

ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA ENTRE O ITRF2014 E O SIR15P01

W.O. Chaves¹, J.F.G. Monico²

¹Universidade Estadual Paulista, UNESP, Brasil

²Departamento de Cartografia, UNESP, Brasil

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

Neste trabalho, busca-se apresentar uma revisão bibliográfica do sistema de referência vinculado ao IERS (International Earth Rotation and Reference System Service), o ITRF (International Terrestrial Reference Frame), mais especificamente em sua última realização, o ITRF2014, bem como uma apresentação e descrição da última densificação do ITRF na América do Sul, o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), em sua realização, o SIR15P01. Após a descrição dos referenciais, uma análise para verificar a consistência entre tais realizações será efetuada. Nesta análise, 58 estações GNSS (Global Navigation Satellite System) distribuídas na América do Sul comuns aos dois sistemas de referência foram utilizadas. Para as análises, as coordenadas, precisões e velocidades das estações foram compatibilizadas. Ao realizar tais comparativos, serão apresentados resultados que mostram que tais referenciais estão compatíveis em média ao nível centimétrico em termos de discrepâncias e milimétrico em relação às precisões das coordenadas em cada realização. Adicionalmente, gráficos e mapas exemplificarão a alta compatibilidade e constatará que regiões com atividades sísmicas, como estações localizadas próximas a cordilheira dos Andes, apresentam as maiores discrepâncias. Estas análises mostram o grande avanço na qualidade de redes geodésicas regionais, e um critério de avaliação de redes de referência nacionais e regionais, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

Palavras chave: ITRF, SIRGAS, IERS, Transformação de Helmert.

ABSTRACT

In this work, it seeks to present a bibliographical review of the reference system linked to the IERS (International Earth Rotation Service and Reference System), ITRF (International Terrestrial Reference Frame), and more specifically in its last realization, ITRF2014, as well as a presentation and description of the latest ITRF densification in South America, SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas), in its realization SIR15P01. After a description of the references, an analysis to verify the consistency between such achievements will be performed. In this analysis, 58 GNSS stations (Global Navigation Satellite System) distributed in South America, in two reference systems, were used. For the analyzes, the coordinates, accuracies and speeds of the stations were compatible. In making such comparisons, it will be presented results that show that such references are compatible in average at the centimeter level, in terms of discrepancies and millimeters in terms of precision of the coordinates in each realization. In addition, graphs and maps exemplify the high compatibility and observing the regions with seismic activities, such as stations located in the vicinity of a mountain range of the Andes, presented greater discrepancies. These verifications show the great progress in the quality of regional geodesic networks, and show a criterion of evaluation of reference and regional networks, such as a Brazilian Network of Continuous Monitoring (RBMC).

Keywords: ITRF, SIRGAS, IERS, Transformation of Helmert.

1- INTRODUÇÃO

Um sistema geodésico de referência é caracterizado a partir de três etapas: definição, realização e distribuição. A definição consiste na especificação dos parâmetros necessários para implantação de um sistema de referência, como origem, escala e orientação. A materialização do sistema de referência geodésico consiste na coleta de observações sobre a superfície terrestre. Por fim a distribuição visa fornecer uma lista de coordenadas de estações e respectivas velocidades, obtidas após o processamento das observações de estações sob a superfície terrestre.

Os sistemas de referencia são necessários para as diversas aplicações que requerem a posição como elemento central, tais como trabalhos de engenharia, mapeamento, serviços topográficos e a própria vida cotidiana, onde a localização de lugares e objetos se torna cada vez mais imprescindível. Os sistemas de referência modernos, sobretudo após o advento da geodésia espacial, passam a ser globais e geocêntricos. Tais sistemas buscam que os sistemas sejam mais bem definidos e materializados, permitindo que levantamentos sejam referenciados a eles e assim obtenha-se um sistema global e único.

Dentro deste contexto, temos o ITRF (International Terrestrial Reference Frame), sistema materializado, global e geocêntrico, que serve de referência para diversos levantamentos, trabalhos e implantação de outros sistemas geodésicos de referência, de característica continental ou regional. No continente americano temos o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), que funciona como uma densificação do ITRF nas Américas. Este sistema de referência continental serve de base para diversos trabalhos de engenharia, mapeamento, entre outros.

Neste trabalho, busca-se realizar uma análise da consistência entre os sistemas de referência ITRF e SIRGAS, em relação as suas últimas realizações, o ITRF2014 e o SIR15P01. Esta análise se dará em termos de coordenadas e precisões. Para tanto uma compatibilização entre os sistemas será necessário. Ao fim busca-se avaliar a qualidade de um sistema de referência regional ou continental, no caso o SIR15P01, em relação a sua referência global, o ITRF2014.

O trabalho esta organizado da seguinte forma: apresenta-se o ITRF2014 na seção 2 e o SIR15P01 na seção 3. Na seção 4 será apresentado o experimento, onde as estações utilizadas e as formulações matemáticas utilizadas serão descritas. Na seção 5, uma análise da consistência entres os referenciais SIR15P01 e ITRF2014 será feita, e no seção 6, considerações finais serão apresentadas.

2- ITRF2014

O ITRF ((IERS) International Terrestrial Reference Frame), é um conjunto de coordenadas cartesianas tridimensionais que realizam um sistema ideal, o ITRS (International (IERS) Terrestrial Reference System). Este sistema fornece: Coordenadas e velocidades das estações, Parâmetros de Orientação da Terra (EOP), catálogo de estações, número Domes (Directory of MERIT Sites) de cada estação, pontos de conexão entre técnicas (local ties), etc.

Sistemas globais e geocêntricos como ITRF, utilizam-se das técnicas geoespaciais para definirem e materializarem seu sistema. A origem do sistema utiliza-se da técnica VLBI (Very Long Base Line Interferometry), com contribuições das técnicas espaciais GNSS (Global Navigation Satellite System) e Doris (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) para sua obtenção. A escala é obtida a partir de observações SLR (Satellite Laser Ranging), com contribuições de observações VLBI e GNSS. A orientação do sistema de referencia sobre a Terra e também sua evolução temporal não é obtida por nenhuma técnica geoespacial, logo algumas condições são aplicadas durante o processamento (ajustamento) das observações. A condição NNR (Not Net Rotation) é aplicada com relação à orientação do sistema e também com relação a sua evolução temporal.

Desde 1988, o ITRF, sob o auspício do IERS (Internatinal Earth Rotation and Reference Systems Service), obteve varias realizações. A mais atual realização do ITRF é o ITRF2014, que foi divulgado em 2016, com dados observados até 2015 e coincide com o aniversário de 30 anos da primeira combinação de dados geodésicos espaciais para a geração de um TRF (Terrestrial Reference frame), em 1985.

Similarmente as realizações anteriores do ITRF, o ITRF2008 e ITRF2005, esta nova realização foi construída sob a forma de séries temporais de posições de estação, velocidade e EOPs. A partir das soluções fornecidas pelas quatro técnicas espaciais, o IERS, através do IERS-CP (IERS-Product Center), realiza um total reprocessamento e gera uma solução final, onde para a questão de datum tem-se como problema (injunção) a orientação e evolução temporal do sistema.

Pela primeira vez na história do ITRF, o sistema foi gerado com modelagem aprimorada para movimentos não lineares que ocorrem na estação, como movimentos sazonais (anuais e semestrais) e deformação pós-sísmica (PSD).

No ITRF2014, a origem foi definida como translação nula entre o ITRF2014 e a série temporal ILRS na época 2010. A escala foi definida como diferença nula em relação à média das escalas VLBI e

SLR. Para a orientação, foi considerada como inexistente entre o ITRF2014 e ITRF2008, condição esta aplicada a algumas estações. Uma importante observação é que a definição de datum deste sistema, relatada até aqui, nada mais é que a Transformada Generalizada de Helmert.

O ITRF2014 obteve dados desde o início da série de coleta de cada estação até o ano de 2015, sendo que a época de referência para a solução foi o ano de 2010.

3- SIR15P01

O SIRGAS, inicialmente Sistema de Referência Geocêntrico para América do Sul, a partir de 2001 passou a ser o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. Na América do Sul é considerado como densificação regional do ITRF. Sua definição é idêntica ao ITRS. Desde a sua primeira realização, em 1993, varias realizações foram efetuadas, a saber, as realizações SIRGAS95, SIRGAS2000, SIRGAS-CON (C+N).

Assim como o ITRF, as realizações SIRGAS fornecem em suas soluções, coordenadas e suas respectivas velocidades, seja considerando uma série temporal de coordenadas ou considerando modelo de velocidade de natureza contínua, como o VEMOS (Modelo de Velocidade SIRGAS).

A ultima realização do SIRGAS, a rede SIRGAS-CON, com monitoramento contínuo, fornece dois produtos, uma de natureza semanal, onde soluções semanais semi livres, ou seja, fracamente injuncionadas, fornecem coordenadas que serão utilizadas para a realização do segundo produto fornecido, a solução multianual. A solução multianual fornece coordenadas e velocidades visando aplicações práticas e científicas.

A rede SIRGAS-CON-C é uma rede de cobertura continental, e funciona como uma densificação primária do ITRF na América Latina. Esta rede possuiu boa distribuição no continente, em locais estáveis, garantindo estabilidade da rede a longo prazo. As redes SIRGAS-CON-N são redes nacionais, que funcionam como adensamento da rede continental, dando acesso a uma rede de alta qualidade a nível nacional e local.

A última solução multianual SIRGAS é a realização SIR15P01, idealizada depois dos fortes terremotos ocorridos no Chile em 2010. Esta solução buscou além de adensar a rede SIRGAS em vários países, gerar também um novo modelo de velocidade para a América, o VEMOS2015. Esta solução, conta com mais de 400 estações distribuídas nas Américas, aos quais 69 estações pertencem a rede global do IGS (International GNSS Service).

O SIR15P01 obteve dados de estações a partir do terremoto no Chile em 2010 até o ano de 2015,

sendo a época de referência definida como a época média de coleta de dados, no ano de 2013. Além disso, o SIR15P01, como densificação do ITRF na América do Sul, não está vinculado ao ITRF atual, mas sim ao ITRF2008.

4- EXPERIMENTO

Para alcançar os objetivos do trabalho, será realizada uma análise comparativa de coordenadas de estações GNSS localizadas na América do Sul, em relação a sua referência global, o ITRF2014, e serão verificadas se algumas recomendações foram seguidas quando do processamento das observações, de acordo com relatório de processamento fornecido pelo centro de combinação de cada realização. Segundo (Monico, Baez e Drewes, 2006), para que tenhamos uma solução final não viesada e com precisão considerada ótima dentro do período de observações, devemos ter como época referência para a solução final sua época média, e as observações utilizadas tais como as soluções fornecidas por cada técnica geoespacial, no caso do ITRF, devem estar livre de injunções além daquelas especificamente necessárias para a questão de datum.

Para a análise foram escolhidas estações GNSS comuns ao SIRGAS SIR15P01 e ao ITRF2014. Ao realizar tal procedimento, 58 estações comuns a ambos os sistemas forma identificadas. A figura 1 mostra a distribuição das estações.



Figura 1 - Distribuição de estações ITRF/SIRGAS na América do Sul.

As soluções devem estar em uma mesma época de referência e no mesmo referencial para realizar as análises.

Assim, para a realização do trabalho, optou-se por propagar (atualizar) as coordenadas e precisões do ITRF2014 para a época do referencial SIR15P01, no ano de 2013. Após a atualização das coordenadas e precisões do ITRF2014 para época 2013,0, os parâmetros de transformação entre o ITRF2014 e ITRF2008 foram atualizados, da época 2010,0 para época 2013,0, usando a equação 1. Tal procedimento deve ser realizado pois o SIR15P01 está alinhado ao ITRF2008. Por fim, as coordenadas e precisões foram transformadas do ITRF2014 para o ITRF2008, referencial este alinhado com o SIR15P01.

A tabela 1 mostra os parâmetros de transformação entre o ITRF2014 e o ITRF2008.

Tabela 1 – Parâmetros de Transformação entre o ITRF2014 e o ITRF2008 na época 2013,0.

Parâmetros	Tx	Ty	Tz	S	Ex	Ey	Ez
	mm	mm	mm	ppb	mas	mas	mas
ITRF2014-ITRF2008	1,6	1,9	2,4	0,02	0,00	0,00	0,00
Época 2010							
ITRF2014-ITRF2008	1,6	1,9	2,1	0,01	0,00	0,00	0,00
Época 2013							

Para as atualizações, as seguintes formulações matemáticas foram utilizadas:

$$\begin{aligned} X_{ti} &= X_{t0} + V_x * \Delta t \\ Y_{ti} &= Y_{t0} + V_y * \Delta t \\ Z_{ti} &= Z_{t0} + V_z * \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

Onde,

X_{ti}, Y_{ti}, Z_{ti} são coordenadas na época requerida.

X_{t0}, Y_{t0}, Z_{t0} são coordenadas na época de origem.

V_x, V_y, V_z são velocidades de cada componente.

Δt a variação de tempo entre as épocas.

Para as precisões a seguinte formulação matemática foi aplicada:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{0i}^2 + \sigma_{vi}^2 * \Delta t^2} \quad (2)$$

Onde,

σ_i é a precisão da coordenada na época desejada.

σ_{0i}^2 é a variância da coordenada na época referência

σ_{vi}^2 é a variância da velocidade referente às componentes $i = X, Y, Z$.

Nesta formulação, não foi considerada a correlação entre as velocidades e as coordenadas.

Após a propagação de coordenadas, como já citado, as coordenadas foram transformadas do ITRF2014 para o ITRF2008, através da equação 3.

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + T + (1+S)*R * \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

X_f, Y_f, Z_f são coordenadas no referencial desejado.

X_i, Y_i, Z_i são coordenadas no referencial origem.

T, S, R correspondem respectivamente ao vetor translação, a escala e a matriz de rotação entre os referenciais.

Todas as atualizações e transformações foram implementadas no software livre Octave, versão 4.0.0.

5- ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA

Para a análise de consistência entre as realizações, verificou-se a precisão das coordenadas em cada realização. Ao realizar tal procedimento, os seguintes valores foram obtidos como mostra a tabela 1.

TABELA 2 – PRECISÃO (m)

	SIR15			ITRF14		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Média	0,0019	0,0029	0,0015	0,0023	0,0027	0,0028
Desvio	0,0011	0,0014	0,0009	0,0002	0,0006	0,0002
Maior	0,0069	0,0066	0,0048	0,0049	0,0076	0,0053
Menor	0,0008	0,0009	0,0006	0,0022	0,0025	0,0026

Como pode ser visto na tabela 2, a precisão das coordenadas no ITRF2014 e do SIR15P01, em média, assumem valores submilimétricos.

Na análise, levou-se em consideração também a discrepância entre as coordenadas. A tabela 3 apresenta os valores obtidos após as devidas atualizações e transformações.

TABELA 3 - Discrepâncias (m)

	X	Y	Z
Média	-0,016	-0,006	0,0001
Máxima	0,011	0,019	0,054
Desvio Padrão	0,066	0,038	0,020

Como pode ser visto na tabela 3, a discrepância entre as coordenadas cartesianas em média, apresentam valores centimétrico para coordenada X e milimétrico para as coordenadas Y e Z.

Para se ter uma melhor visualização, as discrepâncias entre coordenadas das realizações são transformadas para o sistema cartesiano local. O figura 2 mostra os valores de discrepâncias em valores para planimetria e altimetria. As maiores discrepâncias foram em locais próximos à Cordilheira dos Andes,

regiões com atividade sísmica, como as apresentadas nas estações ANTC, CONZ e AREQ, que localizam-se

nas cidades de Antuco-Chile, Concepcion-Chile e Arequipa-Peru.

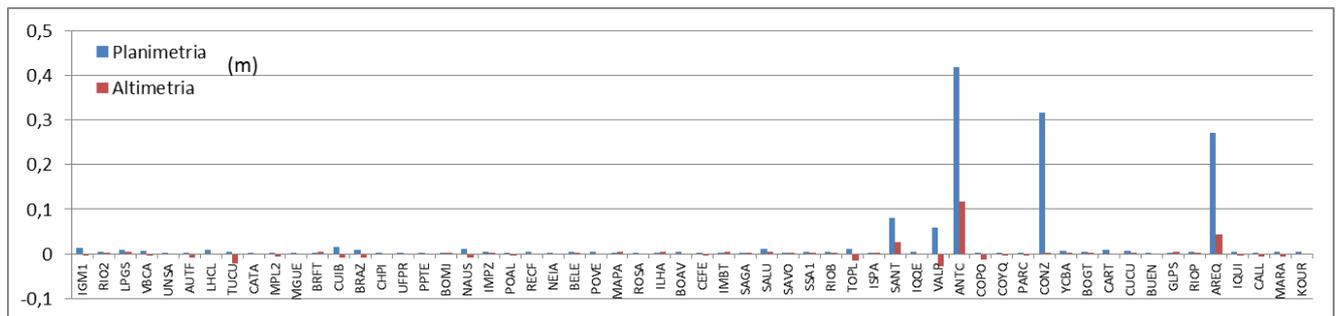


Figura 2 – Discrepâncias

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste trabalho é importante esclarecer que as transformações e atualizações realizadas não consideraram a correlação entre parâmetros e a variabilidade dos parâmetros de transformação.

No que se refere a cada realização, verificou-se que a rede SIR15P01 está referenciada em sua época média de dados e a condição de datum de seu sistema, por ser um adensamento de outra rede, adotou como condições para orientação e evolução temporal, as coordenadas de algumas estações do ITRF localizadas na América Latina. Já a realização ITRF2014, não adota a época média de dados como referencia para sua solução. As soluções por técnicas foram fornecidas livre de injunções ou com injunção mínima e apresentou uma inovadora modelagem de deformação (sinais sazonais e deformações pós-sísmicas).

A partir das análises realizadas, verifica-se que os referenciais estão consistentes na ordem do centímetro, quando podemos verificar que a média das discrepâncias em X, Y e Z são, -1,6, -0,6 e 0,1 centímetros respectivamente, mostrando a boa acurácia da rede SIRGAS através da rede SIR15P01.

Por fim, salienta-se que esta comparação através destas atualizações e transformações pode ser usada para a análise de redes continentais, regionais e locais. No Brasil, tal procedimento pode ser aplicado na RBMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altamini, Z; Rebischung, P; Métivier, L, Collilieux, X., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. J. Geophys. Res. Solid Earth, 121.

Carvalho, S.C; Dal Poz, W. R; Larocca, A.P.C., 2015. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. Boletim de Ciências Geodésicas. Brasil.

Monico, J.F.G., 2008. Posicionamento pelo GNSS. Editora Unesp. São Paulo, Brasil. 476 páginas.

Monico, J.F.G. 2003. O estado da arte em referenciais geodésicos: ITRF2000 e as próximas realizações do ITRS. Presidente Prudente-SP. Brasil.

Monico, J.F.G., 2006. Fundamentos matemáticos envolvidos na realização do ITRS. Presidente Prudente-SP, Brasil.

Sánchez, L; Drewes, H., (2016). Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. Journal of Geodynamics.

Sánchez L., Drewes H. (2016). VEMOS2015: Velocity and deformation model for Latin America and the Caribbean. Journal of Geodynamics.