



## Automação do Processo de Mudança de Referencial Geodésico e Atualização de Coordenadas no Posicionamento de Alta Precisão

### *Automation in the Change of Geodetic Reference Process and Coordinate Reduction in High Precision Positioning*

Taynara Nascimento de Oliveira <sup>1</sup> e Alessandro Salles Carvalho <sup>2</sup>

1 Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Civil, Juiz de Fora, Brasil. [taynara.nascimento@engenharia.ufjf.br](mailto:taynara.nascimento@engenharia.ufjf.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7812-7728>

2 Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora, Brasil.  
[alessandro.carvalho@ufjf.edu.br](mailto:alessandro.carvalho@ufjf.edu.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7428-0912>

Recebido: 06.2020 | Aceito: 08.2021

**Resumo:** O posicionamento em levantamentos topográficos e geodésicos com uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) pode ser realizado com uso de serviços on-line gratuitos e comerciais. Estes, determinam as coordenadas dos pontos de interesse na época e referencial geodésico das efemérides precisas, às quais são usadas no pós-processamento das observáveis GNSS coletadas em campo e difere do sistema geodésico de referência adotado para o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro). No Brasil, é empregado na determinação das coordenadas apenas a realização SIRGAS2000 (época 2000,4). É imprescindível a mudança de referencial e atualização das coordenadas para o referencial geodésico oficial no país. Assim, uma ferramenta computacional para automação dos procedimentos e fornecimento de relatório dos cálculos executados internamente, contribui para estudantes e usuários desses serviços de processamento de dados GNSS para posicionamento. O propósito deste trabalho foi desenvolver um software, nomeado de MRefGeo, para realizar a mudança de referencial geodésico e atualização das coordenadas e validar os resultados de sua utilização. No MRefGeo, é possível escolher parâmetros disponibilizados pelo IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Posicionamento por Ponto Preciso) ou pelo IERS/IGN (*International Earth rotation and Reference systems Service/ Institut National de l'Information Géographique et Forestière*) para mudança de referencial e modelos de velocidade para o SIRGAS - VEMOS2009 e VEMOS2017. Os resultados obtidos com MRefGeo são concordantes, a nível do milímetro, com os fornecidos pela ferramenta on-line ETRF/ITRF *coordinate transformation* utilizados na validação das transformações e atualizações.

**Palavras-chave:** Posicionamento Geodésico. Serviços on-line GNSS. Mudança de Referencial Geodésico.

**Abstract:** The positioning in topographic and geodetic surveying with GNSS (*Global Navigation Satellite System*) receivers could be performed using commercial and free on-line service available on the internet. These determine the coordinates of the point of interest at epoch and geodetic reference frame of precise orbits, which in the post-processing GNSS data collected, are used and differ from the reference frame adopted for the Brazilian Geodetic System (SGB). In Brazil, only the frame SIRGAS2000 (epoch 2000.4) is applied to the coordinate determination. Therefore, it is necessary to change the reference frame and reduction of coordinate obtained from those services to the official geodetic frame adopted in the country. Thus, the computational tools to automation of procedures and report supply of the calculations, performed internally, contributes to students and users of the on-line service for post-processing GNSS data for positioning. The purpose of this study was to develop a software, named of MRefGeo, to make the change of geodetic reference frame and coordinate reduction as well as to validate the results of its use. In the MRefGeo, it is possible to choose the parameter available between the IBGE-PPP (Brazilian Institute of Geography and Statistics – Precise Point Positioning) or IERS/IGN (*International Earth rotation and Reference systems Service/ Institut National de l'Information Géographique et Forestière*) to change the referential and velocity models for the SIRGAS – VEMOS2009 and VEMOS2017. The experiments realized with use of MRefGeo showed that results are in agreement, at the millimeter level, with those provide by the ETRF/ITRF *coordinate transformation* on-line tool used in these operations.

**Keywords:** Geodetic Positioning. GNSS on-line services. Reference Frame Transformation.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas baseados na Web para pós-processamento de dados GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) com emprego dos métodos de posicionamento relativo (PR) e absoluto por ponto preciso (PPP) têm sido amplamente utilizados na determinação de pontos de apoio em levantamentos topográficos ou geodésicos.

Dentre os sistemas mais utilizados para realizar o PPP, são: o IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Posicionamento por Ponto Preciso), o GAPS (*GNSS Analysis and Positioning Software*), o APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), o CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*), o RT\_PPP on-line (*Real Time – Precise Point Positioning*), o RTX\_PP (*CenterPoint RTX Post-Processing*) e o magicPPP (*Precise Point Positioning Service*). Para efetuar o PR tem-se, dentre outros, o OPUS (*On-line Positioning User Service*), o SOPAC (*Scripps Orbit and Permanent Array Center*) e o AUSPOS (*on-line GPS data processing*) (CARVALHO et al., 2014; GUO, 2015; MARQUES et al., 2015; TARIQ; HADI; HAFEDH, 2017; MACIUK; SKORUPA, 2017; IBGE, 2017; OZULU; EROL; ALKAN, 2018; ALBAYRAK; ERDOĞAN; ERKAYA, 2020).

De modo geral, esses sistemas tendem a empregar as efemérides precisas (ultrarrápidas, rápidas, finais) e correções dos relógios dos satélites produzidas pelo IGS (*International GNSS Service*) no processamento dos dados GNSS coletados em campo. O intervalo de tempo entre a coleta dos dados e o envio para processamento definirá o tipo de efemérides que será empregada. A depender da época da coleta dos dados GNSS em campo poderá ser empregado produtos IGS em diferentes realizações IGS. Para o período 02/12/2001 a 10/01/2004, as efemérides disponibilizadas pelo IGS estão vinculadas ao IGS00; de 11/01/2004 a 04/11/2006 ao IGB00; de 05/11/2006 a 16/04/2011 ao IGS05; de 17/04/2011 a 06/10/2012 ao IGS08; de 07/10/2012 a 28/01/2017 ao IGB08; de 29/01/2017 a 16/05/2020 ao IGS14; e desde 17/05/2020 ao IGB14 (IGS ACC, 2020; REBISCHUNG, 2020); Cabe salientar que as realizações IGS00 e IGB00, IGS05, IGS08 e IGB08, IGS14 e IGB14 são alinhadas, respectivamente, às realizações ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 e ITRF2014 (IGS-ACC, 2020). Portanto, as coordenadas determinadas com uso destes sistemas poderão estar em algumas destas realizações e na época da coleta dos dados.

No Brasil, desde 25 de fevereiro de 2015, o IBGE passou a adotar exclusivamente para o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) e para o SCN (Sistema Cartográfico Nacional), o referencial geodésico SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) realizado no ano 2000, sendo por isso, denominado de SIRGAS2000, época 2000,4 (IBGE, 2015). As coordenadas da realização SIRGAS2000 referem-se ao ITRF2000, época 2000,4 (SIRGAS, 2020). Devido a diferença existente entre a época e referencial das efemérides precisas com o referencial e época adotados para o cálculo das coordenadas no Brasil, torna-se mandatório compatibilizar o referencial e a época das coordenadas.

A transformação entre dois sistemas geodésicos de referência é realizada com o emprego da transformação de Helmert completa de 14 parâmetros: três translações, três rotações, um fator de escala e respectivas variações temporais (SOLER; MARSHALL, 2003; PETIT; LUZUM, 2010; IGN, 2020).

O IGN (*Institut National de L'Information Géographique et Forestière*) e o IERS (*International Earth rotation and Reference systems Service*) disponibilizam os parâmetros para mudança de referencial do ITRF2014 para o ITRF2000 e de outras realizações ITRFs do ITRS (IGN, 2020). Os parâmetros de transformação para mudança de referencial do ITRF2014 para o ITRF2008, do ITRF2008 para o ITRF2005 e do ITRF2005 para o ITRF2000 podem ser encontrados em Altamimi et al. (2007), Altamimi, Rebischung e Métivier (2011) e Altamimi et al. (2016). Porém, no IBGE-PPP são utilizados parâmetros próprios de transformação (IBGE, 2017). Em IBGE (2017), encontram-se o conjunto de parâmetros para mudança de referencial das realizações ITRF(IGS14), ITRF(IGB08), ITRF(IGS08), ITRF(IGS05), ITRF(IGB00) para o SIRGAS2000. Com a nova realização IGB14 do IGS, disponibilizada a partir de 17/05/2020 (semana GPS 2106) por meio dos produtos IGS – órbitas precisas GNSS, o serviço IBGE-PPP passou a adotar novos parâmetros para determinar coordenadas no SIRGAS2000 (IBGE, 2020).

Na página do SIRGAS na internet encontra-se a indicação do emprego dos parâmetros de transformação entre as soluções ITRFs para mudança de referencial das coordenadas e velocidades entre as diferentes realizações SIRGAS ou suas densificações (SIRGAS 2020 a). Portanto, neste trabalho adotou-se o

emprego dos parâmetros em uso no IBGE-PPP e fornecidos pelo IGN nos procedimentos de compatibilização de referencial geodésico.

Resolvendo a questão da mudança de referencial geodésico deve-se atualizar as coordenadas da época da coleta dos dados (época das efemérides precisas) para a época 2000,4. Portanto, deve-se conhecer as componentes do vetor velocidade de cada estação de interesse. Para isso, existem diferentes modelos de velocidade para determinação das velocidades, mas o recomendado para ser empregado na área de abrangência do SIRGAS é *Velocity Model of Sirgas - VEMOS* (SIRGAS, 2020 b). O modelo mais recente do VEMOS é o VEMOS2017 e as velocidades são vinculadas ao ITRF2014 (DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020). Segundo o IBGE (2017), o IBGE-PPP faz uso do VEMOS2009 (velocidades no ITRF2005) e por isso também foi empregado neste trabalho.

Ambos modelos consistem em uma malha (*grid*) de 1° de latitude por 1° de longitude, onde em cada ponto desta malha são conhecidas as velocidades horizontais nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste. Em conjunto com o *grid* VEMOS2009 é disponibilizado um aplicativo VMS2009, que funciona em DOS (*Disk Operating System*) e em Sistema Operacional de 32 bits, para interpolação das velocidades dos pontos de interesse (DREWES; HEIDBACH, 2012; DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020).

Dos serviços de processamento de dados GNSS supracitados, o único que realiza a conversão das coordenadas obtidas no referencial das efemérides precisas e época da coleta dos dados para o referencial geodésico oficial do Brasil - SIRGAS2000, época 2000,4 - com uso do VEMOS e parâmetros de transformação próprios, é o IBGE-PPP.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa com interface gráfica do usuário que além automatizar a mudança de referencial geodésico e atualizar as coordenadas, com base nos parâmetros de transformação utilizados pelo IBGE-PPP e IERS/IGN e das velocidades obtidas com os modelos VEMOS2009, VEMOS2017 e fornecidas pelo usuário, permita gerar relatório contendo os resultados intermediários e finais.

## 2 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA MREFGEO

O programa denominado de MRefGeo (Mudança de Rreferencial Geodésico) para automatizar os procedimentos para mudança de referencial geodésico e atualização das coordenadas foi implementado em linguagem Java com uso do IDE NetBeans ver. 8.2 e foi concebido no projeto desenvolvido por Oliveira (2019). O código fonte do MRefGeo encontra-se disponível no link <<https://drive.google.com/drive/folders/1Zip6oeVB9TsnLRZYMtBvW2-lPY9x0mkJ?usp=sharing>> e deverá ser utilizado para fins didáticos e de pesquisa, podendo ser modificado dependendo das necessidades do usuário. Novas versões serão disponibilizadas nesse endereço. A interface gráfica do produto gerado pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Interface gráfica do programa MRefGeo.

Fonte: Os autores (2022).

A Figura 2 ilustra o arquivo de entrada no formato texto, na extensão .txt, contendo o identificador da estação, coordenadas e velocidades cartesianas geocêntricas no mesmo referencial.

Figura 2 – Arquivo de entrada das coordenadas e velocidades no referencial e época de origem.

| Estacao | X            | Y             | Z             | Vx    | Vy    | Vz    |
|---------|--------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|
| MGJF    | 4308031.8893 | -4069999.4169 | -2351824.8078 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Fonte: Os autores (2022).

A Figura 3 ilustra o resultado do cálculo da velocidade com uso VEMOS2009, no referencial das coordenadas de entrada (ITRF(IGb14), e o resultado final das coordenadas e velocidades em SIRGAS2000 (época 2000,4) após mudança de referencial e atualização de coordenadas com o MRefGeo.

Figura 3 – Resultado da mudança de referencial e atualização das coordenadas.

**Parâmetros de transformação:**  
 IBGE  
 IERS

**Referencial de origem:**  
 IBGE: ITRF(IGb14)  
 IERS: Escolha o referencial de origem

**Época de origem:**  
 Dia/Mês/Ano  
 Ano + Fração: 2021.0

**Referencial de destino:**  
 IBGE: SIRGAS2000  
 IERS: Escolha o referencial de destino

**Época de destino:**  
 Dia/Mês/Ano  
 Ano + Fração: 2000.4

**Modelo de Velocidade:**  
 VEMOS2009

**Coordenadas e velocidades no referencial de origem:**

| Estação | X(m)         | Y(m)          | Z(m)          | Vx (m/s) | Vy (m/s) | Vz (m/s) |
|---------|--------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|
| MGJF    | 4308031.8893 | -4069999.4169 | -2351824.8078 | 0.0012   | -0.0058  | 0.0111   |

**Coordenadas e velocidades no referencial de destino:**

| Estação | X(m)          | Y(m)           | Z(m)           | Vx (m/s) | Vy (m/s) | Vz (m/s) |
|---------|---------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| MGJF    | 4308031.86705 | -4069999.30480 | -2351825.04348 | 0.00120  | -0.00580 | 0.01110  |

Botões: Calcular, Limpar tudo, Limpar tabelas, Sair

Fonte: Os autores (2022).

A Figura 4 ilustra o arquivo contendo o resultado final do processamento.

Figura 4 – Arquivo de saída das coordenadas e velocidades no referencial e época de destino.

| Estação | X             | Y              | Z              | Vx      | Vy       | Vz      |
|---------|---------------|----------------|----------------|---------|----------|---------|
| MGJF    | 4308031.86705 | -4069999.30480 | -2351825.04348 | 0.00120 | -0.00580 | 0.01110 |

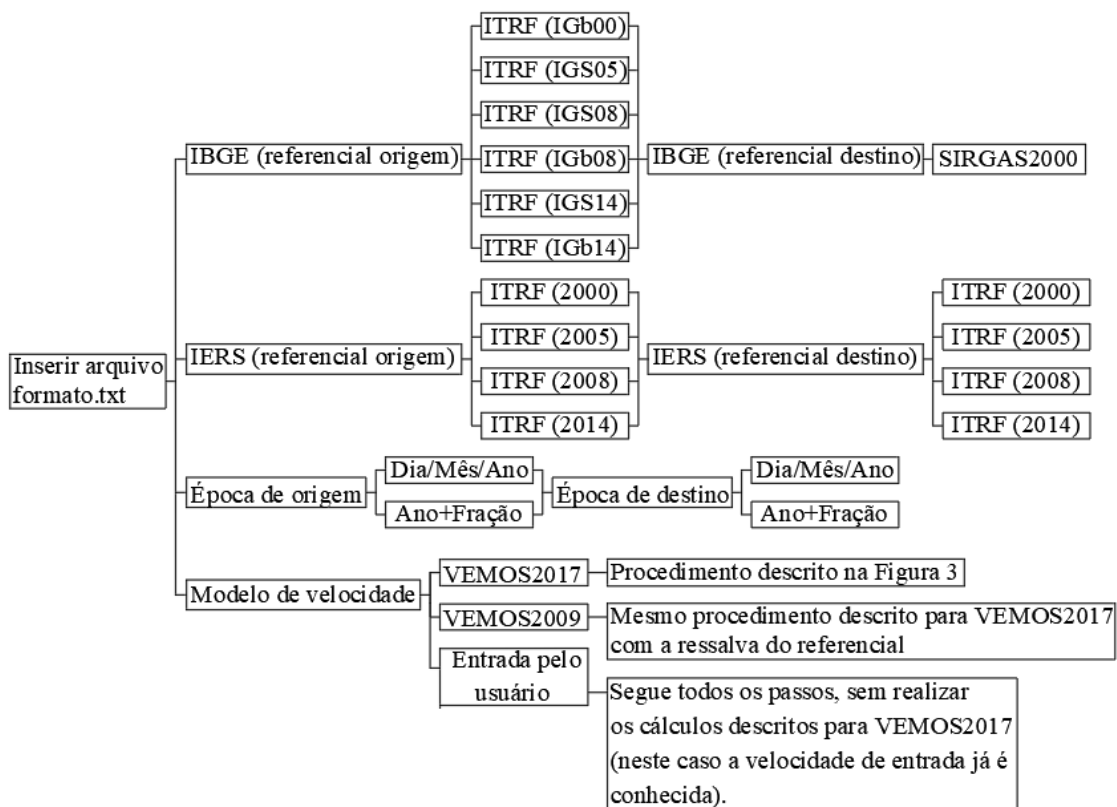
Fonte: Os autores (2022).

O MRefGeo possibilita realizar a compatibilização de referencial geodésico com uso dos novos parâmetros empregados pelo serviço IBGE-PPP e dos disponibilizados pelo IERS e IGN.

A atualização das coordenadas para uma época de interesse poderá ser realizada com uso das velocidades fornecidas pelo usuário ou calculada com uso dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017.

A Figura 5 ilustra as possibilidades de escolha de parâmetros disponibilizados pelo IBGE-PPP e IERS, os modelos de velocidades para atualização das coordenadas e as transformações possíveis entre as diferentes realizações.

Figura 5 - Esquema das possibilidades de transformação de coordenadas e formas de obtenção de velocidades.



Fonte: Os autores (2022).

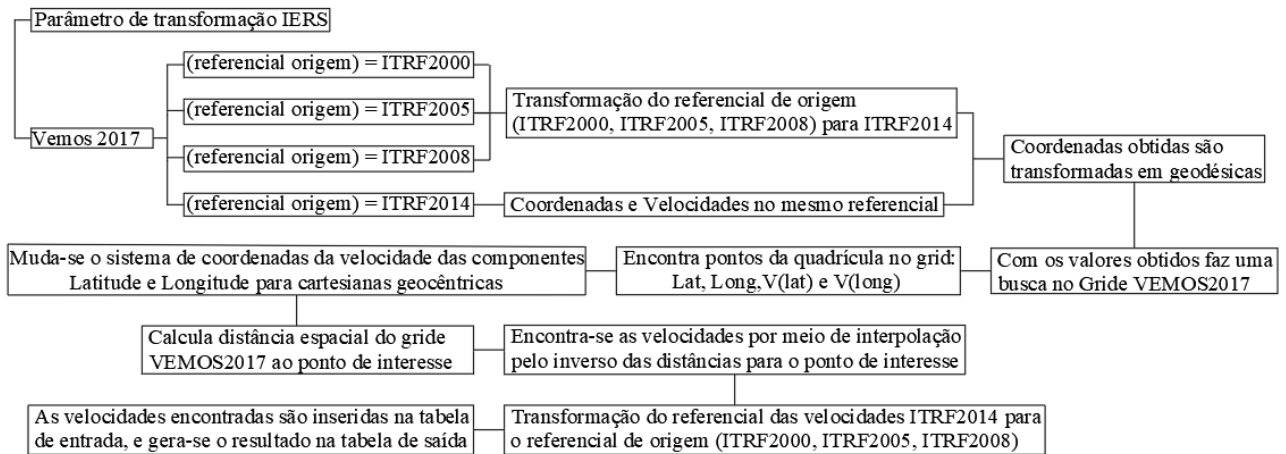
Ao selecionar parâmetros IBGE no programa é possível escolher como referência de origem o ITRF(IGb00), ITRF(IGS05), ITRF(IGS08), ITRF(IGb08), ITRF(IGS14) e ITRF(IGb14) - referenciais definidos pelas efemérides/órbitas precisas dos satélites. Para referencial destino, a única opção é SIRGAS2000. Portanto, o MRefGeo poderá ser utilizado para determinação das coordenadas no SGB com dados obtidos de quaisquer serviços baseados na Web de processamento de dados GNSS com os métodos por ponto preciso (absoluto) ou relativo com o emprego dos mesmos parâmetros de transformação utilizados pelo IBGE-PPP.

Escolhendo-se os parâmetros disponibilizados pelo IERS ter-se-ão como opções de referencial de origem o ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 e ITRF2014 e como referencial de destino as realizações ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 e ITRF2014. Após a escolha dos parâmetros e das transformações de interesse deve-se inserir as épocas de origem e destino das coordenadas em um dos dois formatos dia/mês/ano ou ano + fração do ano.

Na Figura 5 pode-se visualizar a opção modelo de velocidade que possibilita ao usuário inserir as velocidades (determinadas *a priori* por outros meios) ou calculá-las com uso dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017. Selecionado o referencial de origem diferente do adotado nos modelos de velocidades para o SIRGAS o programa realiza a mudança de referencial das coordenadas fornecidas pelo usuário para o adotado por esses modelos para execução dos cálculos (interpolação) da velocidade. Caso as coordenadas de entrada estejam no ITRF2005 e ITRF2014 e sejam escolhidos os modelos VEMOS2009 e VEMOS2017, respectivamente, não haverá necessidade mudar o referencial para o cálculo das velocidades.

A Figura 6 apresenta o processo implementado no MRefGeo para cálculo das velocidades dos pontos de interesse. Procedimento análogo foi aplicado para o VEMOS2009, mas considerando-se a diferença de referencial entre eles. Os parâmetros utilizados na mudança de referencial das velocidades estão disponíveis na Tabela 2.

Figura 6: Etapas para obtenção das velocidades com uso do *grid* VEMOS2017.



Fonte: Os autores (2022).

Na seção 3 serão apresentadas as equações para mudança de referencial geodésico das coordenadas e velocidades e atualização dos parâmetros de transformação implementadas no MRefGeo.

### 3 MUDANÇA DE REFERENCIAL GEODÉSICO DAS COORDENADAS E VELOCIDADES

A mudança de referencial geodésico das coordenadas e velocidades para SIRGAS2000 ou outra realização ITRF do ITRS foi realizada por meio da transformação de Helmert com o emprego das equações (1) e (2) (PETITI; LUZUM, 2010; ALTAMIMI; REBISCHUNG; MÉTIVIER, 2011; IGN, 2020).

$$\begin{pmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \end{pmatrix}_{t_0} = \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{pmatrix}_{t_0} + \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix}_{t_0} + \begin{pmatrix} D & -Rz & Ry \\ Rz & D & -Rx \\ -Ry & Rx & D \end{pmatrix}_{t_0} \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{pmatrix}_{t_0} \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} Vx2 \\ Vy2 \\ Vz2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Vx1 \\ Vy1 \\ Vz1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}x \\ \dot{T}y \\ \dot{T}z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{D} & -\dot{R}z & \dot{R}y \\ \dot{R}z & \dot{D} & -\dot{R}x \\ -\dot{R}y & \dot{R}x & \dot{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{pmatrix}_{t_0} \tag{2}$$

onde  $x1, y1, z1$ : coordenadas cartesianas no referencial e época de origem;  $x2, y2, z2$ : coordenadas cartesianas no referencial destino e época de origem;  $Vx1, Vy1, Vz1$ : velocidades cartesianas no referencial de origem;  $Vx2, Vy2, Vz2$ : velocidades cartesianas no referencial de destino;  $Tx, Ty, Tz$ : translações;  $\dot{T}x, \dot{T}y, \dot{T}z$ : variação temporal das translações;  $Rx, Ry, Rz$ : rotações;  $\dot{R}x, \dot{R}y, \dot{R}z$ : variação temporal das rotações;  $D$ : escala;  $\dot{D}$ : variação temporal da escala.

Salienta-se que o referencial de origem dado na Eq. (1) está associado ao índice 1, (lado direito da equação) e o referencial destino ao 2 (lado esquerdo). Deve-se também atentar-se às unidades dos parâmetros envolvidos. Nas Eq. (1) e (2), as épocas deverão estar em ano mais fração do ano, as translações em metros, as rotações em radianos, o fator de escala deverá ser dividido por um bilhão; as variações temporais (*rates*) dos parâmetros nas unidades supracitadas divididas por ano, as coordenadas em metros e as velocidades cartesianas e metros por ano.

Na Eq. (1), os parâmetros de transformação e as coordenadas de origem deverão estar na mesma época antes de empregá-los no cálculo das coordenadas no referencial destino. Portanto, caso as coordenadas de origem estiverem na época ( $t_0$ ) e os parâmetros na época ( $t_p$ ) deve-se atualizá-los para ( $t_0$ ) antes utilizá-los na Eq. (1). A atualização é efetuada com o uso dos *rates* dos parâmetros e do intervalo de tempo ( $t_0 - t_p$ ) conforme apresentado nas Eq. (3) a (9). Todas as variações temporais dos parâmetros estimados pelo IBGE-PPP são iguais a zero conforme pode ser observado na Tabela 1.

Os sete parâmetros de transformação podem ser atualizados com as Eq. (3) a (9) (IGN, 2020):

$$Tx(t_0) = Tx(t_p) + \dot{T}x(t_0 - t_p) \tag{3}$$

$$Ty(t_0) = Ty(t_p) + \dot{T}y(t_0 - t_p) \tag{4}$$

$$Tz(t_0) = Tz(t_p) + \dot{T}z(t_0 - t_p) \tag{5}$$

$$D(t_0) = D(t_p) + \dot{D}(t_0 - t_p) \tag{6}$$

$$Rx(t_0) = Rx(t_p) + \dot{R}x(t_0 - t_p) \tag{7}$$

$$Ry(t_0) = Ry(t_p) + \dot{R}y(t_0 - t_p) \tag{8}$$

$$Rz(t_0) = Rz(t_p) + \dot{R}z(t_0 - t_p) \tag{9}$$

A Tabela 1 contém os novos parâmetros de transformação empregados pelo IBGE-PPP desde 17/05/2020 para mudança de referencial das coordenadas obtidas no PPP com uso das efemérides precisas disponibilizadas pelo NRCan (*Natural Resources Canada*) ou IGS para a realização SIRGAS2000.

Tabela 1 - Parâmetros de transformação utilizados pelo IBGE-PPP. Em que: ppb – parte por bilhão.

| Parâmetros               | Tx (mm) | Ty (mm) | Tz (mm) | Escala (ppb) | Rx (mas) | Ry (mas) | Rz (mas) |
|--------------------------|---------|---------|---------|--------------|----------|----------|----------|
| ITRF(IGb00) → SIRGAS2000 | -1,4    | - 2,5   | 0,4     | - 0,46       | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| ITRF(IGS05) → SIRGAS2000 | - 0,8   | - 3,9   | - 6,1   | - 0,18       | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| ITRF(IGS08) → SIRGAS2000 | -3,4    | - 4,8   | - 8,6   | 1,62         | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| ITRF(IGb08) → SIRGAS2000 | - 3,4   | - 5,4   | - 8,8   | 1,57         | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| ITRF(IGS14) → SIRGAS2000 | - 2,6   | - 3,2   | - 4,2   | 1,22         | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| ITRF(IGb14) → SIRGAS2000 | - 2,7   | - 2,5   | - 4,2   | 1,20         | 0,00     | 0,00     | 0,00     |

Fonte: IBGE-PPP (2020).

A Tabela 2 contém os parâmetros de transformação entre as diferentes realizações ITRF do ITRS.

Tabela 2 - Parâmetros de transformação entre as realizações ITRF do ITRS.

| Parâmetros          | Tx (mm)             | Ty (mm)             | Tz (mm)             | Escala              | Rx (mas)             | Ry (mas)             | Rz (mas)             | Época (tp) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| Variações Temporais | $\dot{T}x$ (mm/ano) | $\dot{T}y$ (mm/ano) | $\dot{T}z$ (mm/ano) | $\dot{D}$ (ppb/ano) | $\dot{R}x$ (mas/ano) | $\dot{R}y$ (mas/ano) | $\dot{R}z$ (mas/ano) |            |
| ITRF2014 → ITRF2008 | 1,6                 | 1,9                 | 2,4                 | -0,02               | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2010,0     |
| ITRF2014 → ITRF2005 | 0,0                 | 0,0                 | -0,1                | 0,03                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |
| ITRF2014 → ITRF2000 | 2,6                 | 1,0                 | -2,3                | 0,92                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2010,0     |
| ITRF2014 → ITRF2000 | 0,3                 | 0,0                 | -0,1                | 0,03                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |
| ITRF2014 → ITRF2000 | 0,7                 | 1,2                 | -26,1               | 2,12                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2010,0     |
| ITRF2008 → ITRF2005 | 0,1                 | 0,1                 | -1,9                | 0,11                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |
| ITRF2008 → ITRF2000 | -2,0                | -0,9                | -4,7                | 0,94                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2000,0     |
| ITRF2008 → ITRF2000 | 0,3                 | 0,0                 | 0,0                 | 0,00                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |
| ITRF2008 → ITRF2000 | -1,9                | -1,7                | -10,5               | 1,34                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2000,0     |
| ITRF2005 → ITRF2000 | 0,1                 | 0,1                 | -1,8                | 0,08                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |
| ITRF2005 → ITRF2000 | 0,1                 | -0,8                | -5,8                | 0,40                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 2000,0     |
| ITRF2005 → ITRF2000 | -0,2                | 0,1                 | -1,8                | 0,08                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |            |

Fonte: IGN (2020).

Após a mudança de referencial geodésico das coordenadas ter sido realizada é necessário obter as velocidades dos pontos para que as coordenadas possam ser atualizadas da época ( $t_o$ ) para ( $t_d$ ). Para isso, pode-se empregar os *grids* dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017. Na seção 3.1, são descritas as etapas envolvidas nessa determinação.

### 3.1 Cálculo das velocidades com base nos *grids* dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017

A obtenção das velocidades dos pontos de interesse com uso dos *grids* VEMOS2009 e VEMOS2017 foi realizada por meio do método de interpolação ponderado pelo inverso da distância - IDW (*Inverse Distance Weighted*) (MIRANDA, 2005; PROL et al, 2014). O processo se iniciou com a conversão das coordenadas cartesianas geocêntricas para geodésicas - latitude ( $\varphi$ ) e longitude ( $\lambda$ ) - dos pontos fornecidos pelo usuário. A partir dos valores inteiros dessas coordenadas foi gerada uma quadrícula 1°x 1° e efetuou-se a busca desses valores no arquivo dos *grids* dos modelos que contém as coordenadas e as velocidades  $V_\varphi$  (para latitude) e  $V_\lambda$  (para longitude). Para cada par de coordenadas dos vértices dessa quadrícula (P1, P2, P3, P4) realiza-se uma

procura destes valores no *grids* dos modelos, por comparação de valores posicionais, para que sejam obtidas as velocidades desses vértices. Porém, há casos onde não são localizados os quatro pontos da quadrícula no *grid*, mas este fato é considerado no cálculo das velocidades.

Após as componentes do vetor velocidade ( $V_\varphi, V_\lambda$ ) dos pontos da quadrícula terem sido localizadas e extraídas dos *grids* realiza-se a conversão destas para velocidades cartesianas ( $V_x, V_y, V_z$ ) com emprego da Eq. (10) (COX; HART, 1986):

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\text{sen } \varphi \cdot \cos \lambda & -\text{sen } \lambda & -\cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ -\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \lambda & \cos \lambda & -\cos \varphi \cdot \text{sen } \lambda \\ \cos \varphi & 0 & -\text{sen } \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_\varphi \\ V_\lambda \\ 0 \end{pmatrix} \tag{10}$$

onde  $\varphi$  e  $\lambda$  são as coordenadas latitude e longitude dos pontos da quadrícula.

A conversão dos pontos da quadrícula para cartesianas geocêntricas considerando as altitudes elipsoidais iguais a zero é realizada após cálculo das velocidades cartesianas na Eq. (10). A partir dessas coordenadas as distâncias espaciais de cada ponto localizado no *grids* VEMOS2009 ou VEMOS2017 ao ponto de interesse foram calculadas com uso da Eq. (11).

$$d_i = \sqrt{(X_i - X_{p \text{ int}})^2 + (Y_i - Y_{p \text{ int}})^2 + (Z_i - Z_{p \text{ int}})^2} \tag{11}$$

Em que:  $d_i$ :distância espacial;  $X_i, Y_i, Z_i$ : coordenadas cartesianas geocêntricas dos pontos da quadrícula que contém o ponto de interesse;  $X_{p \text{ int}}, Y_{p \text{ int}}, Z_{p \text{ int}}$ : coordenadas cartesianas geocêntricas do ponto de interesse.

A interpolação das velocidades cartesianas para os pontos de interesses foi realizada com uso do método IDW por meio das Eq. (12) a (14) (MIRANDA, 2005; PROL et al, 2014):

$$V_{x_{p \text{ int}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} V_{x_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \tag{12}$$

$$V_{y_{p \text{ int}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} V_{y_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \tag{13}$$

$$V_{z_{p \text{ int}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} V_{z_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \tag{14}$$

Onde o índice  $i$  varia de 1 até  $n$ , sendo  $n$  o número de pontos localizados da quadrícula de  $1^\circ \times 1^\circ$  nos *grids* VEMOS2009 e VEMOS2017.

Após obtenção das velocidades cartesianas dos pontos de interesse com uso das Eq. (12) a (14) efetua-se a mudança de seu referencial, atrelado a cada modelo, para o referencial das coordenadas de origem. As velocidades obtidas desse modo são inseridas na tabela de entrada do programa MRefGeo.

Segundo SIRGAS (2020 a), a atualização das coordenadas cartesianas dos pontos é realizada com emprego das Eq. (15) a (17):

$$x(t_d) = x(t_0) + V_x(t_d - t_0) \tag{15}$$

$$y(t_d) = y(t_0) + V_y(t_d - t_0) \tag{16}$$

$$z(t_d) = z(t_0) + V_z(t_d - t_0) \tag{17}$$

Em que:  $t_d$  é a época de destino (interesse) das coordenadas e  $V_x, V_y, V_z$  são as velocidades cartesianas.

Cabe ressaltar que as coordenadas e velocidades presentes nas Eq. (15) a (17) deverão estar no mesmo referencial.

A Figura 3 ilustra as etapas seguidas no processo de cálculo das velocidades cartesianas dos pontos de interesse com uso dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2007 implementadas no MRefGeo.



#### 4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos resultados fornecido pelo MRefGeo foi realizado com base no cálculo das diferenças (erros) em termos lineares (metros) e absolutos, para as componentes latitude, longitude e altitude elipsoidal de um vetor posição (TORGE, 2001; FERREIRA; CARVALHO, 2018) dadas pelas Eq. (18) a (20):

$$\Delta\varphi(m) = \left| \frac{\pi(\varphi_{(est.)} - \varphi_{(ref.)})}{180} \right| \cdot \frac{a(1 - e^2)}{\left( 1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{\varphi_{(est.)} + \varphi_{(ref.)}}{2} \right) \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

$$\Delta\lambda(m) = \left| \frac{\pi(\lambda_{(est.)} - \lambda_{(ref.)})}{180} \right| \cdot \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{\varphi_{(est.)} + \varphi_{(ref.)}}{2} \right)}} \operatorname{Cos} \left( \frac{\varphi_{(est.)} + \varphi_{(ref.)}}{2} \right) \quad (19)$$

$$\Delta h(m) = |h_{(est.)} - h_{(ref.)}| \quad (20)$$

Em que:  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta h$ : diferenças (erros) entre as coordenadas estimadas  $\varphi_{(est.)}$ ,  $\lambda_{(est.)}$ ,  $h_{(est.)}$  e as de referência  $\varphi_{(ref.)}$ ,  $\lambda_{(ref.)}$ ,  $h_{(ref.)}$  das componentes posicionais latitude, longitude e altitude elipsoidal;  $a$ : semieixo maior do elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*);  $e^2$ : primeira excentricidade ao quadrado.

As resultantes planimétricas (RP) e tridimensional (R3D) dadas pelas Eq. (21) e (22) são resultados da combinação os erros em latitude, longitude e altitude elipsoidal fornecidos pelas Eq. (18), (19) e (20).

$$RP = \sqrt{\Delta\varphi(m)^2 + \Delta\lambda(m)^2} \quad (21)$$

$$R3D = \sqrt{\Delta\varphi(m)^2 + \Delta\lambda(m)^2 + \Delta h^2} \quad (22)$$

A Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) ou RMSE (*Root Mean Square Error*) para as componentes posicionais latitude, longitude, altitude elipsoidal e a resultante planimétrica foi calculada com uso das Eq. (23) a (26).

$$REMQ_{\Delta\varphi} = RMSE_{\Delta\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta\varphi^2}{N}} \quad (23)$$

$$REMQ_{\Delta\lambda} = RMSE_{\Delta\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta\lambda^2}{N}} \quad (24)$$

$$REMQ_{\Delta h} = RMSE_{\Delta h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta h^2}{N}} \quad (25)$$

$$REMQ_{RP} = RMSE_{RP} = \sqrt{REMQ_{\varphi}^2 + REMQ_{\lambda}^2} \quad (26)$$

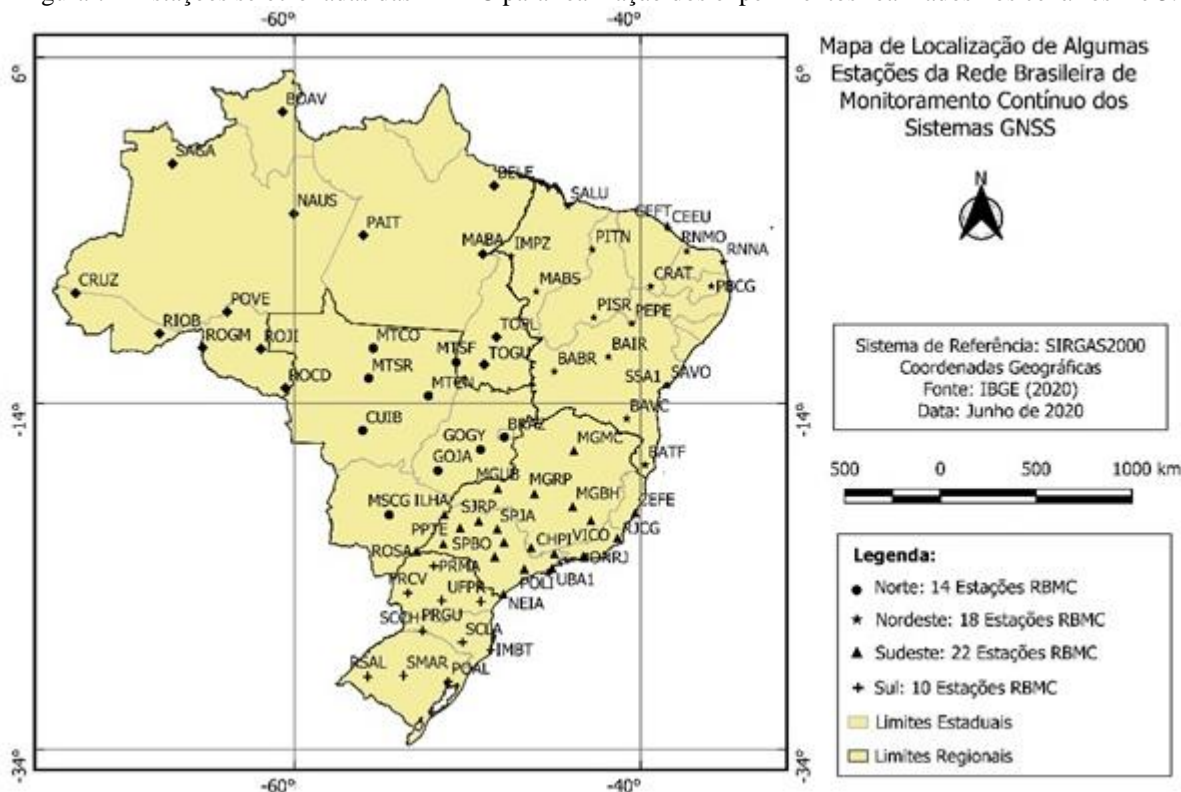
Em que:  $N$  representa o número de estações.

#### 5 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação inicial dos resultados fornecidos pelo programa MRefGeo foi efetuada com base em experimentos em três cenários.

O cenário 1 consistiu na comparação das velocidades cartesianas ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ) obtidas, com uso dos aplicativos VMS2009 (VEMOS2009) e MRefGeo para 76 estações pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) do total de 124 disponíveis em 05/02/2020, conforme (RBMC, 2020). As estações selecionadas integraram a solução multianual SIR15P01 do SIRGAS e podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 – Estações selecionadas das RBMC para realização dos experimentos realizados nos cenários 1 e 3.



Fonte: os autores (2022).

Nesse cenário, as coordenadas dos 76 pontos supracitados, em SIRGAS2000 (época 2000,4) foram consideradas no MRefGeo como se estivessem vinculadas ao ITRF2005 (época 2000,4) para que fosse realizado apenas o cálculo, por interpolação, das velocidades dos pontos de interesse e, deste modo, eliminar a necessidade da mudança de referencial geodésico das velocidades. É importante frisar que o VMS2009 apenas interpola as velocidades para os pontos de interesse e o MRefGeo além disso, efetua a mudança de referencial dessas para o referencial das coordenadas dos pontos de interesse.

A partir das velocidades cartesianas das 76 estações obtidas com uso dos programas MRefGeo e VMS2009 e do *grid* VEMOS2009 (ITRF2005) foi calculado a diferença entre elas. O valor médio das diferenças para cada componente ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) e REQM das diferenças foram iguais a zero. Embora mais testes devam ser realizados, já é um indício da concordância das velocidades dos pontos obtidos por meio dos dois programas.

Para o caso onde foi considerado as coordenadas dos pontos na realização correta, SIRGAS2000 (época 2000,4), para o cálculo das velocidades, o resultado final destas no programa MRefGeo estará vinculado a esta realização. Para fins de comparação, as diferenças entre as velocidades obtidas neste procedimento com as determinadas com uso do VMS2009 foram calculadas para as mesmas estações e foram encontrados em termos médios, para ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ), os valores -0,0001 m/ano, 0,0003 m/ano e 0,0019 m/ano, respectivamente. O vetor velocidade médio foi igual a 0,002 m/ano.

Para o intervalo de tempo entre a data da realização do referencial e a data de coleta de dados, 21 anos por exemplo, implicará em termos médios, no acréscimo ou decréscimo nas coordenadas cartesianas de -0,002 m, 0,005 m e 0,040 m. Para esse intervalo de tempo, isso representa um deslocamento médio tridimensional de 0,041 m.

No cenário 2 foram realizadas comparações dos resultados obtidos com o emprego do IBGE-PPP no processamento dos dados GPS/GNSS coletados na estação BRAZ da RBMC nos dias do ano 138 de 2005 (IGb00, época 2005,4), 138 de 2010 (IGS05, época 2010,4), 138 de 2012 (IGS08, época 2012,4), 138 de 2015 (IGb08, época 2015,4), 137 de 2019 (IGS14, época 2019,4), e 138 de 2020 (IGb14, época 2020,4). Vale salientar que os dados foram submetidos para processamento em 25/05/2020, época em que o IBGE-PPP já empregava os novos parâmetros (IBGE, 2020). Este serviço fornece as coordenadas cartesianas dos pontos nos referenciais das efemérides precisas e SIRGAS2000 na época da coleta dos dados e em SIRGAS2000 (época

2000,4) - atualizadas com uso do VEMOS2009 (IBGE, 2017). Salienta-se que os dados GPS/GNSS da estação BRAZ foram obtidos nos ftp's do IBGE e do CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*) (IBGE, 2020; CDDIS, 2020).

As coordenadas cartesianas dessa estação no referencial das efemérides precisas e época da coleta dos dados foram transformadas e atualizadas com uso do MRefGeo para o SIRGAS2000 (época da coleta dos dados) e para o SIRGAS2000 (época 2000,4) com uso do *grid* VEMOS2009. Desse modo, foi possível verificar as diferenças posicionais encontradas com a mudança de referencial (IGb00, IGS05, IGS08, IGB08, IGS14 e IGB14 para o SIRGAS2000) e com a atualização das coordenadas para a época 2000,4 proporcionadas pelo IBGE-PPP e pelo MRefGeo. Portanto, neste cenário foi possível validar os resultados proporcionados pelo programa desenvolvido na mudança de referencial de diferentes realizações IGS para o SIRGAS2000 na época da coleta dos dados e na época 2000,4.

Na mudança de referencial das várias realizações ITRF/IGS para o SIRGAS2000, ambas na época da coleta dos dados, os valores fornecidos pelo MRefGeo foram confrontados com os disponibilizados pelo IBGE-PPP encontrando-se valores para a REMQ para latitude, longitude, altitude elipsoidal, resultantes planimétrica e tridimensional foram, respectivamente, de 0,000039 m, 0,000049 m, 0,000046 m, 0,000063 m e 0,000079 m. Pode-se, observa-se o alto grau de concordância entre os resultados da mudança de referencial das coordenadas. Vale salientar que o número de casas decimais utilizados foi proposital para que seja possível avaliar as diferenças encontradas, pois caso fosse empregado três casas decimais, todos os valores seriam iguais a zero.

Para verificar o efeito do deslocamento da estação no tempo foi realizado a atualização das coordenadas das diferentes épocas de coleta dos dados para a época 2000,4, salientando-se que o MRefGeo interpola as velocidades do ponto de interesse e muda o referencial de ITRF2005 para SIRGAS2000, com base nos parâmetros disponibilizados pelo IERS/IGN. A comparação direta entre as coordenadas geodésicas SIRGAS2000 (época 2000,4) proporcionou valores da REMQ para latitude, longitude, altitude elipsoidal, resultantes planimétrica e tridimensional, respectivamente, iguais a 0,004804 m, 0,001694 m, 0,004644 m, 0,005094 m e 0,006893 m. Testes adicionais devem ser realizados, mas os resultados preliminares, com base nas métricas utilizadas para avaliação da acurácia posicional, evidenciam a concordância dos resultados encontrados.

A Tabela 3 fornece as discrepâncias posicionais e resultantes planimétrica e tridimensional das coordenadas SIRGAS2000 (época 2000,4) obtidas com uso do IBGE-PPP e MRefGeo.

Tabela 3 – Discrepâncias posicionais das coordenadas na estação BRAZ.

| Transformação      | $\Delta\varphi$ (m) | $\Delta\lambda$ (m) | $\Delta h$ (m) | RP (m) | R3D (m) |
|--------------------|---------------------|---------------------|----------------|--------|---------|
| IGb00 → SIRGAS2000 | 0,010               | 0,002               | 0,000          | 0,011  | 0,011   |
| IGS05 → SIRGAS2000 | 0,001               | 0,001               | 0,003          | 0,004  | 0,004   |
| IGS08 → SIRGAS2000 | 0,002               | 0,002               | 0,006          | 0,006  | 0,006   |
| IGb08 → SIRGAS2000 | 0,003               | 0,002               | 0,002          | 0,004  | 0,004   |
| IGS14 → SIRGAS2000 | 0,002               | 0,002               | 0,009          | 0,010  | 0,010   |
| IGb14 → SIRGAS2000 | 0,003               | 0,001               | 0,009          | 0,010  | 0,010   |

Fonte: os autores (2022).

Pode-se observar na Tabela 3 que com exceção da diferença encontrada para componente latitude de 0,010491 m na transformação do IGB00 (2005,4) para SIRGAS2000 (época 2000,4), todas as demais foram subcentimétricas.

Os resultados obtidos neste experimento são indicativos de que as diferenças encontradas nas coordenadas dos pontos se dão basicamente em função do cálculo da velocidade da estação, com inclusão de mudança de referencial destas, pois não foram detectadas discrepâncias significativas com mudança de referencial das coordenadas.

Este fato, pode ser verificado ao se considerar no MRefGeo as velocidades fornecidas pelo usuário, obtidas com VMS2009, na transformação do IGB00 (2005,4) para SIRGAS2000 (época 2000,4). Comparando os resultados deste procedimento com as coordenadas disponíveis no descritivo da estação, obteve-se discrepâncias de 0,002678 m, 0,003274 m e 0,003621 m, para latitude, longitude e altitude elipsoidal, respectivamente. Para as transformações de IGS14 e IGB14 para SIRGAS2000, sem a mudança de referencial das velocidades do ITRF2005 para IGS14 e IGB14, as diferenças para as componentes latitude, longitude e

altitude elipsoidal são, respectivamente, iguais a 0,000868 m, 0,003398 m, 0,000529 m e 0,000061 m, 0,002170 m e 0,000649 m.

Com base nos dados apresentados fica evidente, portanto, a influência do referencial das velocidades na determinação final das coordenadas. Desde modo, vislumbra-se a necessidade nas próximas versões do MRefGeo incluir opção do emprego dos parâmetros do IBGE-PPP e dos modelos VEMOS2009 (ITRF2005) e VEMOS2017 (ITRF2014) sem realizar a mudança de referencial das velocidades interpoladas para o referencial de origem das coordenadas de entrada no aplicativo ou implementar outra forma de considerar o deslocamento da estação no tempo.

No cenário 3 foram empregadas as coordenadas SIRGAS2000/ITRF2000 (época 2000,4) das 76 estações presentes na Figura 7 e de suas velocidades obtidas com uso do *grid* VEMOS2009 implementado no MRefGeo, pois o aplicativo on-line utilizado na validação não possui modelo de velocidade disponível para este fim. Essas coordenadas foram transformadas e atualizadas para o ITRF2005, ITRF2008 e ITRF2014 (da época 2000,4 para a época 2020,4) com uso do MRefGeo e da ferramenta para uso on-line disponível em EPN (2020) e para validação dos resultados proporcionados pelo MRefGeo nestas operações. Neste cenário foram utilizados os parâmetros para mudança de referencial disponibilizados pelo IERS/IGN, pois além de ser uma opção do programa desenvolvido, a ferramenta on-line faz uso desses parâmetros.

Na transformação de ITRF2000 (época 2000,4) para ITRF2005 (época 2020,4) foram encontrados valores da REMQ de 0,00064 m, 0,00004 m, 0,00029 m, 0,00064 m e 0,000706 m, respectivamente, para latitude, longitude, altitude elipsoidal, resultante horizontal e tridimensional. A REMQ do vetor velocidade foi igual a 0,000003 m/a. Para a transformação de ITRF2000 (época 2000,4) para ITRF2008 (época 2020,4) foram obtidos valores da REMQ de 0,00062 m, 0,00006 m, 0,00036 m, 0,00063 m e 0,000722 m, respectivamente, para latitude, longitude, altitude elipsoidal, resultante horizontal e tridimensional. A REMQ do vetor velocidade foi igual a 0,000003 m/a. Na transformação de ITRF2000 (época 2000,4) para ITRF2014 (época 2020,4) foram encontrados valores da REMQ de 0,00065 m, 0,00007 m, 0,00042 m, 0,00066 m e 0,00078 m, respectivamente, para latitude, longitude, altitude elipsoidal, resultante horizontal e tridimensional. A REMQ do vetor velocidade foi igual a 0,000005 m/a.

Os resultados apresentados evidenciam o alto grau de concordância dos valores obtidos com uso dos dois programas e aponta para robustez e confiabilidade do MRefGeo nestas operações. Vale salientar também que foram efetuados outros testes de transformações como de ITRF2005 para ITRF2008 e para ITRF2014; de ITRF2008 para ITRF2014 sendo os resultados encontrados similares aos apresentados.

A principal diferença entre estes programas é que no MRefGeo além do usuário ter a possibilidade de entrar com as velocidades dos pontos para atualização das coordenadas pode também escolher modelos de velocidade baseados em *grids* para a área de abrangência do SIRGAS. Portanto, é possível empregar o MRefGeo nestas operações de compatibilização de referencial geodésico (coordenadas e velocidades) para obtenção posicional em SIRGAS2000/ITRF2000 (época 2000,4).

Os experimentos realizados nos cenários 1, 2 e 3 possibilitaram a validação das principais transformações e cálculos de velocidades fornecidos pelo MRefGeo com uso dos parâmetros empregados pelo IBGE-PPP e IERS/IGN bem como dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017. Devido ao grau de concordância posicional obtido com os resultados disponibilizados pelo IBGE-PPP e WEB ETRF/ITRF *Transformation*, o programa desenvolvido mostra-se uma ferramenta importante na automatização de procedimentos de mudança de referencial e atualização de coordenadas. Além disso, fornece os valores intermediários das operações em forma de passo a passo na determinação das coordenadas na realização SIRGAS2000 (época 2000,4) do SIRGAS a partir das coordenadas obtidas com uso de diferentes serviços de pós-processamento de dados GNSS.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O MRefGeo possibilitou automatizar os procedimentos envolvidos no cálculo das velocidades com uso de *grids* de velocidades do VEMOS dos pontos de interesse, na mudança de referencial das coordenadas e velocidades e na atualização das coordenadas.

Os resultados das transformações e atualizações foram validados com diferentes soluções/serviços

consolidados (IBGE-PPP e WEB ETRF/ITRF Transformation) disponíveis na internet. Pode-se observar com base nos valores posicionais obtidos nos experimentos realizados em três diferentes cenários, o alto grau de concordância dos resultados proporcionados pelo MRefGeo com os serviços/ferramentas em uso.

O MRefGeo possibilita ao usuário a seleção dos parâmetros IBGE-PPP ou IERS/IGN para mudança de referencial das coordenadas e velocidades, bem como inserir as velocidades determinadas a priori ou calculá-las com base nos grids VEMOS2009 e VEMOS2017. Portanto, abre-se um leque de aplicações e possibilidades para o usuário pois possibilita o emprego de diferentes serviços disponíveis on-line no processamento GNSS e na determinação das coordenadas no SIRGAS2000 (época 2000,4), o qual é o referencial geodésico oficial adotado no Brasil tanto para cartografia quanto para levantamentos geodésicos. Além de disponibilizar os resultados na tabela do programa e possibilitar salvá-los em um arquivo em formato de texto, permite a geração de relatório contendo os resultados de todas as etapas realizadas internamente pelo software de forma que o usuário saiba o que está ocorrendo internamente e compreenda o processo realizado de modo a aprender com o mesmo. Vislumbra-se, portanto, o MRefGeo como ferramenta didática no auxílio aos diferentes usuários nos procedimentos de mudança de referencial e cálculo das velocidades dos pontos.

Salienta-se a necessidade de realizar mais testes para o cálculo das velocidades por meio dos *grids* dos modelos VEMOS, com emprego de mais estações, de modo a verificar a existência de inconsistências e a necessidade de inserção de mais restrições nos algoritmos de interpolação de forma a obter resultados mais robustos.

Recomenda-se para trabalhos futuros a implementação de novas ferramentas no MRefGeo para que o usuário possa inserir novos parâmetros de transformação para mudança de referencial geodésico e modelos velocidade.

Sugere-se também a implementação de funções com critérios e métodos diferentes para interpolação das velocidades cartesianas para os pontos de interesse, como por exemplo, estabelecer um raio a partir do ponto de interesse para o qual todas as estações dentro do círculo criado contribua no cálculo das velocidades; e a verificação da possibilidade de integrar *grids* dos modelos supracitados com as velocidades das estações provenientes de soluções multianuais e realizar, por meio de propagação de covariância, a estimação das incertezas associadas a cada velocidade obtida no processo de interpolação e mudança de referencial.

Por fim, com os resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que o programa MRefGeo possibilita realizar os cálculos referentes a atualização e mudança de coordenadas no posicionamento geodésico de forma robusta, já que sua comparação com a aplicação de programas consolidados como o WEB ETRF/ITRF e o IBGE-PPP não apresentou discrepâncias significativas e/ou quando apresentadas, foram subcentimétricas.

## Agradecimentos

À Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pela oportunidade de poder desenvolver este trabalho no âmbito do programa institucional de Voluntariado de Iniciação Científica (VIC/UFJF).

## Contribuição dos Autores

A conceptualização foi realizada pelo segundo autor, sendo o primeiro autor responsável pela curadoria dos dados, investigação, metodologia, elaboração do aplicativo, validação, bem como a redação (minuta inicial e edição). O Segundo autor foi responsável pela análise formal e supervisão do projeto.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

## Referências

ALBAYRAK, M; ERDOĞAN, B.; ERKAYA, H. Performance analysis of web-based relative and precise point positioning techniques with different satellite visibility conditions. **Bulletin of Geodetic Sciences**, Curitiba, v. 26, n.1, p. 1-17, 2020.

- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; LEGRAND, J.; GARAYT, B.; BOUCHER, C. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**. v. 112, B09401, p. 1-19, 2007.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L. ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference frame. **Journal of Geodesy**, v. 85, n. 8, p. 457-473, 2011.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear stations motions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, issue 8, p. 6109-6131, 2016.
- CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; GRIPP JÚNIOR, J.; LAROCCA, A. P. C.; KRUEGER, C. P. Sistematização das etapas para determinação posicional em SIRGAS2000 com a base nas coordenadas ITRF (IGb08) obtidas por serviço PPP on-line. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n.1, p 43-58, 2014.
- CRUSTAL DYNAMICS DATA INFORMATION SYSTEM (CDDIS). **Daily 30-second data**. 2020. Disponível em: < [https://cddis.nasa.gov/Data\\_and\\_Derived\\_Products/GNSS/daily\\_30second\\_data.html](https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/daily_30second_data.html)> Acesso em: 01 maio 2020.
- COX, A.; HART, R. B. **Plate Tectonics: How It Works**. 1 edition. Wiley-Blackwell, 1986.
- DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: KENYON S.; PACINO M.; MARTI U. (eds). **Geodesy for Planet Earth**. International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin, v. 136, p. 657-664, 2012.
- DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. **Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017**. 2020. DOI. 10.1594/PANGAEA.912350.
- EUREF PERMANENT NETWORK (EPN). **ETRF/ITRF Transformation**. 2020. Disponível em <[http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coord\\_trans/](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/)>. Acesso em: 07 jun. 2020.
- FERREIRA, R; CARVALHO, A. S. Implantação de Estrutura Geodésica para Apoio Topográfico no Campus da Universidade Federal de Juiz de Fora. Conferência Nacional de Cartografia e Geodésia – CNCG. Informação Geoespacial na Era 4.0 para um planeta em Mudança. IX, 2018, Academia Militar – Aquartelamento da Amadora – Portugal. **Comunicações**. Disponível em < [https://www.cncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cncg\\_2019\\_1\\_2\\_3.pdf](https://www.cncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cncg_2019_1_2_3.pdf) > Acesso em: 01 maio 2020.
- GUO, Q. Precision comparison and analysis of four on-line free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. **GPS Solutions**, v. 19, n. 4, p. 537-544, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. 2020. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e> > Acesso em: 01 junho 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Resolução da Presidente do IBGE Nº 1/2015**. 2015. Disponível em:< [ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/rpr\\_01\\_2015\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf)>. Acesso em: 03 maio de 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual do Usuário – Aplicativo On-line IBGE-PPP**, versão: abril de 2017. Disponível em:< <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualização/livros/liv101677.pdf> >. Acesso em: 14 junho 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Serviço on-line para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP**. 2020. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-on-line-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-geociencias>> Acesso em: 03 junho. 2020.
- INTERNATIONAL GNSS SERVICE - ANALYSIS CENTER COORDINATOR (IGS-ACC). **Chronology**

- of IGS Reference Frame Usage.** 2020. Disponível em: <<http://acc.igs.org/igs-frames.html>> Acesso: 01 jun. 2020.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **Transformation parameters.** 2020. Disponível em: <[http://itrf.ensg.ign.fr/trans\\_para.php](http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php)> Acesso: 01 junho 2020.
- MACIUK, K; SKORUPA, B. Test of GNSS on-line 98 servisse PPP kinematic solutions. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 11, n. 3, p. 97-105, 2017. DOI: 10.7494/geom.2017.11.3.97.
- MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.
- MARQUES, H, A; VANI, B.; OYAMA, R.; MONICO, J.F.G. **Software RT\_PPP -PPP On-line: Descrição e Manual de Uso.** 2015. Disponível em: <[https://ismrquerytool.fct.unesp.br/ppp/manual/Manual\\_RTPPP\\_2015-08.pdf](https://ismrquerytool.fct.unesp.br/ppp/manual/Manual_RTPPP_2015-08.pdf)>. 2015. Acesso em: 16 jun. 2021.
- PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010).** IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.
- OLIVEIRA, T, N. Automação do processo de mudança de referencial e atualização ou redução de coordenadas no posicionamento geodésico. **Relatório de Iniciação Científica.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.
- OZULU, I, M; EROL, V.I; ALKAN, R.M. Kinematic PPP Positioning Using Different Processing Platforms. IN: FIG CONGRESS XXVI, 2018. **Proceedings...** Istanbul, Turkey, 2018.
- PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, F. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 3, p. 569-579, 2014.
- REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS (RBMC). **RBMC.** 2020. Disponível em: <[https://geofitp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC\\_2020.pdf](https://geofitp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC_2020.pdf)>. Acesso em: 07 jun. 2020.
- REBISCHUNG, P. [IGSMail-7921] SWITCH TO IGb14 REFERENCE FRAME. 2020. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>>. Acesso em: 07 jun. 2020.
- SÁNCHEZ L.; DREWES, H. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America. **International Association of Geodesy Symposia Series**, v. 152, 2020. DOI. 10.1007/1345\_2020\_91.
- SISTEMA DE REFERÊNCIA GEODÉSICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Uso de velocidades no processamento de dados GNSS.** 2020. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/using-velocities-gnss/>> Acesso em: 07 jun. 2020.
- SOLER, T.; MARSHALL, J. A note on frame transformations with applications to geodetic datums. **GPS Solutions**, v. 7, p. 23-32, 2003.
- TORGE, W. **Geodesy.** 3ª ed. Berlin, New York: Gruyter, 2001.
- TARIQ, M; HADI, A; HAFEDH, H. Accuracy Assessment of Different GNSS Processing Software. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research**, v. 3, n. 10, pp. 469 – 478. 2017.

## Biografia do autor principal



Taynara Nascimento de Oliveira nasceu em Lima Duarte, Minas Gerais, em 1995. Graduada em Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, participou do Crea Jr-MG Núcleo Juiz de Fora por 2 anos e 9 meses. Atualmente é estagiária de engenharia civil na área de obras e integrante da LABIM (Liga Acadêmica de *Building Information Modeling* e Novas Tecnologias) da UFJF como Projetista e Assessora de Comunicação e Marketing.



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