

O ESTADO DA ARTE EM REFERENCIAIS GEODÉSICOS: ITRF2000 E AS PRÓXIMAS REALIZAÇÕES DO ITRS

Status of the art on geodetic reference frame: ITRF2000 and the next ITRS realizations

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO¹

JUAN CARLOS BÁEZ SOTO²

HERMANN DREWES³

¹ galera@prudente.unesp.br

Departamento de Cartografia

FCT Unesp Campus de Presidente Prudente, SP.

²baez@ufpr.br

Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas

UFPR – Curitiba, PR.

³ drewes@dgfi.badw.de

DGFI- Deutsche Geodätische Forschungsinstitut

Munique- Alemanha

RESUMO

Nesse artigo apresenta-se um breve histórico das realizações do ITRS, dando detalhes da mais recente, a ITRF2000, bem como os parâmetros envolvidos nas transformações entre elas. Apresentam-se algumas das deficiências da realização ITRF2000 e apontamentos de como deverão ser as novas realizações. Pretende-se com isso apresentar o estado da arte no que concerne aos referenciais Geodésicos. Análises de qualidade das coordenadas das estações pertencentes ao território Sul Americano também são apresentadas, quer seja em termos de precisão, como no que concerne às discrepâncias em relação a outras realizações. Finalmente, discute-se sobre os cuidados que devem ser tomados ao utilizar as coordenadas de estações localizadas em regiões onde ocorrem abalos sísmicos e terremotos.

ABSTRACT

In this paper is presented a brief historic of the ITRS realizations, giving details of the most recent, ITRF2000, as well as the parameters involved in the transformation among them. Some deficiencies of ITRF2000 are presented together with descriptions of how should be it in the future. Therefore, the status of Geodetic Reference System will be presented. Quality control analysis for

some of the stations situated in the South American continent is presented in terms of precision and discrepancies with respect to other frames. Finally, it was emphasized about the care that one should take when using coordinates of stations located in regions subjected to seismic shock and earthquakes.

1 INTRODUÇÃO

ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) é a realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), a cargo do escritório central do IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*). A realização é efetuada pelo ajustamento de um conjunto de coordenadas (SSCs - *Set of Station Coordinates*) e respectiva Matriz Variância e Covariância (MVC) obtidos a partir de várias tecnologias espaciais apropriadas ao posicionamento terrestre, como o SLR (*Satellite Laser Range*), LLR (*Lunar Laser Range*), VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), GPS (*Global Positioning System*) e o DORIS (*Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite*) (BOUCHER & ALTAMIMI, 1996). O GPS passou a fazer parte da solução ITRF em 1991 e o DORIS em 1994.

Até o ITRF 2000, diversos centros de processamento submetiam seus resultados (SSC) ao IERS, onde eram ajustados conjuntamente, resultando numa lista de coordenadas e velocidades das estações, bem como os parâmetros de transformação entre os diversos SSCs e a solução final (BOUCHER et al., 1999). Nessas soluções, o SLR, principalmente, bem como o GPS e o DORIS, proporcionam a origem do sistema, ou seja, o geocentro. O movimento orbital dos mesmos tem como origem o centro de massa da Terra. O VLBI, principalmente, mas também o SLR e o GPS, proporcionam a escala. Resta a orientação, que não tem como ser obtida de nenhum sistema de medição. Essa deficiência vem sendo solucionada, em geral, via a introdução da condição NNR (*No Net Rotation*) em relação às coordenadas aproximadas (MONICO, 2005). Isso assegura a não singularidade do sistema de equações a ser solucionado. Vale ainda ressaltar que uma estação pode fazer parte da solução de diversos centros.

A partir de 2001 a estrutura do IERS foi reorganizada e esse procedimento foi alterado. Foram criados os Centros de Combinações do ITRS (ITRS-CC), que auxiliam o Centro de Produtos do ITRS (ITRS-CP) no IGN (*Institut Géographique National*), em Paris, na França. Maiores detalhes serão apresentados no decorrer desse artigo.

O objetivo deste trabalho é apresentar um breve histórico do ITRF, dando detalhes da realização mais recente, a ITRF2000, apresentar algumas de suas deficiências e como deverão ser as futuras realizações. Análise de qualidade das coordenadas das estações pertencentes ao território Sul Americano, em termos de precisão e compatibilidade com outras soluções, também será apresentada. Finalmente, citam-se vários cuidados que devem ser tomados em razão das

particularidades que podem ocorrer em certas estações, tais como proximidade de regiões onde ocorrem abalos sísmicos e terremotos.

2 HISTÓRICO DO ITRF

O IERS substituiu, em 1988, o BIH (*Bureau International de L'Heure*). O início das atividades do BIH, no que concerne a realização do CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System*), se deu em 1985. As realizações do BTS (*BIH Terrestrial System*) são denominadas BTS84, BTS85, BTS86 e BTS87. A partir de 1988 essa função foi transferida para o IERS, que passou a realizar o ITRS. A realização inicial é denominada ITRF-0, na qual foi adotada a origem, orientação e escala do BTS87 (BOUCHER & ALTAMINI, 1989). As sucessivas realizações do ITRF, depois da inicial, são: ITRF-88, ITRF-89, ITRF-90, ..., ITRF-94, ITRF-96, ITRF-97 e ITRF2000.

Uma estação ITRF é caracterizada pelas coordenadas geocêntricas X, Y, Z com as respectivas velocidades, isto é, \dot{X} , \dot{Y} e \dot{Z} , numa determinada época de referência t_0 . Utilizando a representação $\vec{X} = (X, Y, Z)$ e $\vec{V} = (\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$, a posição de um ponto sobre a superfície terrestre, num instante t , pode ser expressa na forma:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0(t - t_0) + \sum_i \Delta \vec{X}_i$$

(01)

onde $\Delta \vec{X}_i$ são correções devido à vários efeitos que se alteram com o tempo e \vec{X}_0 e \vec{V}_0 são os vetores posição e velocidade na época de referência t_0 . Algumas das correções a serem consideradas são o deslocamento de maré da Terra sólida, carga dos oceanos e carga da atmosfera.

Até a realização anterior ao ITRF-91, a evolução temporal das estações era obtida a partir do modelo de velocidade das placas litosféricas denominado NUVEL (*Northen University Velocity Model*). A partir de 1991, com a realização do ITRF-91 (BOUCHER et al., 1992), a velocidade de cada estação passou também a ser estimada no processo, tendo o modelo de movimento das placas como uma informação adicional.

Até a publicação do ITRF-92 todas as realizações do ITRS seguiram praticamente o mesmo padrão (BOUCHER et al., 1993). No ITRF-93 houve uma mudança em relação às anteriores no que diz respeito à orientação da rede. Foi adotada como injunção uma orientação com relação a uma rede NNR, relativa ao ano de 1988. No ITRF-93, a orientação e sua variação com o tempo passaram a ser consistentes com os parâmetros de rotação da Terra produzidos pelo IERS (BOUCHER et al., 1994).

No ITRF-94, as estações foram classificadas de acordo com a qualidade de suas coordenadas e respectivas velocidades e a MVC de cada solução individual

foi considerada na combinação de todas as soluções. As estações foram classificadas em quatro classes: A, B, C e Z, sendo que a precisão foi o critério principal adotado na classificação.

As estações incluídas dentro dessa classificação foram determinadas por pelo menos duas técnicas, as quais devem estar relacionadas por levantamentos locais. Essa situação permite confrontar os resultados. As estações classe A apresentam precisão melhor que 2 cm na época 1988,0 e 1993,0. Estações não pertencentes a classe A, mas com precisão melhor que 3 cm em 1993,0, são classificadas na classe B. Uma estação que não pode ser classificada em A ou B, mas apresenta precisão da ordem de 5cm, é incluída na classe C. As demais estações fazem parte da classe Z.

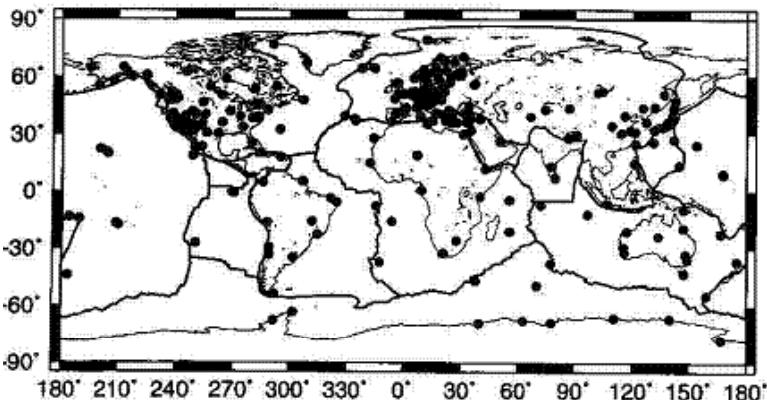
No que diz respeito à orientação da rede, no ITRF-94 não foi seguido o mesmo procedimento adotado no ITRF93. Nessa realização a orientação está injuncionada ao ITRF-92 na época 1988,0 e a evolução temporal segue o modelo geofísico denominado NNR-NUVEL1. Desta forma, segundo BOUCHER *et al.*, (1996), o ITRF-94 está consistente com os parâmetros de orientação da Terra publicados pelo IERS.

A versão 95 do ITRF não foi realizada. Foi verificado que, com o nível de precisão atingido no ITRF-94, uma série de detalhes não considerados até aquele momento no modelo merecia estudos mais profundos. Um grupo de trabalho foi criado e as recomendações finais foram apresentadas num *workshop* sobre o ITRF. Considerando as necessidades dos usuários, decidiu-se por continuar com as publicações anuais do ITRF, antes da apresentação final das recomendações do grupo de trabalho. Dessa forma, a realização do ITRS posterior ao ITRF-94 é designada ITRF-96.

A orientação, a origem, a escala e a evolução temporal do ITRF-96 foram definidas de modo a serem iguais às do ITRF-94. Nos locais onde há mais de uma estação, mesmo que com técnicas diferentes, as componentes da velocidade são consideradas iguais, e as soluções individuais foram consideradas estatisticamente independentes, cada uma com MVC conhecida, a menos de um fator de escala.

Dezessete SSCs foram selecionados para compor o ITRF-96 (4 VLBI; 2 SLR; 8 GPS e 3 DORIS). Os dados envolvidos abrangem vários intervalos e não apenas os coletados nos anos de 1995 e 1996. As coordenadas e velocidades das estações estimadas no ITRF-96 referem-se à época 1997,0. Diferentemente das realizações anteriores, ela está dividida em 4 tabelas, cada uma correspondendo à técnica utilizada (VLBI, SLR, GPS e DORIS). Mais de 500 estações, estabelecidas em 290 locais, fizeram parte do ITRF-96 (BOUCHER *et al.* 1998). A Figura 1 mostra a distribuição dessas estações. Os arquivos dessa realização podem ser encontrados em <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF96.html>.

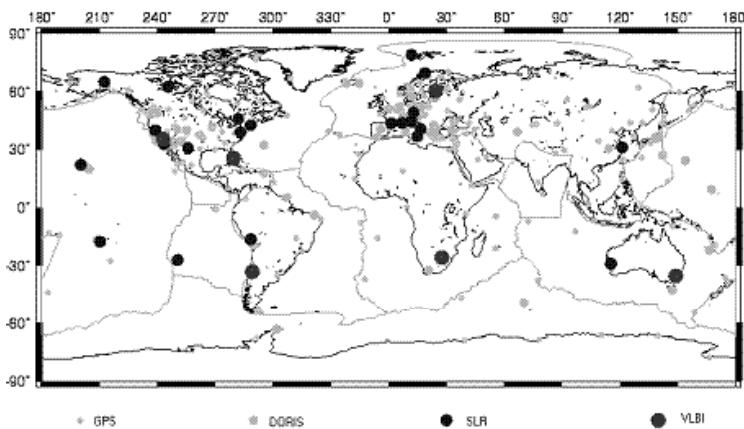
Figura 1: Estações envolvidas no ITRF96 (BOUCHER et al., 1998)



No final de 1999 ficou disponível o ITRF-97. Dezenove SSCs foram selecionados para compor o ITRF-97 (4 VLBI, 5 SLR, 6 GPS, 3 DORIS e 1 SLR+DORIS). Essa realização é bastante similar ao ITRF-96. A orientação, a origem, a escala e a evolução temporal do ITRF-97 foram definidas de modo a serem iguais às do ITRF-96 e, consequentemente, iguais às do ITRF-94.

Em relação ao ITRF-96, o número de estações e os locais onde elas foram estabelecidas aumentaram. O ITRF-97 é composto por mais de 550 estações, em 325 localidades. A Figura 2 ilustra a distribuição dessas estações. Maiores detalhes podem ser encontrados em BOUCHER et al., (1999).

Figura 2: Estações Envolvidas no ITRF-97 (BOUCHER et al., 1999)



A realização do ITRS posterior ao ITRF-97 é a ITRF-2000. Nessa realização, diferentemente das demais, não compareceram injunções externas. Logo, essa solução deve refletir a precisão atual das tecnologias espaciais disponíveis para a Geodésia na determinação de posição e velocidade de estações sobre a crosta terrestre. A origem do sistema foi estabelecida a partir da média ponderada de cinco soluções SLR. Neste caso, as translações e suas variações (*rates*) vinculadas a essas soluções foram fixadas como zero em relação ao ITRF-2000. A escala foi inserida a partir de cinco soluções SLR e três VLBI. Logo, a diferença em escala entre o ITRF-2000 e cada uma dessas soluções foi considerada nula, bem como a sua variação. A orientação e sua evolução temporal foram introduzidas via injunção interna¹ ($B^*(X_0 - X_a) = 0$), na qual a matriz B é restrita apenas aos elementos de orientação (MONICO, 2005). O vetor X_0 é composto pelo vetor posição (aproximado) no ITRF-97, para definir os ângulos de rotação e pelas velocidades do modelo NNR-NUVEL-1A, para definir as variações (*rates*) de rotação. X_a é o vetor dos parâmetros ajustados (coordenadas e respectivas velocidades). É importante frisar que essa condição envolveu apenas 50 estações, as quais apresentam alta qualidade.

Esta nova realização contém algo em torno de 800 estações, distribuídas em aproximadamente 500 locais. Em relação às realizações anteriores, há uma melhor distribuição das estações, mas mesmo assim comparece uma maior concentração na Europa e América do Norte. A solução final é composta por 21 SSCs individuais, das quais 3 VLBI, 7 SLR, 1 LLR, 6 GPS, 2 DORIS, 2 com técnica múltipla, além de 9 densificações GPS, dentre elas o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). Informações podem ser obtidas em <http://www1.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/sirgas/principal.htm>. Uma ilustração das distribuições das estações ITRF2000 pode ser vista na Figura 3, acessada em <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000/>, em 23 de maio de 2003. Maiores detalhes podem ser obtidos em ALTAMIMI et al., (2002).

Das estações ITRF-2000, 50% delas apresentam precisão melhor que 1cm e aproximadamente 100 estações tem suas velocidades estimadas com precisão da ordem de 1mm/ano. Em face da nova definição e realização no contexto do ITRF2000, comparecem diferenças significativas entre essa realização e as anteriores. Os parâmetros de transformação entre o ITRF-2000 e demais realizações estão contidos na Tabela 1. Observe-se que trata da transformação generalizada de Helmert, a qual envolve 14 parâmetros (3 translações, 3 rotações, 1 fator de escala e as respectivas variações com o tempo). Para utilização dessa transformação, os interessados podem consultar SAPUCCI E MONICO (2000, 2001).

¹ As injunções foram introduzidas como pseudo-observações.

Figura 3: Estações envolvidas no ITRF2000

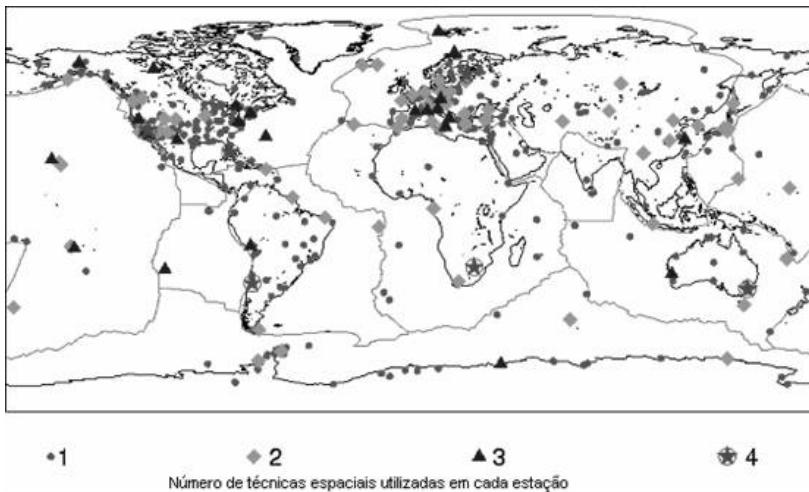


Tabela 1: Parâmetros de transformação entre o ITRF2000 e as prévias realizações do ITRS (McCARTHY & PETIT, 2004, p.30)

Parâmetros \Rightarrow Variação dos Parâmetros \Rightarrow Transformações	T_x (cm) \dot{T}_x <i>cm/ano</i>	T_y (cm) \dot{T}_y <i>cm/ano</i>	T_z (cm) \dot{T}_z <i>cm/ano</i>	s ppb \dot{s} <i>ppb/ano</i>	ε_x (mas) $\dot{\varepsilon}_x$ <i>mas/ano</i>	ε_y (mas) $\dot{\varepsilon}_y$ <i>mas/ano</i>	ε_z (mas) $\dot{\varepsilon}_z$ <i>mas/ano</i>
ITRF2000 \rightarrow ITRF97 = ITRF96 = ITRF94 Época 1997,0	0,67 0,00	0,61 -0,06	-1,85 -0,14	1,55 0,01	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,02
ITRF2000 \rightarrow ITRF93 Época 1988,0	1,27 -0,29	0,65 -0,02	-2,09 -0,06	1,95 0,01	-0,39 -0,11	0,80 -0,19	-1,14 0,07
ITRF2000 \rightarrow ITRF92 Época 1988,0	1,47 0,00	1,35 -0,06	-1,39 -0,14	0,75 0,01	0,0 0,00	0,0 0,00	-0,18 0,02
ITRF2000 \rightarrow ITRF91 Época 1988,0	2,67 0,00	2,75 -0,06	-1,99 -0,14	2,15 0,01	0,0 0,00	0,0 0,00	-0,18 0,02
ITRF2000 \rightarrow ITRF90 Época 1988,0	2,47 0,00	2,35 -0,06	-3,59 -0,14	2,45 0,01	0,0 0,00	0,0 0,00	-0,18 0,02
ITRF2000 \rightarrow ITRF89 Época 1988,0	2,97 0,00	4,75 -0,06	-7,39 -0,14	5,85 0,01	0,0 0,00	0,0 0,00	-0,18 0,02
ITRF2000 \rightarrow ITRF88 Época 1988,0	2,47 0,00	1,15 -0,06	-9,79 -0,14	8,95 0,01	0,1 0,00	0,0 0,00	-0,18 0,02

3 ESTRUTURA ATUAL DO ITRS DENTRO DO IERS

Grande tem sido o progresso alcançado na realização do ITRS, consequência direta da acurácia proporcionada pelas observações espaciais, bem como pelo bom desempenho dos sistemas de processamento de dados. Isso tem levado a atualizações na estrutura dos órgãos responsáveis por desenvolver esses trabalhos. A partir de 2001, para assegurar redundância na realização do ITRS, foram criados os IERS-CC para auxiliar o ITRS-CP. Atualmente há três ITRS-CC: DGFI (*Deutsche Geodätische Forschungsinstitut*), na Alemanha; IGN, na França e NRCan (*National Resources Canada*).

O IERS-CC é responsável por gerar produtos ITRS altamente precisos e confiáveis, a partir da combinação de dados (soluções) de várias técnicas geodésicas espaciais (VLBI, SLR, LLR, GPS, DORIS) as quais são proporcionadas pelos serviços específicos do IERS, tais como IVS (*International VLBI Service*), ILRS (*International Laser Range Service*), IGS (*International GPS Service*) e IDS (*International DORIS Service*), bem como por outros centros de análise.

Na nova estrutura do IERS também foi criado o CRC (*Combination Research Centers*) visando proporcionar melhorias adicionais nas combinações das técnicas espaciais. Sua função é desenvolver métodos de combinações adequados, bem como *softwares* para serem utilizados pelo Coordenador de Análises do IERS para a obtenção do produto final. Atualmente essa função é realizada por 11 institutos de pesquisa.

O Coordenador de Análises do IERS é responsável pela realização do IERS e outros produtos, bem como pela sua consistência interna.

4 AS DEFICIÊNCIAS DO ITRF2000 E RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO

As futuras realizações do ITRS serão advindas na nova estrutura do ITRS dentro do IERS. Os resultados dos três centros de combinação (ITRS-CC) serão combinados novamente para gerar um produto final sob o auspício do ITRS-CP.

De acordo com algumas análises (ANGERMANN et al., 2003), o ITRF 2000 apresenta algumas deficiências, quais sejam:

- os dados de entrada apresentavam injunções que não puderam ser removidas, o que pode produzir efeitos sistemáticos nos resultados finais;
- algumas das soluções que fizeram parte dessa realização diferem significantemente da solução final, podendo alcançar 5 cm;
- algumas estações apresentam série temporal em posição que não permite admitir velocidade constante, tal como ocorreu nessa realização;
- as conexões em locais dispondo de mais de uma técnica nem sempre apresentam acurácia suficiente para se obter um referencial homogêneo e

confiável, pois muitas vezes as discrepâncias entre as duas técnicas e as medidas realizadas eram significantes;

- para o caso anterior, vários locais apresentavam velocidades muito discrepantes e mesmo assim foram igualadas na solução final.

Todas essas deficiências devem ter afetado as coordenadas finais, mas quantificá-las é uma tarefa extremamente difícil.

Para algumas estações, o período dos dados envolvidos na solução está muito distante da época origem do ITRF2000, no caso 1997,0. Logo, as coordenadas dessas estações não apresentam resultados confiáveis, pois a melhor precisão é obtida na época média da campanha (PEREZ, 2002). Ao propagar as coordenadas para a época de interesse, a qualidade das coordenadas deteriorará ainda mais. É o que ocorre com muitas estações pertencentes ao território brasileiro.

Logo, para as futuras realizações do ITRS, além de mais pesquisas relacionadas com a metodologia de combinação dos resultados (tipo de combinação, pesos de cada técnica, definição do *datum*), algumas recomendações são apresentadas por ANGERMANN *et. al.* (2003):

- as soluções para serem combinadas devem ser submetidas livres de injunções; caso contrário, elas não devem gerar deformações na rede e ser corretamente relatadas pelos produtores da solução;
- a suposição de velocidade constante só deve realmente ser introduzida após análise detalhada da série temporal de posições, pois há vários fenômenos geofísicos que provocam uma função temporal não linear;
- melhorar as conexões nos locais onde comparecem mais de uma técnica de observação.

Adicionalmente deve-se citar a necessidade de uma melhor escolha da época de referência da solução. Ela deve ser, pelo menos, a época média do período das observações, nunca uma época inferior a essa (PEREZ, 2002). No entanto, pelo fato dos períodos de observações poderem ser diferentes em cada estação, um problema adicional a ser solucionado comparece na realização.

Considerando a nova estrutura do IERS, as próximas realizações (ITRF2004) deverão também incorporar progresso resultante das investigações desenvolvidas nos Centros de Pesquisas relacionados com a combinação de soluções. Isso deverá resultar numa realização consistente entre o ITRS, ICRS e EOPs (*Earth Orientation Parameter*). Resultados preliminares do ITRF2004 já apontam nesta direção (ALTAMIMI, 2005).

5 ANÁLISES DA QUALIDADE DAS COORDENADAS DE ESTAÇÕES SUL AMERICANA NO ITRF2000

Para a análise da qualidade de coordenadas das estações ITRF2000 na América do Sul foram tomadas as coordenadas das estações que fazem parte da mesma e que sejam comuns ao SIRGAS2000, tomando-se 2000,4 como a época de referência, a qual coincide com a época de referência do SIRGAS. Como as

coordenadas das estações ITRF2000 estão referenciadas na época 1997,0, elas tiveram que ser propagadas para a época 2000,4 utilizando suas velocidades e respectivas estimativas de precisão obtidas na página do IERS (<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000/>). Para a realização dos cálculos foram utilizadas as seguintes expressões:

$$X_{t_i} = X_{t_0} + V_X * \Delta_t$$

$$Y_{t_i} = Y_{t_0} + V_Y * \Delta_t$$

$$Z_{t_i} = Z_{t_0} + V_Z * \Delta_t$$

(02)

onde se tem:

- $X_{t_i}, Y_{t_i}, Z_{t_i}$ coordenadas na época 2000,4;
- $X_{t_0}, Y_{t_0}, Z_{t_0}$ coordenadas na época de origem t_0 ;
- V_X, V_Y, V_Z velocidades em cada uma das componentes;
- Δ_t diferença de tempo.

Aplicando-se propagação de erro, e desprezando-se as covariâncias, a precisão das coordenadas pode ser obtida a partir de:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{0i}^2 + \sigma_{Vi}^2 * (\Delta_t)^2}$$

(03)

sendo que σ_{0i}^2 é a variância da coordenada na época de referência e σ_{Vi}^2 a variância da velocidade referente as componentes $i = X, Y$ e Z .

Na tabela 2 são apresentadas as precisões médias e máximas das coordenadas ITRF2000 das estações localizadas na América do Sul para a época $t = 2000,4$, bem como na realização do SIRGAS (<http://www1.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/sirgas/principal.htm>) e na solução do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). A solução SIRGAS envolve 10 dias de dados GPS. No caso da última, trata-se da solução MIT1061P.ssc, a qual envolve dados GPS incluindo, inclusive, a semana GPS 1061. A solução MIT é obtida a partir da combinação das soluções regionais, realizada por diferentes centros de processamento e não apresenta injunções ou condições externas. Detalhes dessa solução encontram-se disponível no site do CDDIS (*Crustal Dynamic Data Information System*), (<http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsreport/2000/msg00417.html>).

Tabela 2: Precisão (mm) das soluções ITRF2000, SIRGAS e MIT, (t=2000,4) na América do Sul

Precisão	ITRF2000 t=2000,4			SIRGAS t=2000,4			MIT t=2000,4		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
Média	19,3	28,8	15,2	0,1	0,2	0,1	2,2	2,9	1,8
Máxima	85,0	134,8	123,1	0,6	2,0	0,5	5,4	6,8	4,3

Pode-se observar uma acentuada diferença entre as precisões da solução ITRF2000 e as demais. A precisão da solução SIRGAS parece ser otimista, ao se comparar com a da solução MIT, que abrange um período de tempo muito maior.

Na tabela 3 são apresentadas as discrepâncias entre as coordenadas das três realizações, considerando a média, o desvio-padrão (DP) e a máxima. Nesse caso foram consideradas as componentes Latitude, Longitude e Altura geométrica. Pode-se observar que a discrepância máxima ocorre em Longitude, alcançando 51,6 mm entre as soluções ITRF2000 e MIT.

Tabela 3: Discrepâncias (mm) de coordenadas entre diferentes soluções (t=2000,4)

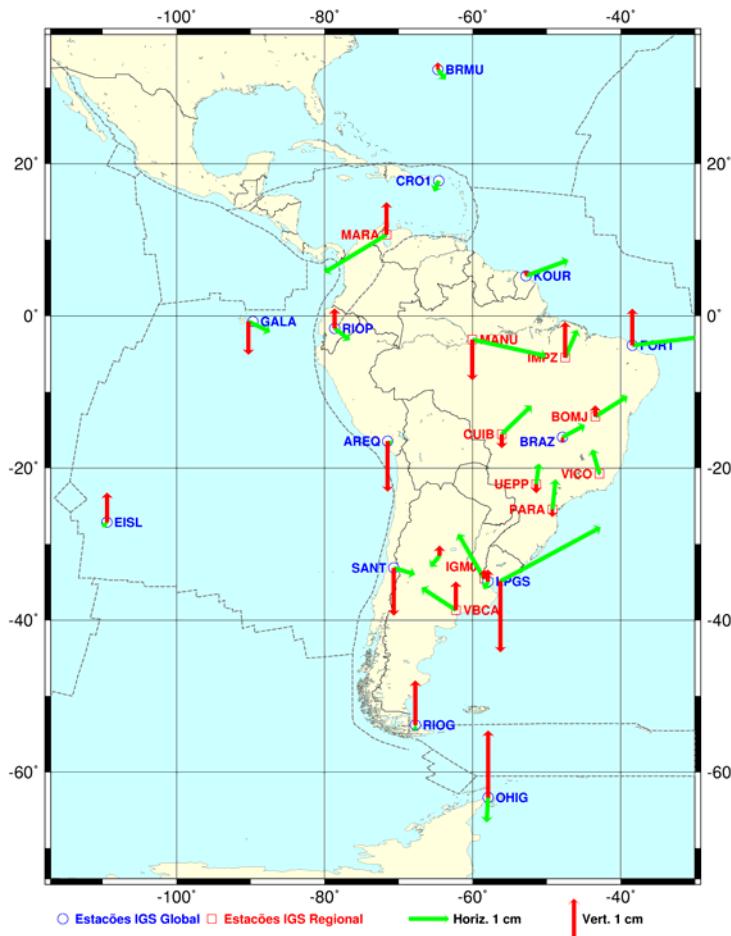
	ITRF2000-SIRGAS			ITRF2000-MIT			SIRGAS-MIT		
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
Média	1,5	3,0	0,7	3,7	16,9	-11,3	3,5	14,6	-12,5
DP	5,6	8,5	8,1	10,8	15,7	9,5	9,0	13,9	11,1
Máxima	13,4	24,9	16,7	22,9	51,6	6,5	22,5	33,2	3,7

No ajustamento dos dados da campanha SIRGAS2000 algumas estações que fizeram parte do ITRF2000 foram incluídas como estações fiduciais. Essas estações deveriam ter suas coordenadas preservadas. Mas ao que tudo indica, as coordenadas foram alteradas, pois todas apresentam discrepâncias quando se compara ITRF2000 e SIRGAS2000 (Tabela 3).

As maiores discrepâncias foram observadas nas estações MARA, FORT e MANU (Figura 4). Em termos de precisão, algumas ultrapassam 10 cm no ITRF2000, sendo muito menor no SIRGAS. A razão dessas fragilidades se deve a seleção da época de referência do ITRF2000, a qual é anterior ao período de coleta de dados dessas estações. Logo, a época do SIRGAS é mais adequada, razão pela qual apresenta melhor precisão, mesmo dispondendo de apenas 10 dias de dados, muito inferior ao do ITRF2000.

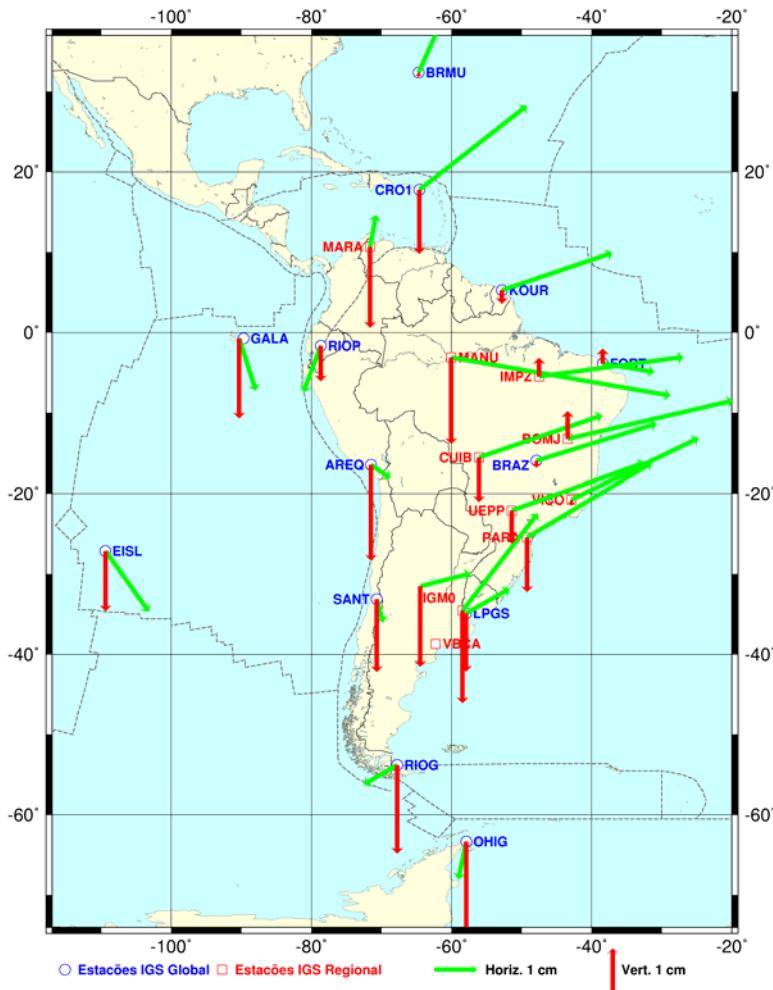
A figura 4 ilustra as discrepâncias entre o ITRF2000 e SIRGAS2000 em termos de coordenadas geodésicas locais (E, N e U). Como se pode observar, as discrepâncias horizontais (resultante de E e N) são compatíveis com as de altura, o que normalmente ocorre nas redes GPS, haja vista a deficiência maior em se determinar a componente h .

Figura 4: Discrepância entre as estações ITRF2000 e SIRGAS



A figura 5 ilustra as discrepâncias entre a solução ITRF2000 e a solução MIT00P1061, onde se pode observar que as diferenças são maiores que a anterior, principalmente em termos das componentes horizontais.

Figura 5: Discrepância entre as estações ITRF2000 e a solução MIT

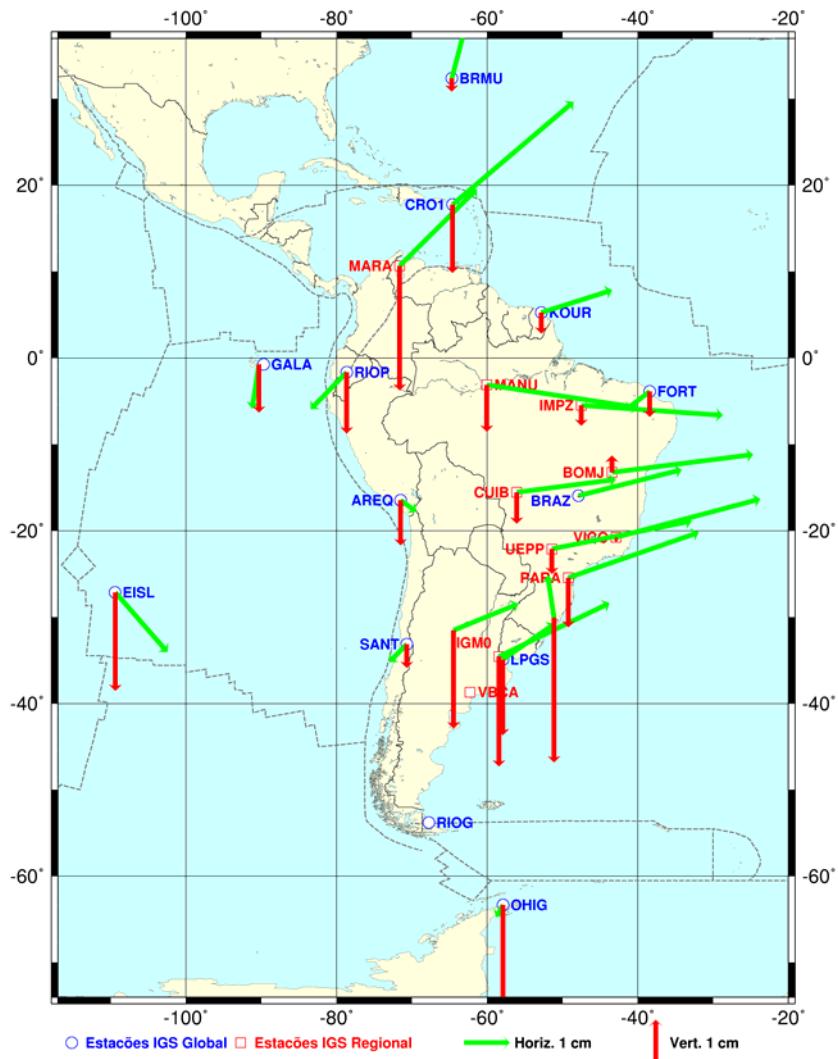


Na figura 6 apresentam-se as discrepâncias entre as soluções SIRGAS e MIT. Observa-se que as diferenças entre as estações são similares as diferenças entre ITRF2000 e MIT.

Um aspecto importante de considerar na análise da qualidade das coordenadas é a variação produzida por movimentos da crosta ou devido a sismo. Um caso muito claro de deslocamento de estação por causa de sismo

ocorreu nos anos de 2001 e 2002 na estação Arequipa (AREQ). Essa estação foi submetida a quatro sismos (2 em 2001 e 2 em 2002). A análise da série temporal mostra que o deslocamento da estação foi de aproximadamente 60 cm na direção sudoeste. A figura 7 ilustra essa situação.

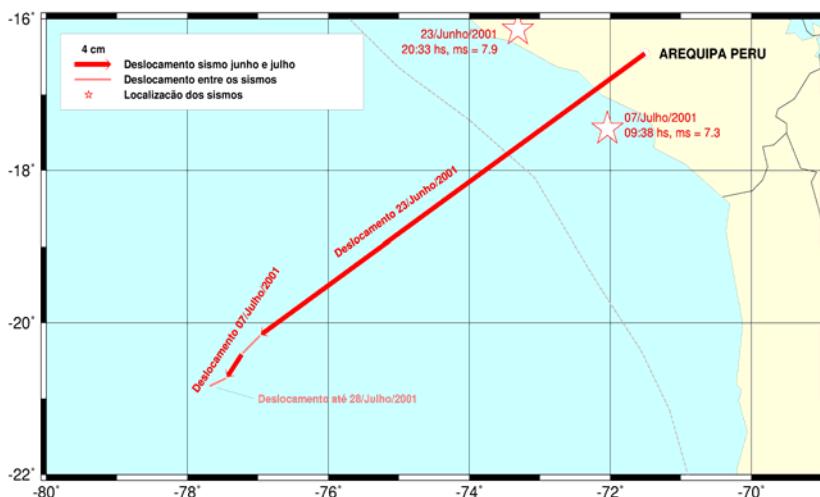
Figura 6: Discrepância entre as estações SIRGAS e a solução MIT



Nesse caso, não é aconselhável utilizar as soluções ITRF2000 e SIRGAS, pois ambas as soluções não consideram o deslocamento da estação. Nesse aspecto, chama-se a atenção para que sempre observe se as séries temporais disponíveis nos centros de processamento ou no *site* do IGS (*International GNSS Service*) para verificar os possíveis deslocamentos das estações, especialmente nas áreas de limite de placas.

Na incorporação de novas estações, referidas ao ITRF2000 ou SIRGAS, deve-se manter a consistência na definição do sistema pela atualização das coordenadas mediante consideração das velocidades. Estas velocidades podem ser obtidas diretamente das séries temporais das estações ou dos modelos geodinâmicos disponíveis na literatura APKIM20002 (DREWES & MEISEL 2003), ou de modelos obtidos a partir de observação geodésica das estações contínuas, entre outros. Para o caso do Brasil já se dispõe de modelo divulgado, podendo ser utilizado o software Velinter para atualização de coordenadas (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>).

Figura 7: Deslocamento da estação AREQ devido à ocorrência de sismo
Fonte: adaptada de KANIUTH, et al 2002



6 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Apresentou-se uma breve descrição das várias realizações do ITRS, incluindo a ITRF2000, a mais precisa atualmente. Algumas deficiências da mesma foram apresentadas, com sugestões compiladas da bibliografia visando melhorias para as futuras realizações do ITRS (ITRF2004). A nova estrutura do

IERS, no que concerne às realizações de sistema de referências, também foi apresentada.

Finalmente apresentou-se uma análise das coordenadas de algumas estações que fazem parte do ITRF2000 mostrando que, em relação a outras soluções disponíveis atualmente, pode-se obter discrepâncias de até 5,2 cm. No que concerne à precisão da solução ITRF2000, pode-se observar que essa solução apresenta valores superiores à 10cm, mostrando deficiência da solução. Isso se deve, provavelmente, ao fato de estações que têm a época de referência de coleta de dados muito distante da época de referência do ITRF2000 (1997,0). Nesses casos as coordenadas devem ser utilizadas com muito cuidado.

Adicionalmente chamou-se a atenção para os cuidados que devem ser tomados ao utilizar as coordenadas de estações localizadas especialmente nas áreas de limite de placas. O usuário deve sempre analisar a série temporal das coordenadas da estação visando detectar qualquer mudança brusca nas coordenadas da referida estação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOBRÁFICAS

- ALTAMIMI Z., SILLARD P., BOUCHER C. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Sciences Applications, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107 NO. B10, 2214, 2002.
- ALTAMIMI Z. Status of the ITRF2004, *Proceedings of IAG Dynamic Planet 2005*, Cairns, Austrália.
- ANGERMANN D., DREWES D., GERSTIL M., KELM R., KRUGEL M., MEISEL B. ITRF Combination – Status and Recommendations for Future GPS, *Proceedings of IAG Scientific Assembly*, Saporro, Japan, 2003.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. and SILLARD P. *The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97)*, IERS Technical Note 27, May 1999, Observatoire de Paris, 191p. 1999.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. and SILLARD P. *Results and Analysis of the ITRF96*, IERS Technical Note 24, May 1998, Observatoire de Paris, 166p. 1998.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. FEISSEL M., and SILLARD P. *Results and Analysis of the ITRF94*, IERS Technical Note 20, March 1996, Observatoire de Paris, p. irregular 1996.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. and DUHEM L. *Results and Analysis of the ITRF93*, Technical Note 18, October 1994, Observatoire de Paris, 1994.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. and DUHEM L. *ITRF92 and its associated field*, IERS Technical Note 15, October 1993, Observatoire de Paris, 1993.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z. and DUHEM L. *ITRF91 and its associated field*, IERS Technical Note 12, October 1992, Observatoire de Paris, 1992.
- BOUCHER C. and ALTAMIMI Z. *The Initial IERS Terrestrial Reference Frame*, IERS Technical Note 1, June 1989, Observatoire de Paris, 1989.

- BOUCHER, C.; ALTAMIMI Z. International Terrestrial Reference Frame. *GPS World*, p. 71-4, September 1996.
- DREWES H., MEISEL B., *An Actual Plate Motion and Deformation Model as a Kinematic Terrestrial Reference System*, Geotecnologien Science Report, No.3, 2003.
- KANIUTH K., MÜLLER H., SEEMÜLLER W. (2002) *Displacement of the space geodetic observatory Arequipa due to recent earthquakes*. Zeitsch. Für Verm. 127(4), 238-243.
- McCARTHY, D. D.; PETIT, G. *IERS Conventions (2003)*, IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt at Main.2004. 127p.
- MONICO, J. F. G. As Condições NNT e NNR na Realização de um Referencial. *Boletim de Ciências Geodésicas*, no prelo. 2005.
- SAPUCCI, L. F. e MONICO, J. F. G. *Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações*. Rev. Bras. Geof., maio/ago. 2000, vol.18, no.2, p.161-172. ISSN 0102-261X.
- SAPUCCI, L. F. e MONICO, J. F. G. Investigando a Compatibilidade entre as Realizações do ITRS, *Geodésia Online*, 03/2001.
- PEREZ, J. A. S. *Campo de Velocidade para as Estações da RBMC e do IGS Localizadas na Placa Sul-Americana: Estimativa a Partir do Processamento de Dados GPS*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2002, 166 p.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido com o suporte da CAPES e do DAAD dentro do programa de cooperação internacional, cujas atividades foram desenvolvidas no DGFI na Alemanha e na Universidade de Hannover.

(Recebido em junho/05. Aceito em setembro/05)