora séries temporais de

estações GNSS ativas seja um tema de pesquisa recorrente nos principais periódicos da Geodésia a nível nacional, ainda há poucas publicações trazendo resultados obtidos no referido *software*. Conforme esperado, a inclusão da aceleração forneceu melhoras significativas na modelagem de séries temporais de estações GNSS ativas localizadas em regiões próximas a bordas de placas tectônicas, como para as estações GNSS ativas analisadas nos territórios do Chile e do Japão.

Entretanto, mesmo para as estações analisadas no território do Brasil, houve casos em que a atualização temporal de coordenadas considerando o modelo não linear (com velocidade e aceleração) apresentou melhoras significativas (de até  $\approx 10$  mm em termos absolutos e de até  $\approx 92\%$  em termos relativos) em relação ao modelo linear convencional desprezando a aceleração. Desta forma, considerando a janela temporal atual de mais de duas décadas em relação a época de referência do SIRGAS2000 (Maio de 2000), bem como aplicações que exigem acurácia milimétrica, a principal conclusão deste trabalho é que seja incluída a modelagem não linear das estações na próxima realização do SGB, assim como foi realizado nas últimas realizações do ITRF (ITRF2014 e ITRF2020).

Neste sentido, essa modelagem não linear para a atualização temporal de coordenadas deve se estender para diversos produtos e serviços derivados do SGB, como por exemplo o IBGE-PPP. Entretanto, ressalta-se que o padrão de deformação não linear é complexo e depende do local de cada estação. Desta forma, recomenda-se ainda a proposição de novas ferramentas para esse tipo de análise, como por exemplo, por meio de testes estatísticos para verificar a significância da aceleração ao invés dos critérios de informação de Akaike e Bayes como utilizados no *software Hector*. A vantagem de testes estatísticos sobre critérios de informação é a possibilidade de derivar medidas de confiabilidade adequadas para este caso fazendo uso da teoria de Baarda (1968), como por exemplo, para estimar a “menor aceleração detectável” do modelo. Este é um tema de pesquisa promissor considerando o atual estado da arte da Geodésia e recomenda-se investigações neste sentido.

Por fim, recomenda-se estudos considerando o padrão de deformação 3D de estações GNSS ativas de forma “conjunta” ou de “bloco” e incluindo a componente vertical, ao invés de análises individuais e desconsiderando a componente vertical como as realizadas nesta pesquisa. Recomenda-se ainda a comparação entre as diversas estratégias possíveis de modelagem não linear: com inclusão da aceleração por meio de um polinômio de grau 2 como nesta pesquisa, por modelos

multivelocidades como em De Freitas; Dal Poz e Nascimento (2022) ou ainda por modelos de deformação pós-sísmica como em Altamimi *et al.* (2016, 2023) para as realizações recentes do ITRF.

## REFERÊNCIAS

ALTAMIMI, Z. *et al.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n. 8, p. 6109–6131, 2016.

ALTAMIMI, Z. *et al.* ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. **Journal of Geodesy**, v. 97, n. 5, p. 47, 2023.

ALVES, S. M. C.; SANTOS, M. C.; GEMAEL, C. A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate. **GPS solutions**, v. 7, p. 186-193, 2003.

BAARDA, W. A testing procedure for use in geodetic networks. **Pub. on Geod., New Series**, v. 2, n. 5, 1968.

BEVIS, M.; BROWN, A. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. **Journal of Geodesy**, v. 88, n. 3, p. 283–311, 2014.

BLEWITT, G.; HAMMOND, W.; KREEMER, C. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. **Eos**, v. 99, 2018.

BLEWITT, G.; KREEMER, C.; HAMMOND, W. C.; GAZEAX, J. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n. 3, p. 2054-2068, 2016.

BOGUSZ, J.; KLOS, A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. **GPS solutions**, v. 20, p. 655-664, 2016.

BOS, M. S. **Hector user manual version 2.1**. Disponível em <<https://teromovigo.com/hector/>>. Acesso em: jun. 2023.

BOS, M. S. *et al.* Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. **Journal of Geodesy**, v. 87, n. 4, p. 351–360, 2013.

BRASSAROTE, G. DE O. N. **Modelagem funcional e estocástica de séries temporais para a atualização e estimativa da componente altimétrica: aplicação no Sistema Geodésico Brasileiro**. Tese—Presidente Prudente: UNESP, 2020.

DE FREITAS, K. X. S.; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. Al. Potencial da Utilização de Multivelocidade no Processo de Atualização Temporal de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 3, 2022.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. **Geodesy for Planet Earth**, Heidelberg, BL, v. 136, p. 657-664, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1\_81.

DREWES, H; SÁNCHEZ, L. **Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017**, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário**. Versão Maio de 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Resolução R.PR 1/2005: Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. 2005.

JESUS JUNIOR, E. J. M. *et al.* Estimacão da Aceleracão de Estacões GNSS Ativas. In: **Anais XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas / V Simpósio Brasileiro de Geomática**, Curitiba, 2022.

LEHMANN, R.; LÖSLER, M. Multiple outlier detection: hypothesis tests versus model selection by information criteria. **Journal of surveying engineering**, v. 142, n. 4, p. 04016017, 2016.

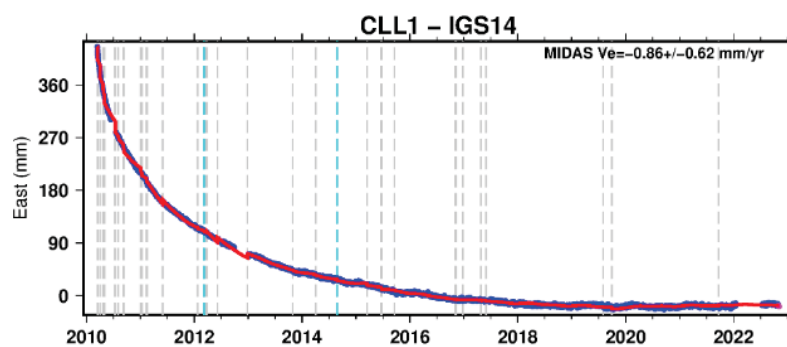
MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS, descrição, fundamentos e aplicacões**. 2º ed. São Paulo, SP: Editora UNESP, 2008.

MONTILLET, J. P.; BOS, M. S. (Eds.). **Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences**. Cham: Springer International Publishing, 2020.

SELLA, G. F.; DIXON, T. H.; MAO, A. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 107, n. B4, p. ETG 11-1-ETG 11-30, 2002

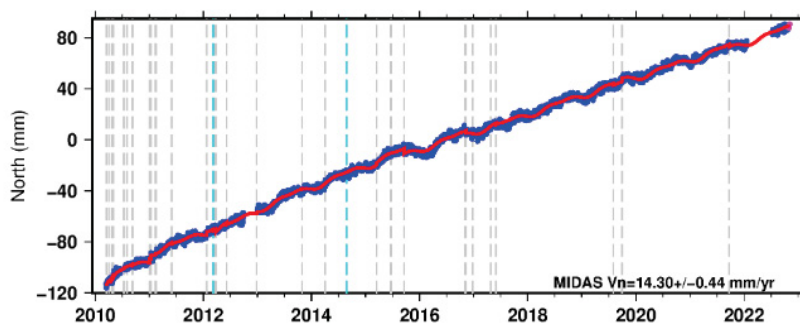
**ANEXO 1 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO CLL1**

FIGURA 14 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO CLL1



Fonte: NGL

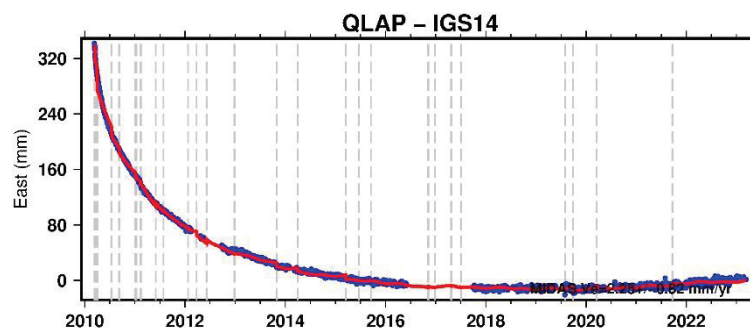
FIGURA 15 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO CLL1



Fonte: NGL

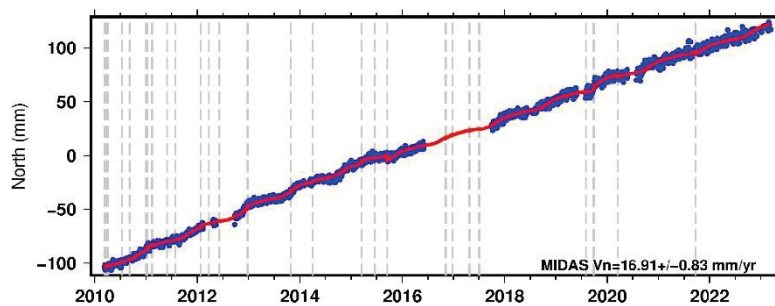
**ANEXO 2 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO QLAP**

FIGURA 16 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO QLAP



Fonte: NGL

FIGURA 17 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO QLAP



Fonte: NGL

**ANEXO 3 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO MIZU**

FIGURA 18 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO MIZU

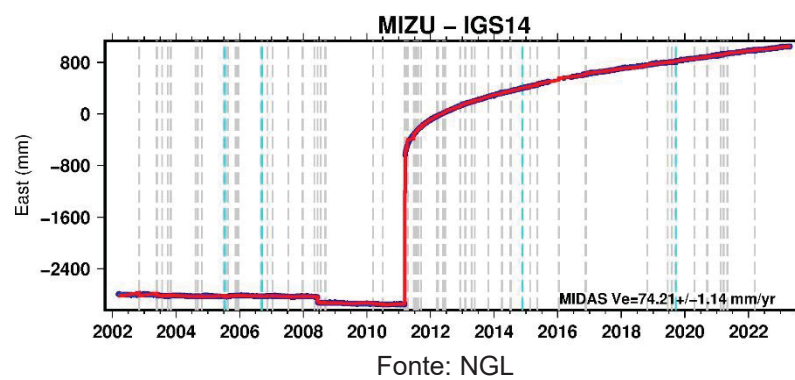
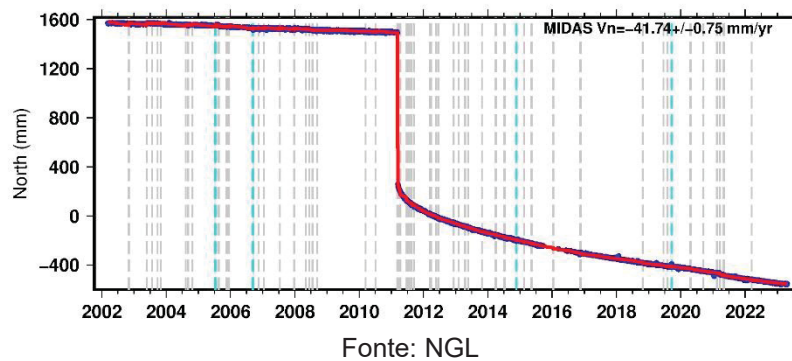


FIGURA 19 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO MIZU



**ANEXO 4 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO BELE**

FIGURA 20 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO BELE.

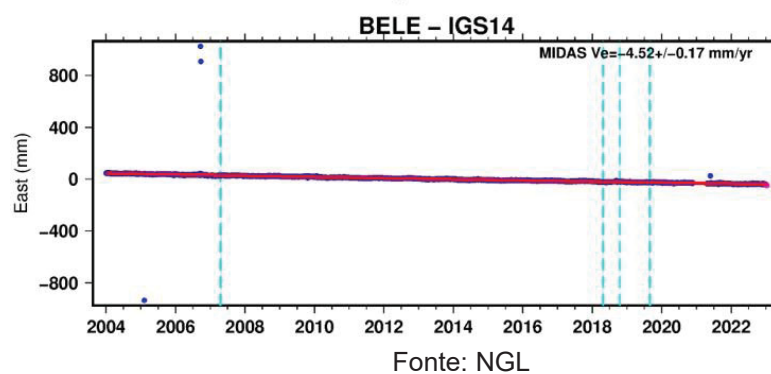
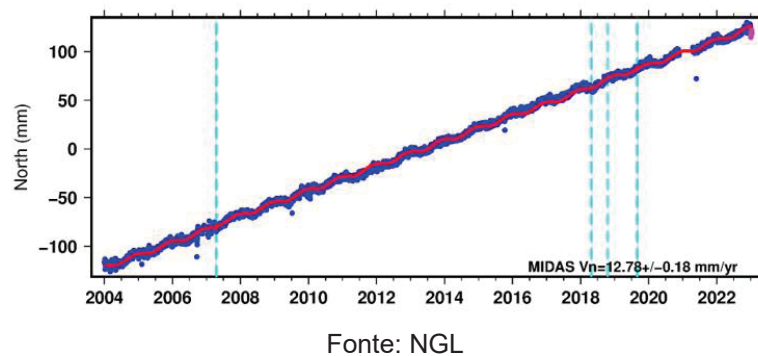


FIGURA 21 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO BELE



**ANEXO 5 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO BRAZ**

FIGURA 22 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO BRAZ

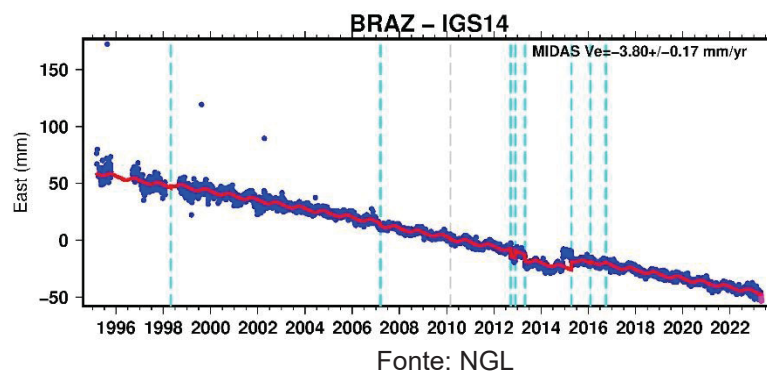
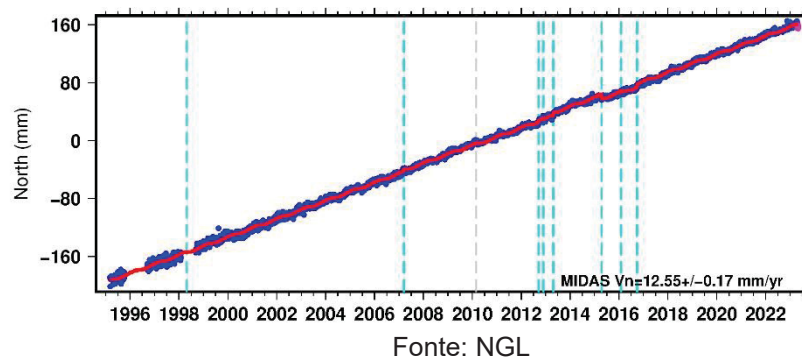
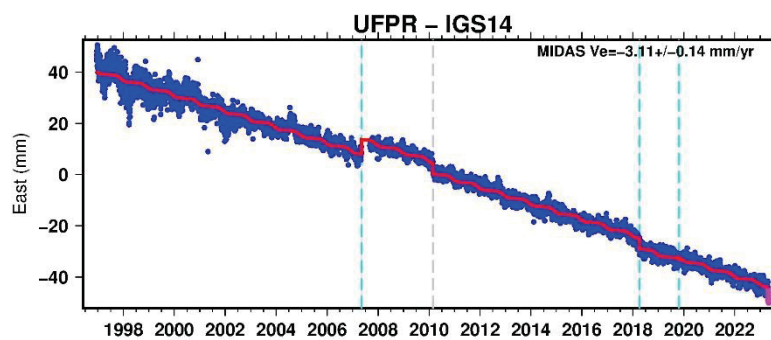


FIGURA 23 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO BRAZ



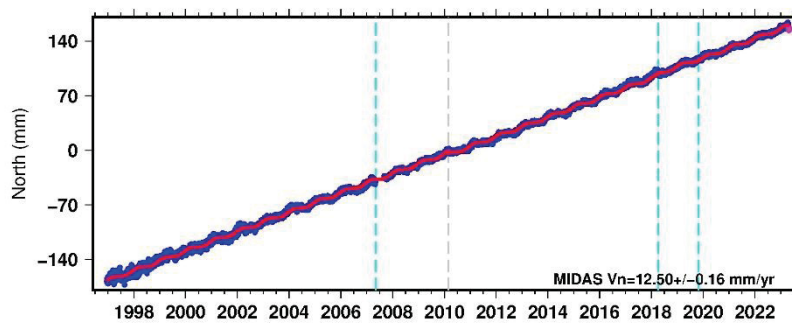
**ANEXO 6 – GRÁFICOS DE COORDENADAS DA ESTAÇÃO UFPR**

FIGURA 24 – COORDENADAS ESTE DA ESTAÇÃO UFPR



Fonte: NGL

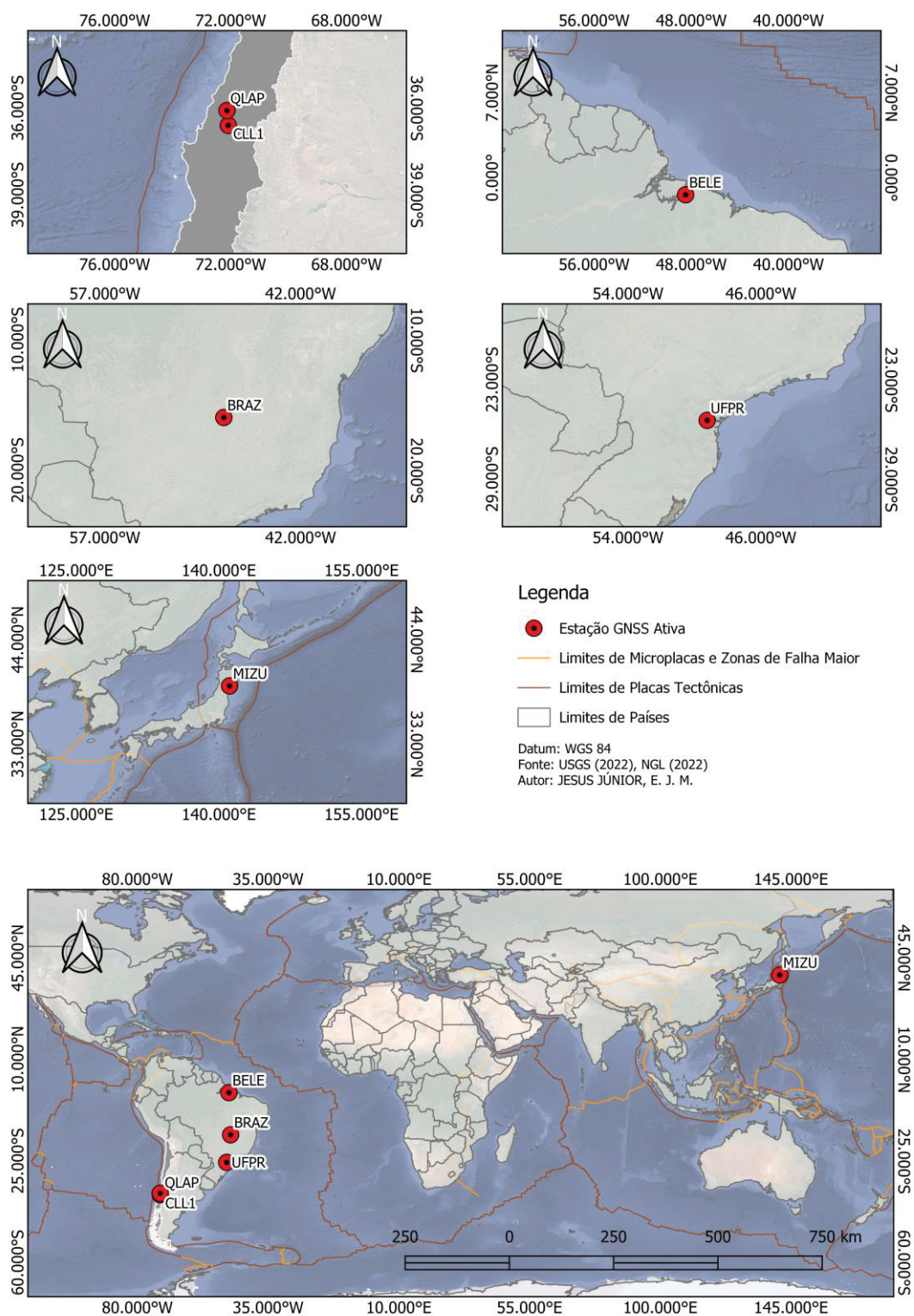
FIGURA 25 – COORDENADAS NORTE DA ESTAÇÃO UFPR



Fonte: NGL

## APÊNDICE 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO GERAL

FIGURA 26 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES GNSS SELECIONADAS



Fonte: Os Autores (2023)

## APÊNDICE 2 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BELE

REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BELE (época 2023,4 pra época 2000,4) via IBGE-  
PPP E MODELO NÃO LINEAR ESTIMADO

<b>Erros Obtidos nas Regressões Temporais - Estação BELE</b>				
DATA	IBGE		MODEL VEL E ACEL	
	Este (mm)	Norte (mm)	Este (mm)	Norte (mm)
01/05/2023	0,0	15,0	-4,9	39,3
02/05/2023*	9,0	15,0	5,1	36,3
03/05/2023	0,0	12,0	-4,9	33,3
04/05/2023*	3,0	12,0	-0,9	33,3
05/05/2023	-6,0	18,0	-10,9	39,3
06/05/2023	-3,0	12,0	-7,9	33,3
07/05/2023	-6,0	15,0	-10,9	36,3
08/05/2023	-3,0	15,0	-7,9	36,3
09/05/2023*	6,0	18,0	2,1	39,3
10/05/2023*	3,0	18,0	-0,9	39,3
11/05/2023	-3,0	15,0	-7,9	36,3
12/05/2023*	3,0	12,0	-0,9	33,3
13/05/2023	0,0	15,0	-4,9	36,3
14/05/2023*	6,0	9,0	2,1	33,3
15/05/2023*	3,0	312,0	-0,9	36,3
16/05/2023*	3,0	9,0	-0,9	33,3
17/05/2023	0,0	12,0	-4,9	36,3
18/05/2023*	3,0	12,0	-0,9	36,3
19/05/2023*	6,0	9,0	2,1	33,3
20/05/2023	0,0	12,0	-4,9	36,3
21/05/2023*	9,0	12,0	5,1	36,3
22/05/2023	0,0	12,0	-4,9	36,3
23/05/2023	-3,0	12,0	-7,9	36,3
24/05/2023	-3,0	15,0	-7,9	39,3
25/05/2023*	3,0	12,0	-0,9	36,3
26/05/2023*	9,0	15,0	5,1	39,3
27/05/2023	-6,0	12,0	-10,9	36,3
28/05/2023*	3,0	15,0	-0,9	39,3
29/05/2023	-3,0	15,0	-7,9	39,3
30/05/2023	-3,0	15,0	-7,9	39,3
31/05/2023	-6,0	18,0	-10,9	42,3
<b>MÉDIA - Erros (mm)</b>	<b>0,8</b>	<b>23,2</b>	<b>-3,7</b>	<b>36,7</b>
<b>RESULTANTE 2D</b>	23,2		36,9	

Fonte: Os Autores (2023)

### APÊNDICE 3 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BRAZ

REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO BRAZ (época 2023,4 pra época 2000,4) via IBGE-  
PPP E MODELO NÃO LINEAR ESTIMADO

<b>Erros Obtidos nas Regressões Temporais - Estação BRAZ</b>				
	<b>IBGE</b>		<b>MODEL VEL E ACEL</b>	
<b>DATA</b>	<b>Este (mm)</b>	<b>Norte (mm)</b>	<b>Este (mm)</b>	<b>Norte (mm)</b>
01/05/2023	-17,0	4,0	-81,2	8,3
02/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
03/05/2023	-5,0	1,0	-69,2	6,3
04/05/2023	-8,0	1,0	-72,2	5,3
05/05/2023	-8,0	4,0	-72,2	9,3
06/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
07/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
08/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
09/05/2023	-14,0	4,0	-78,2	8,3
10/05/2023	-14,0	4,0	-78,2	8,3
11/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
12/05/2023	-11,0	7,0	-75,2	12,3
13/05/2023	-8,0	4,0	-72,2	9,3
14/05/2023	-8,0	4,0	-72,2	9,3
15/05/2023	-14,0	4,0	-78,2	8,3
16/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
17/05/2023	-11,0	1,0	-75,2	5,3
18/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
19/05/2023	-11,0	1,0	-75,2	5,3
20/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
21/05/2023	-8,0	4,0	-72,2	9,3
22/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
23/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
24/05/2023	-8,0	4,0	-72,2	9,3
25/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
26/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
27/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
28/05/2023	-11,0	1,0	-75,2	5,3
29/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
30/05/2023	-11,0	4,0	-75,2	9,3
31/05/2023	-14,0	13,0	-79,2	13,0
<b>MÉDIA - Erros (mm)</b>	<b>-10,8</b>	<b>3,9</b>	<b>-75,0</b>	<b>8,7</b>
<b>RESULTANTE 2D</b>	11,5		75,5	

Fonte: Os Autores (2023)

## APÊNDICE 4 – REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO UFPR

REGRESSÃO TEMPORAL ESTAÇÃO UFPR (época 2023,4 pra época 2000,4) via IBGE-  
PPP E MODELO NÃO LINEAR ESTIMADO

Erros Obtidos nas Regressões Temporais - Estação UFPR				
DATA	IBGE		MODEL VEL E ACEL	
	Este (mm)	Norte (mm)	Este (mm)	Norte (mm)
01/05/2023*	-34,0	8,0	-15,6	-15,0
02/05/2023*	-31,0	8,0	-12,6	-15,0
03/05/2023*	-29,0	5,0	-9,6	-19,0
04/05/2023*	-31,0	8,0	-12,6	-15,0
05/05/2023*	-31,0	8,0	-15,6	-15,0
06/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
07/05/2023*	-29,0	11,0	-17,6	-12,0
08/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
09/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
10/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	15,0
11/05/2023*	-78,0	8,0	-9,6	-15,0
12/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
13/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
14/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
15/05/2023*	-29,0	5,0	-12,6	-19,0
16/05/2023*	-31,0	8,0	-15,6	-15,0
17/05/2023*	-31,0	8,0	-15,6	-15,0
18/05/2023*	-31,0	8,0	-15,6	-15,0
19/05/2023*	-31,0	8,0	-15,6	-15,0
20/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
21/05/2023*	-26,0	8,0	-9,6	-15,0
22/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
23/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
26/05/2023*	-40,0	8,0	-23,6	-15,0
27/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
28/05/2023*	-29,0	5,0	-12,6	-19,0
29/05/2023*	-26,0	8,0	-9,6	-15,0
30/05/2023*	-29,0	8,0	-12,6	-15,0
31/05/2023*	-34,0	14,0	-17,6	-9,0
<b>MÉDIA - Erros (mm)</b>	<b>-31,7</b>	<b>8,0</b>	<b>-13,6</b>	<b>-14,1</b>
<b>RESULTANTE 2D</b>	32,7		19,6	

Fonte: Os Autores (2023)

## REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. **Posicionamento GPS utilizando o conceito de Estação Virtual**. Tese-Presidente Prudente: UNESP, 2008.

CALADO, L. G. L. P.; DOS ANJOS G., SILVIO J.; J., KAROLINE P. Estimativas do Nível do Mar na América do Sul a partir de Registros Maregráficos e Coordenadas SIRGAS-CON. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 72, n. 1, 2020.

CASTRO, H. M.; FERREIRA, V. G.; FREITAS, S. R. C. de. Análise de deformação por variação do geopotencial: estudo de caso para o terremoto maule (Mw 8, 8) com base em dados mensais da missão Grace. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, p. 86-100, 2012.

CARDOSO, F. H. C.; GIORGINI, M. G.; PAULA, A. DE. **Diretrizes para o monitoramento de deformações e deslocamentos em barragens e estruturas de mineração utilizando GNSS**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...ABMS**, 2020.

COLLISCHONN, C.; MATSUOKA, M. T. Proposta de método de rede GNSS por PPP e análise de confiabilidade. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p. 453–471, set. 2016.

COSTA, S. M. A. **Integração da rede geodésica brasileira aos sistemas de referência terrestres**. Tese—Curitiba: UFPR, 1999.

DA SILVA, Luciana Maria; DE FREITAS, Sílvio Rogério Correia; DALAZOANA, Regiane. Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no datum vertical brasileiro de Imbituba-SC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, p. 73-90, 2016.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Detecção e avaliação de efeitos geodinâmicos em uma porção das estações GNSS brasileiras. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, 2020a.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Detecção e avaliação de efeitos geodinâmicos em uma porção das estações GNSS brasileiras. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, p. 1802, 11 jun. 2020b.

DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R.; FERREIRA, V. G. The spatial age and the new paradigms in geodesy: implications for surveying and mapping in Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 6, p. 845–862, 2012.

DE OLIVEIRA JUNIOR, P. S. **Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia**. Tese—Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, jun. 2015.

DREWES, H. The changing objectives in geodetic research. 2006.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. Deformation of the South American Crust Estimated from Finite Element and Collocation Methods. Em: **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. p. 544–549.

DURDAG, U. M.; HEKIMOGLU, S.; ERDOGAN, B. Reliability of Models in Kinematic Deformation Analysis. **Journal of Surveying Engineering**, v. 144, n. 3, ago. 2018.

EYO, E. et al. Deformation Analysis Based on Designed Experiments01 **Geod. list**, v. 4, p. 253–268, 2014.

HAAKON FOSSEN. **Structural Geology**. Cambridge University Press, 2010.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS - Global Navigation Satellite Systems**. Austria: SpringerWienNewYork, 2008.

HOLDEN, L. et al. Evaluating a campaign GNSS velocity field derived from an online precise point positioning service. **Geophysical Journal International**, v. 208, n. 1, p. 246–256, 1 jan. 2017.

KLEIN, I.; MATSUOKA, M.; SOUZA, S. Análise do serviço on-line de PPP (GDGPS - APPS) para Receptores de Dupla Frequência: um estudo envolvendo dados de estações da RBMC. **Gaea - Journal of Geoscience**, v. 6, n. 2, p. 90–98, 31 dez. 2010.

LAMBECK, K. The fourth dimension in geodesy: Observing the deformation of the earth. Em: **Developments in Four-Dimensional Geodesy**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. p. 1–14.

LIMA, José Nuno. A utilização de filtros digitais em séries temporais GNSS. In: **Comunicação apresentada em VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia: VIII CNCG**. 2015. p. 53

LIZARAZO, S. C.; MORA PÁEZ, H.; SANTA, L. F. Análisis de tendencias de movimiento de estaciones GNSS/GPS mediante series de tiempo geodésicas en Colombia, 2008-2011. **UD y la GEOMÁTICA**, n. 7, p. 41, 8 out. 2014.

MARQUES, H. A. et al. PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análise de resultados no modo estático e cinemático. **2014 (66/6)**, v. 0, p. 1331–1345, 2014.

MARQUES, H. A. S. **Modelo estocástico para dados GNSS e séries temporais de coordenadas GNSS**. Tese—Presidente Prudente : UNESP, 2013.

MATHER, R. S. The role of the geoid in four-dimensional geodesy. **Marine Geodesy**, v. 1, n. 3, p. 217–252, 10 jan. 1978.

MORAIS, R. S. **Monitorização de deslocamentos em grandes barragens utilizando GNSS. Aplicação à barragem do Cabril**. Dissertação—Lisboa: INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, dez. 2017.

NASCIMENTO, Lécio Alves. Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP. 2016.

NASCIMENTO, L. A. et al. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 23, n. 1, p. 150–165, 2017.

OKU TOPAL, G. et al. Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements. **Survey Review**, 2023.

PACHECO, A. DA P. P. et al. Avaliação de índices de vegetação NDVI E EVI na bacia hidrográfica do rio Pajeú/PE/Brasil a partir de séries temporais MODIS MOD13A1. **Caderno de Geografia**, v. 33, n. 74, 2023.

RAMOS, M. DE P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Determinação de Velocidades das Estações da RBMC com Uso do Software SARI. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 453–469, 6 abr. 2021.

RAMOS, M. DE P.; DALPOZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Propagação de Incertezas no Processo de Compatibilização de Referenciais e Época de Coordenadas GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 2, p. 305–321, 30 maio 2022.

REHMAN, Khaista et al. Spatio-temporal variations of b-value in and around north Pakistan. **Journal of Earth System Science**, v. 124, p. 1445-1456, 2015.

SÁNCHEZ, Laura; DREWES, Hermann. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America. In: Beyond 100: The Next Century in Geodesy: Proceedings of the IAG General Assembly, Montreal, Canada, July 8-18, 2019. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 197-208.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações.

**Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 2, ago. 2000.

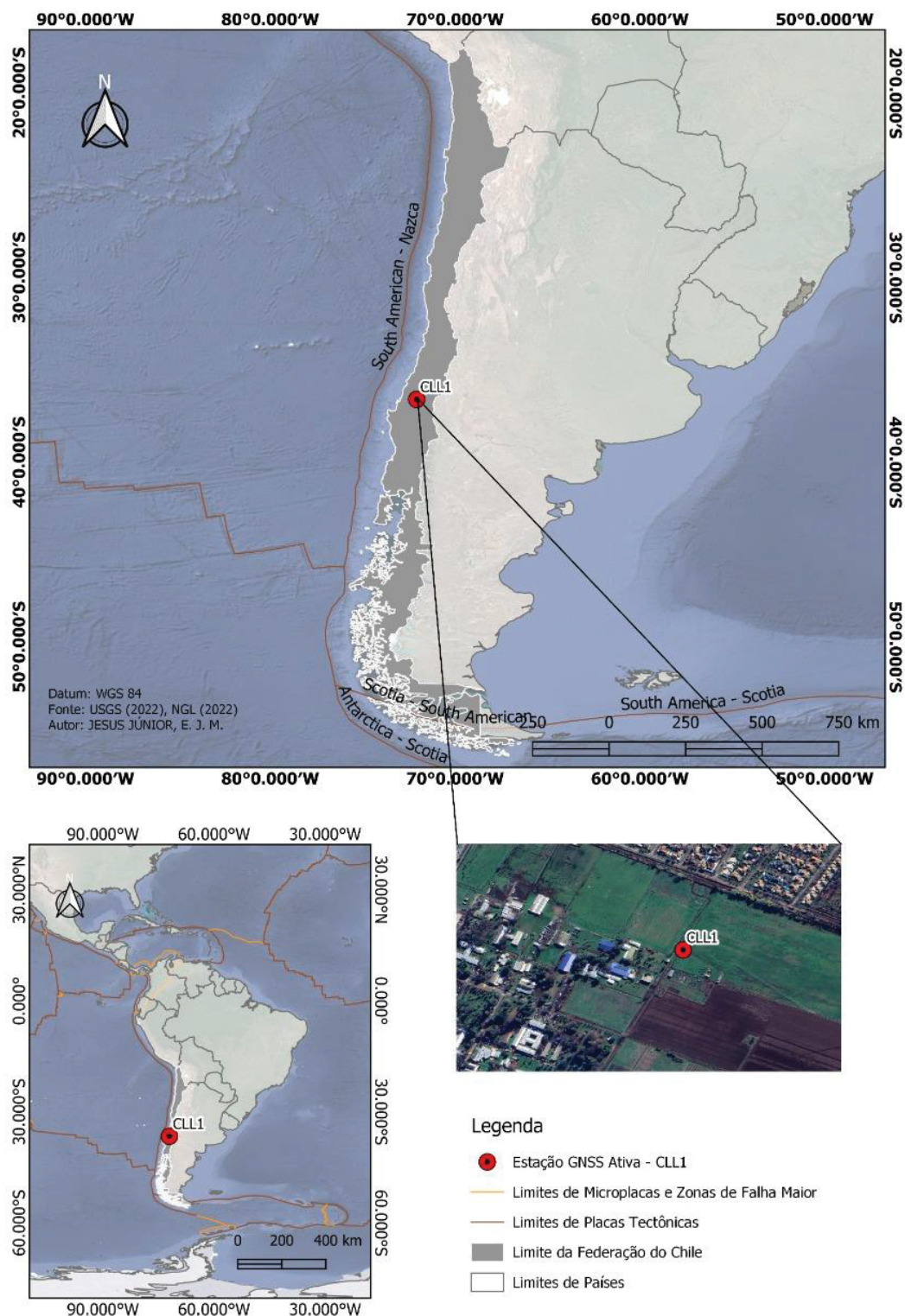
SAVCHYN, I.; BRUSAK, I.; TRETAK, K. Analysis of recent Antarctic plate kinematics based on GNSS data. **Geodesy and Geodynamics**, v. 14, n. 2, p. 99–110, mar. 2023.

SILVA, T. M. DA; TRABANCO, J. L. A. **Monitoramento de Movimentos Verticais em Obras de Engenharia Utilizado Tecnologia GNSS Através de Simulação**. 22 out. 2016.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. [s.l.] DE GRUYTER, 2012.

TORSVIK, T. H. et al. Global plate motion frames: Toward a unified model. **Reviews of Geophysics**, v. 46, n. 3, set. 2008.

## APÊNDICE 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA CLL1



Fonte: Os Autores (2023)

## APÊNDICE 6 – ESTAÇÃO GNSS CLL1 – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	CLL1	
	Este	Norte
Number of observations	4736	4736
Percentage of gaps	8,91	8,91
min log(L)	-7085,326	-7610,368
k	33	33
AIC	14236,651	15286,736
BIC	14446,849	15496,934
BIC_tp	14386,199	15436,284
BIC_c	14481,914	15581,085
ln_det_l	-12,935	36,152
GGM_fraction	0,01614	0,54901
GGM_sigma	11,46607mm/yr <sup>0,7</sup> 4990	4,90027mm/yr <sup>0,2</sup> 6977
GGM_d	1,4998 +/- 0,0000	0,5395 +/- 0,0147
GGM_kappa	-2,9996 +/- 0,0000	-1,0791 +/- 0,0293
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,98386	0,45099
White_sigma (mm)	1,07220	0,90409
STD of the driving noise	1,08096	1,34626
bias (mm)	1789,927 +/- 11188,009	-357,780 +/- 2,729
trend (mm/year)	-76,913 +/- 55,973	14,893 +/- 0,326
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	1,956 +/- 1,260	-1,344 +/- 0,201
sin yearly (mm)	0,492 +/- 1,279	-1,535 +/- 0,202
Amp yearly (mm)	2,465 +/- 1,104	2,050 +/- 0,201
Pha yearly (degrees)	14,126	-131,195
cos hyearly (mm)	0,156 +/- 0,461	-0,062 +/- 0,136
sin hyearly (mm)	1,035 +/- 0,455	-0,917 +/- 0,137
Amp hyearly (mm)	1,154 +/- 0,429	0,930 +/- 0,136
Pha hyearly (degrees)	81,539	-93,880

## APÊNDICE 7 – ESTAÇÃO GNSS CLL1 – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	CLL1	
	Este	Norte
Number of observations	4736	4736
Percentage of gaps	8,91	8,91
min log(L)	-7078,701	-7605,744
k	34	34
AIC	14225,402	15279,489
BIC	14441,969	15496,056
BIC_tp	14379,482	15433,568
BIC_c	14500,095	15612,305
ln_det l	10,126	68,249
GGM_fraction	0,01855	0,59539
GGM_sigma	11,18804mm/yr <sup>0,7</sup> 3411	4,75143mm/yr <sup>0,2</sup> 5680
GGM_d	1,4682 +/- 0,0060	0,5136 +/- 0,0145
GGM_kappa	-2,9364 +/- 0,0120	-1,0272 +/- 0,0290
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,98145	0,40461
White_sigma (mm)	1,06970	0,86073
STD of the driving noise	1,07976	1,35316
bias (mm)	-210,394 +/- 8325,439	-348,532 +/- 3,875
trend (mm/year)	-71,331 +/- 44,443	15,489 +/- 0,366
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	10,340 +/- 2,644	-0,167 +/- 0,053
cos yearly (mm)	1,891 +/- 1,188	-1,357 +/- 0,190
sin yearly (mm)	0,400 +/- 1,207	-1,438 +/- 0,194
Amp yearly (mm)	2,348 +/- 1,045	1,986 +/- 0,192
Pha yearly (degrees)	11,932	-133,328
cos hyearly (mm)	0,154 +/- 0,444	-0,067 +/- 0,130
sin hyearly (mm)	1,019 +/- 0,438	-0,896 +/- 0,132
Amp hyearly (mm)	1,132 +/- 0,414	0,908 +/- 0,130
Pha hyearly (degrees)	81,402	-94,272

## APÊNDICE 8 – ESTAÇÃO GNSS QLAP – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	QLAP	
	Este	Norte
Number of observations	4750	4750
Percentage of gaps	25,12	25,12
min log(L)	-14159,008	-9721,289
k	35	35
AIC	28388,017	19512,578
BIC	28604,2	19728,762
BIC_tp	28539,874	19664,436
BIC_c	28588,051	19774,550
ln_det_l	-68,149	-6,211
GGM_fraction	0,92633	0,97553
GGM_sigma	16,73879mm/yr <sup>0,0</sup> 5001	6,15179mm/yr <sup>0,0</sup> 8752
GGM_d	0,1000 +/- 0,0000	0,1750 +/- 0,0000
GGM_kappa	-0,2000 +/- 0,0000	-0,3501 +/- 0,0000
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,07367	0,02447
White_sigma (mm)	3,51417	0,58128
STD of the driving noise	12,94756	3,71633
bias (mm)	115,739 +/- 27152998,162	-70,737 +/- 22043923,536
trend (mm/year)	-3,463 +/- 0,534	16,387 +/- 0,221
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	-0,293 +/- 0,557	0,934 +/- 0,210
sin yearly (mm)	1,570 +/- 0,483	0,918 +/- 0,187
Amp yearly (mm)	1,685 +/- 0,504	1,325 +/- 0,197
Pha yearly (degrees)	100,564	44,504
cos hyearly (mm)	-1,597 +/- 0,451	0,243 +/- 0,165
sin hyearly (mm)	1,470 +/- 0,448	-0,267 +/- 0,164
Amp hyearly (mm)	2,218 +/- 0,445	0,401 +/- 0,153
Pha hyearly (degrees)	137,363	-47,673

## APÊNDICE 9 – ESTAÇÃO GNSS QLAP – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	QLAP	
	Este	Norte
Number of observations	4750	4750
Percentage of gaps	25,12	25,12
min log(L)	-9328,508	-7536,100
k	36	36
AIC	18729,016	15144,199
BIC	18951,376	15366,560
BIC_tp	18885,212	15300,396
BIC_c	19041,404	15499,164
ln_det_l	38,028	80,605
GGM_fraction	0,84116	0,97572
GGM_sigma	4,85268mm/yr <sup>0,07</sup> 886	2,67228mm/yr <sup>0,05</sup> 016
GGM_d	0,1577 +/- 0,0000	0,1003 +/- 0,0000
GGM_kappa	-0,3154 +/- 0,0000	-0,2006 +/- 0,0000
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,15884	0,02428
White_sigma (mm)	1,32417	0,31356
STD of the driving noise	3,32251	2,01230
bias (mm)	-319,626 +/- 9853954,947	64,314 +/- 5968108,052
trend (mm/year)	-7,876 +/- 0,197	16,437 +/- 0,097
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	2,036 +/- 0,046	-0,025 +/- 0,024
cos yearly (mm)	0,665 +/- 0,170	0,942 +/- 0,089
sin yearly (mm)	1,022 +/- 0,150	0,922 +/- 0,077
Amp yearly (mm)	1,230 +/- 0,159	1,321 +/- 0,082
Pha yearly (degrees)	56,932	44,383
cos hyearly (mm)	-1,637 +/- 0,134	0,244 +/- 0,071
sin hyearly (mm)	0,670 +/- 0,135	-0,249 +/- 0,071
Amp hyearly (mm)	1,774 +/- 0,134	0,356 +/- 0,070
Pha hyearly (degrees)	157,756	-45,534

## APÊNDICE 10 – ESTAÇÃO GNSS MIZU – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	MIZU	
	Este	Norte
Number of observations	4123	4123
Percentage of gaps	9,993	9,993
min log(L)	-8402,654	-8593,939
k	9	9
AIC	16823,307	17205,878
BIC	16879,279	17261,849
BIC_tp	16862,738	17245,308
BIC_c	16874,853	17267,169
ln_det_l	-4,426	5,320
GGM_fraction	0,02779	0,05414
GGM_sigma	12,56522mm/yr <sup>0,6</sup> 0826	10,01887mm/yr <sup>0,5</sup> 0183
GGM_d	1,2165 +/- 0,0298	1,0037 +/- 0,0151
GGM_kappa	-2,4330 +/- 0,0298	-2,0073 +/- 0,0303
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,97221	0,94586
White_sigma (mm)	2,05309	2,16767
STD of the driving noise	2,08223	2,22884
bias (mm)	3359,451 +/- 1083,158	-1668,125 +/- 144,449
trend (mm/year)	105,753 +/- 11,412	-52,946 +/- 3,020
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	1,467 +/- 1,093	0,938 +/- 0,693
sin yearly (mm)	1,225 +/- 1,082	0,380 +/- 0,686
Amp yearly (mm)	2,254 +/- 0,968	1,276 +/- 0,588
Pha yearly (degrees)	39,846	22,051
cos hyearly (mm)	0,337 +/- 0,480	-0,379 +/- 0,351
sin hyearly (mm)	-0,216 +/- 0,476	0,034 +/- 0,351
Amp hyearly (mm)	0,700 +/- 0,357	0,561 +/- 0,278
Pha hyearly (degrees)	-32,659	174,866

## APÊNDICE 11 – ESTAÇÃO GNSS MIZU – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	MIZU	
	Este	Norte
Number of observations	4123	4123
Percentage of gaps	9,993	9,99
min log(L)	-8372,074	-8566,131
k	10	10
AIC	16764,147	17152,262
BIC	16826,338	17214,453
BIC_tp	16807,959	17196,074
BIC_c	16854,217	17252,630
ln_det_l	27,879	38,177
GGM_fraction	0,0731	0,12202
GGM_sigma	11,43091mm/yr <sup>0,5</sup> 1135	9,16994mm/yr <sup>0,4</sup> 1821
GGM_d	1,0227 +/- 0,0151	0,8364 +/- 0,0150
GGM_kappa	-2,0454 +/- 0,0302	-1,6728 +/- 0,0300
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,92690	0,87798
White_sigma (mm)	1,99181	2,08544
STD of the driving noise	2,06886	2,22564
bias (mm)	3729,037 +/- 193,948	-1749,210 +/- 34,182
trend (mm/year)	101,273 +/- 3,783	-51,816 +/- 1,256
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-6,770 +/- 0,569	2,469 +/- 0,235
cos yearly (mm)	1,367 +/- 0,806	0,899 +/- 0,530
sin yearly (mm)	1,293 +/- 0,798	0,301 +/- 0,525
Amp yearly (mm)	2,063 +/- 0,754	1,110 +/- 0,472
Pha yearly (degrees)	43,406	18,532
cos hyearly (mm)	0,262 +/- 0,403	-0,351 +/- 0,300
sin hyearly (mm)	-0,284 +/- 0,401	0,069 +/- 0,301
Amp hyearly (mm)	0,614 +/- 0,309	0,500 +/- 0,243
Pha hyearly (degrees)	-47,304	168,862

## APÊNDICE 12 – ESTAÇÃO GNSS BELE – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	BELE	
	Este	Norte
Number of observations	7017	7017
Percentage of gaps	6,698	6,66
min log(L)	-12851,473	-12701,103
k	12	9
AIC	25726,946	25420,205
BIC	25808,387	25481,290
BIC_tp	25786,332	25464,749
BIC_c	25851,995	25515,524
ln_det l	37,608	34,234
GGM_fraction	0,19369	0,35378
GGM_sigma	3,60293mm/yr <sup>0,2</sup> 7196	4,21614mm/yr <sup>0,2</sup> 5156
GGM_d	0,5439 +/- 0,0141	0,5031 +/- 0,0127
GGM_kappa	-1,0878 +/- 0,0282	-1,0062 +/- 0,0253
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,80631	0,64622
White_sigma (mm)	1,47719	1,29153
STD of the driving noise	1,64507	1,60662
bias (mm)	650,338 +/- 1,471	-670,739 +/- 1,185
trend (mm/year)	-4,544 +/- 0,103	12897 +/- 0,081
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	0,655 +/- 0,117	1,830 +/- 0,128
sin yearly (mm)	-1,675 +/- 0,116	-1,164 +/- 0,128
Amp yearly (mm)	1,803 +/- 0,116	2,172 +/- 0,128
Pha yearly (degrees)	-68,642	-32,460
cos hyearly (mm)	-0,156 +/- 0,082	-0,033 +/- 0,092
sin hyearly (mm)	0,075 +/- 0,082	0,000 +/- 0,092
Amp hyearly (mm)	0,194 +/- 0,076	0,119 +/- 0,062
Pha hyearly (degrees)	154,402	179,835

### APÊNDICE 13 – ESTAÇÃO GNSS BELE – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	BELE	
	Este	Norte
Number of observations	7017	7017
Percentage of gaps	6,698	6,66
min log(L)	-12848,18	-12700,567
k	13	10
AIC	25722,36	25421,134
BIC	25810,588	25489,006
BIC_tp	25786,695	25470,627
BIC_c	25888,005	25555,892
ln_det l	71,418	66,886
GGM_fraction	0,22265	0,35983
GGM_sigma	3,53659mm/yr <sup>0,2</sup> 5659	4,20231mm/yr <sup>0,2</sup> 4947
GGM_d	0,5132 +/- 0,0142	0,4989 +/- 0,0127
GGM_kappa	-1,0264 +/- 0,0284	-0,9979 +/- 0,0253
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,77735	0,64017
White_sigma (mm)	1,45389	1,28618
STD of the driving noise	1,64901	1,60751
bias (mm)	648,607 +/- 1,350	-670,172 +/- 1,267
trend (mm/year)	-4,512 +/- 0,091	12898 +/- 0,080
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	0,035 +/- 0,013	-0,012 +/- 0,012
cos yearly (mm)	0,654 +/- 0,112	1,834 +/- 0,0128
sin yearly (mm)	-1,689 +/- 0,110	-1,160 +/- 0,127
Amp yearly (mm)	1,815 +/- 0,111	2,174 +/- 0,127
Pha yearly (degrees)	-68,846	-32,306
cos hyearly (mm)	-0,160 +/- 0,080	-0,032 +/- 0,092
sin hyearly (mm)	0,069 +/- 0,080	0,002 +/- 0,092
Amp hyearly (mm)	0,194 +/- 0,074	0,119 +/- 0,062
Pha hyearly (degrees)	156,626	176,308

## APÊNDICE 14 – ESTAÇÃO GNSS BRAZ – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	BRAZ	
	Este	Norte
Number of observations	10262	10262
Percentage of gaps	11,06	11,06
min log(L)	-21142,601	-18255,699
k	17	9
AIC	42319,203	36529,398
BIC	42440,226	36593,469
BIC_tp	42408,982	36576,928
BIC_c	42476,489	36626,092
ln_det_l	20,263	32,623
GGM_fraction	0,10994	0,28718
GGM_sigma	6,60332mm/yr <sup>0,36</sup> 623	4,87877mm/yr <sup>0,28</sup> 544
GGM_d	0,7325 +/- 0,0124	0,5709 +/- 0,0108
GGM_kappa	-1,4649 +/- 0,0247	-1,1418 +/- 0,0215
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,89006	0,71282
White_sigma (mm)	2,16473	1,42644
STD of the driving noise	2,29453	1,68952
bias (mm)	371,755 +/- 10,431	-821,902 +/- 2,178
trend (mm/year)	-3,486 +/- 0,314	12,610 +/- 0,091
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	0,584 +/- 0,221	1,081 +/- 0,135
sin yearly (mm)	-1,410 +/- 0,217	0,719 +/- 0,134
Amp yearly (mm)	1,542 +/- 0,218	1,305 +/- 0,134
Pha yearly (degrees)	-67,486	33,619
cos hyearly (mm)	-0,240 +/- 0,134	-0,207 +/- 0,092
sin hyearly (mm)	0,143 +/- 0,134	-0,156 +/- 0,092
Amp hyearly (mm)	0,314 +/- 0,124	0,276 +/- 0,088
Pha hyearly (degrees)	149,281	-143,066

## APÊNDICE 15 – ESTAÇÃO GNSS BRAZ – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	BRAZ	
	Este	Norte
Number of observations	10262	10262
Percentage of gaps	11,06	11,06
min log(L)	-21141,03	-18255,502
k	18	10
AIC	42318,06	36531,003
BIC	42446,202	36602,193
BIC_tp	42413,12	36583,814
BIC_c	42513,992	36667,946
ln_det l	51,79	65,753
GGM_fraction	0,11368	0,28799
GGM_sigma	6,56898mm/yr <sup>0,3</sup> 6245	4,87593mm/yr <sup>0,2</sup> 8509
GGM_d	0,7249 +/- 0,0123	0,5702 +/- 0,0108
GGM_kappa	-1,4498 +/- 0,0247	-1,1404 +/- 0,0215
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,88632	0,71201
White_sigma (mm)	2,16086	1,42574
STD of the driving noise	2,29526	1,68964
bias (mm)	366,806 +/- 10,150	-822,475 +/- 2,348
trend (mm/year)	-3,442 +/- 0,303	12,609 +/- 0,090
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	0,042 +/- 0,023	0,005 +/- 0,009
cos yearly (mm)	0,583 +/- 0,218	1,081 +/- 0,135
sin yearly (mm)	-1,417 +/- 0,215	0,717 +/- 0,133
Amp yearly (mm)	1,548 +/- 0,215	1,304 +/- 0,134
Pha yearly (degrees)	-67,625	33,562
cos hyearly (mm)	-0,237 +/- 0,133	-0,206 +/- 0,092
sin hyearly (mm)	0,139 +/- 0,133	-0,156 +/- 0,092
Amp hyearly (mm)	0,309 +/- 0,122	0,275 +/- 0,088
Pha hyearly (degrees)	149,659	-142,893

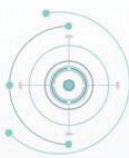
## APÊNDICE 16 – ESTAÇÃO GNSS UFPR – CÁLCULO SEM ACELERAÇÃO

RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL S ACEL		
Descri. Estação GNSS	UFPR	
	Este	Norte
Number of observations	9591	9654
Percentage of gaps	4,827	4,796
min log(L)	-17558,123	-36894,058
k	9	9
AIC	35134,245	73806,115
BIC	35198,317	73870,249
BIC_tp	35181,776	73853,708
BIC_c	35225,43	73842,413
ln_det l	27,113	-27,836
GGM_fraction	0,1866	0,99647
GGM_sigma	5,33660mm/yr <sup>0,35</sup> 313	243,11866mm/yr <sup>0,49</sup> 315
GGM_d	0,7063 +/- 0,0114	0,9863 +/- 0,0081
GGM_kappa	-1,4125 +/- 0,0228	-1,9726 +/- 0,0161
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,81340	0,00353
White_sigma (mm)	1,38686	0,78831
STD of the driving noise	1,53773	13,26883
bias (mm)	-487,453 +/- 6,800	-65,107 +/- 3006,116
trend (mm/year)	-3,271 +/- 0,209	56,679 +/- 43,048
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-	-
cos yearly (mm)	-0,308 +/- 0,172	-13,516 +/- 10,519
sin yearly (mm)	-0,682 +/- 0,170	5,670 +/- 10,497
Amp yearly (mm)	0,768 +/- 0,169	18,906 +/- 8,845
Pha yearly (degrees)	-114,304	157,242
cos hyearly (mm)	-0,046 +/- 0,107	-3,513 +/- 5,338
sin hyearly (mm)	-0,055 +/- 0,106	-6,571 +/- 5,308
Amp hyearly (mm)	0,148 +/- 0,077	9,596 +/- 4,484
Pha hyearly (degrees)	-129,594	-118,129

## APÊNDICE 17 – ESTAÇÃO GNSS UFPR – CÁLCULO COM ACELERAÇÃO


RESULTADOS OBTIDOS - HECTOR - ALL C ACEL		
Descri. Estação GNSS	UFPR	
	Este	Norte
Number of observations	9591	9654
Percentage of gaps	4,827	4,80
min log(L)	-17558,026	-36892,501
k	10	10
AIC	35136,053	73805,002
BIC	35207,244	73876,261
BIC_tp	35188,865	73857,883
BIC_c	35265,946	73870,041
ln_det_l	58,702	-6,220
GGM_fraction	0,18768	0,99832
GGM_sigma	5,33116mm/yr <sup>0,3</sup> 5245	242,01720mm/yr <sup>0,</sup> 49210
GGM_d	0,7049 +/- 0,0114	0,9842 +/- 0,0081
GGM_kappa	-1,4098 +/- 0,0228	-1,9684 +/- 0,0161
GGM_1-phi	6,90E-06	6,90E-06
White_fraction	0,81232	0,00168
White_sigma (mm)	1,38611	0,54501
STD of the driving noise	1,53793	13,27860
bias (mm)	-486,550 +/- 7,025	-916,827 +/- 2979,160
trend (mm/year)	-3,270 +/- 0,208	56,396 +/- 42,346
Quadratic Acceleration (mm/year <sup>2</sup> )	-0,008 +/- 0,019	5,096 +/- 2,875
cos yearly (mm)	-0,306 +/- 0,171	-13,585 +/- 10,448
sin yearly (mm)	-0,680 +/- 0,170	5,575 +/- 10,425
Amp yearly (mm)	0,766 +/- 0,168	18,867 +/- 8,803
Pha yearly (degrees)	-114,198	157,687
cos hyearly (mm)	-0,045 +/- 0,106	-3,579 +/- 5,309
sin hyearly (mm)	-0,055 +/- 0,106	-6,469 +/- 5,280
Amp hyearly (mm)	0,148 +/- 0,076	9,532 +/- 4,458
Pha hyearly (degrees)	-129,599	-118,952

## APÊNDICE 18 – MENÇÃO HONROSA – CATEGORIA MESTRADO GEODÉSIA E LEVANTAMENTOS




**XII** Colóquio Brasileiro  
de Ciências **CERTIFICADO**  
Geodésicas

**V** Simpósio  
Brasileiro de  
Geomática




O Capítulo Brasil e Chile da IEEE/GRSS, Mato Grosso do Sul IEEE/GRSS Student Branch, Ramo Estudantil IEEE/UFMS e PELS, em conjunto com o XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas e o V Simpósio Brasileiro de Geomática realizado de 08 a 11 de novembro de 2022, conferem **MENÇÃO HONROSA** ao trabalho intitulado ESTIMATIVAÇÃO DA ACELERAÇÃO DE ESTAÇÕES GNSS ATIVAS de autoria de **Eliel Jesus Junior**, com coautoria de Renan Costa, Ivandro Klein e Paulo Oliveira Junior, na categoria MESTRADO na área de Geodésia e Levantamentos.


**IEEE GRSS Brazil Chapter**



*Regiane Dalazoana*      *João Francisco Galera Monico*



Profª. Dra. Regiane Dalazoana  
Coordenadora Geral do XII CBCG e V SBG



Profª. Dr. João Francisco Galera Monico  
Vice-Coordenador Geral do XII CBCG e V SBG