

Investigando a Compatibilidade entre as Realizações do ITRS

Luiz Fernando Sapucci, *UNESP Presidente Prudente*

João Francisco Galera Monico, *UNESP Presidente Prudente*

1. Introdução
2. Breve Descrição do ITRF
3. Transformação de Helmert Generalizada
 - 3.1 Parâmetros de Transformação
4. Experimento
5. Resultados
 - 5.1 Análise dos resultados
6. Conclusões
7. Referências bibliográficas

Resumo

1. Introdução

Atualmente, no processamento das observações provenientes dos satélites GPS (*Global Positioning System*), é crescente o número de usuários das efemérides precisas (pós-processadas) produzidas pelo IGS (*International GPS Service*). Isto é devido aos bons resultados obtidos por pesquisadores de diversos países que empregam essas efemérides, principalmente aqueles ligados à área de geodinâmica. Como consequência, é crescente a utilização do ITRF (*IERS -International Earth Rotation Service- Terrestrial Reference Frame*) que compõe as diferentes materializações do ITRS (*IERS Terrestrial Reference System*), pois as mesmas são utilizadas pelo IGS para referenciar suas efemérides.

A existência de diversos ITRFs, gerando soluções distintas em épocas iguais, que erroneamente pode ser considerado uma desvantagem em sua utilização, na realidade mostra o estágio atual da Geodésia, que definitivamente passou a ser tetra-dimensional. Resta a questão: Qual é a compatibilidade entre as realizações do ITRS? Para responde-la, necessita-se utilizar a transformação de Helmert generalizada (Gregorius, 1996) e aplicar parâmetros específicos para as várias realizações do ITRS, passando-as para uma época comum em um mesmo referencial.

Este artigo tem por objetivo investigar a compatibilidade entre as realizações mais recentes do ITRS. Para tanto, serão apresentadas: uma breve descrição do ITRF, a transformação de Helmert generalizada, os parâmetros de transformação, bem como um experimento envolvendo algumas estações que pertençam aos 5 mais recentes ITRFs.

2. Breve Descrição do ITRF

O ITRF é a materialização do ITRS através do ajustamento de várias séries de coordenadas (SSC - *Set of Station Coordinates*), e as respectivas matrizes variância-covariância. Essas informações são provenientes de técnicas espaciais como SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*) e VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). A partir de 1991 o GPS também passou a fazer parte, assim como o DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) em 1994 (Monico & Segantine, 1996). As SSC são disponibilizadas por diversos centros de análise que contribuem com o IERS e estão espalhados por todo o globo. O resultado desse processo é uma lista de coordenadas e velocidades das estações que fazem parte de cada um dos ITRFs, bem como os parâmetros de transformação entre as diversas SSC.

A primeira realização do ITRS foi a denominada ITRF-0, em 1988, quando IERS substituiu o BIH (*Bureau International de l'Heure*) na realização do CTRF (*Convencional Terrestrial Reference Frame*). Depois dessa inicial, outras realizações foram efetuadas, como o ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96 até a mais recente denominada ITRF97 (Monico & Segantine, 1996). Encontra-se em fase de publicação o ITRF2000, cujo principal objetivo é a densificação da rede, com a ampliação do número de estações que fazem parte da atual materialização.

A avaliação da compatibilidade das séries do ITRF está intimamente ligada à modelagem da evolução temporal das estações em suas diferentes realizações. Até a realização do ITRF90 as velocidades das estações eram obtidas através de modelos relacionados a teoria Tectônica de placas, enquanto no ITRF91 e ITRF92, tais velocidades passaram a ser estimadas, sendo consistentes com o modelo geofísico NNR-NUVEL-1 (*No Net Rotation – Northern University Velocity Model 1*). Já o ITRF93 possui forçosamente a variação temporal consistente com os parâmetros de evolução da Terra, também produzidos pelo IERS, o que gerou taxas de variação dos parâmetros de transformação com relação às outras realizações do ITRS (Boucher & Altamini, 1996). A evolução temporal do ITRF94 e suas subseqüentes realizações são consistentes com o modelo geofísico NNR-NUVEL-1A, e devido a melhoria na acurácia obtidas em suas materializações, elas podem ser consideradas idênticas (Soler, 1999). A evolução temporal das coordenadas das estações é considerada na transformação de Helmert generalizada.

3. Transformação de Helmert Generalizada

Com o aprimoramento das técnicas espaciais de posicionamento geodésico, como por exemplo o GPS, o nível de acurácia obtido em seus resultados aumentou consideravelmente, o que as tornou sensíveis à pequenas variações que ocorrem na superfície da Terra. Tais variações ocorrem, freqüentemente, pelo movimento das placas litosféricas que compõem a crosta terrestre, os quais geram alterações nas coordenadas das estações com o decorrer do tempo. Por esse motivo, nos referenciais de alta precisão, as coordenadas das estações vêm acompanhadas de suas respectivas velocidades, como é o caso do ITRF. Assim, quando se deseja transformar as coordenadas associadas entre dois referenciais de alta precisão, em épocas distintas, utilizar apenas uma transformação de Hermet, não é suficiente. Neste caso, é necessário considerar a taxa de variação das coordenadas com relação ao tempo. Ela é tratada na transformação de Helmert generalizada que será apresentada a seguir.

Tomando as coordenadas de um ponto P qualquer, associadas em um referencial $ITRF_{yy}$, em uma época de referencia (t_0), pode-se obter as suas coordenadas referenciadas no $ITRF_{zz}$ em uma outra época distinta (t), com a aplicação da transformação de Helmert generalizada, da seguinte forma (Gregorius, 1996; Soler, 1999):

$$\begin{aligned} \vec{X}_{ITRFzz}(t) = & \vec{T} + (1 + s) [\varepsilon + I] [\vec{X}_{ITRFyy}(t_0) + \vec{V}_{ITRFyy}(t_0) (t - t_0)] + \\ & + [\dot{\vec{T}} + [(1 + s)\dot{\varepsilon} + \dot{s}[\varepsilon + I]] \vec{X}_{ITRFyy}(t_0)] (t - t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

onde :

- \vec{T} é a translação necessária para que coincida as origens dos referenciais materializados *ITRFyy* e *ITRFzz*, em outras palavras são as coordenadas da origem do *ITRFyy* no referencial *ITRFzz* em uma época t_0 ;
- e rotações diferenciais, em radianos, em torno dos eixos X, Y e Z do referencial *ITRFyy* para estabelecer paralelismo com *ITRFzz*, na época de referência t_0 ;
- s é o fator diferencial de escala entre os referenciais *ITRFyy* e *ITRFzz* na época t_0 ;
- $\vec{X}_{ITRFzz}(t)$ é o vetor das coordenadas cartesianas do ponto *P* no referencial *ITRFzz* (em unidades métricas) na época t_0 ;
- $\vec{X}_{ITRFyy}(t_0)$ é o vetor das coordenadas cartesianas do ponto *P* na rede de referência *ITRFyy* (em unidades métricas), na época t ;
- $\vec{V}_{ITRFyy}(t_0)$ é o vetor velocidade do ponto *P* (em metros por ano) na época t_0 , devido ao movimento da placa litosférica que o contém ;
- $(t - t_0)$ é o intervalo de tempo expresso em anos e sua fração; e
- $\dot{\vec{T}}, \dot{\varepsilon}, \dot{s}$ são as variações em translação, rotação e fator diferencial de escala, respectivamente, entre os referenciais *ITRFyy* e o *ITRFzz*, com relação ao tempo.

Como pode ser notado na equação (1), para aplicar a transformação de Helmert generalizada, além do vetor velocidade da estação necessita-se conhecer os parâmetros de transformação, os quais são específicos para cada par de referenciais envolvidos e serão apresentados a seguir.

3.1 Parâmetros de Transformação

Os parâmetros de transformação entre os referenciais que materializam o ITRS foram obtidos ao aplicar métodos de ajustamento ao comparar as coordenadas que fazem parte de suas diferentes realizações. No caso do ITRF93, os parâmetros de transformação estão acompanhados por taxas de variação com relação ao tempo, geradas para que este estivesse compatível com os parâmetros de evolução da Terra. Na Tabela (1) são apresentados os parâmetros de transformação entre os diferentes ITRFs e as taxas de variação com relação ao tempo. Os valores apresentados na Tabela (1) são de responsabilidade do IERS (McCarthy, 1996). O ITRF96 e o ITRF97 não estão presentes na Tabela (1), pois entre as materializações mais recentes do ITRF não há parâmetros de transformação, podendo essas, juntamente com o ITRF94, ser consideradas realizações idênticas.

Relação Funcional	T_x (cm)	T_y (cm)	T_z (cm)	s ppb	s_x (ms)	s_y (ms)	s_z (ms)
ITRF88 @ ITRF94 Época 1988,0	-1,8	0,0	9,2	-7,4	-0,1	0,0	0,0

ITRF89 @ ITRF94 Época 1988,0	-2,3	-3,6	6,8	-4,3	0,0	0,0	0,0
ITRF90 @ ITRF94 Época 1988,0	-1,8	-1,2	3,0	-0,9	0,0	0,0	0,0
ITRF91 @ ITRF94 Época 1988,0	-2,0	-1,6	1,4	-0,6	0,0	0,0	0,0
ITRF92 @ ITRF94 Época 1988,0	-0,8	-0,2	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0
ITRF93 @ ITRF94 Época 1988,0	-0,6	0,5	1,5	-0,4	0,39	-0,8	0,96
Variação dos Parâmetros	\dot{T}_x cm/ano	\dot{T}_y cm/ano	\dot{T}_z cm/ano	\dot{s} ppb/ano	$\dot{\epsilon}_x$ ms/ano	$\dot{\epsilon}_y$ ms/ano	$\dot{\epsilon}_z$ ms/ano
ITRF93 @ ITRF94 Época 1988,0	0,29	-0,04	-0,08	0,0	0,11	0,19	-0,05

4. Experimento

Para investigar a compatibilidade das diferentes materializações do ITRS realizou-se uma comparação entre as coordenadas de algumas das estações que as compõem. Como os ITRFs estão referenciados em épocas diferentes, compara-los é possível quando além de transformar para um mesmo ITRF, as coordenadas estiverem referenciadas a uma mesma época. Isto é obtido aplicando a transformação de Helmert generalizada ao utilizar a equação (1) juntamente com os parâmetros apresentados na Tabela (1).

Neste artigo serão consideradas apenas as 5 realizações do ITRS mais recentes (ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96 e o ITRF97), pois são as que tiveram contribuição direta do GPS em sua materialização. A época escolhida para referenciar as coordenadas associadas aos diferentes ITRFs foi 1996,4, pois é a época média aproximada do período em que o GPS faz parte das séries do ITRF. Pelo mesmo motivo, o referencial comum será o ITRF94.

Quanto à escolha das estações a serem consideradas, teve-se a preocupação de que todas fizessem parte das 5 soluções do ITRF a serem avaliadas. Essas estações são apresentadas na Tabela (2) com a respectiva denominação, localização, classificação entre as classes do ITRF94 e a placa litosférica na qual estão localizadas.

A classificação das estações apresentadas na Tabela (2) se refere à qualidade dos resultados obtidos no ajustamento que gerou o ITRF94, onde as estações foram divididas em 4 classes: A, B, C e Z (Monico & Segantine, 1996). As estações pertencentes a classe A apresentaram precisão melhor que 2 *cm* na época 1988,0 e 1993,0. As estações da classe B apresentaram precisão melhor que 3 *cm*. As estações que não se enquadraram nas classes A ou B, mas apresentaram razoável precisão pertencem a classe C. As demais estações pertencem a classe Z. Apesar de não ter sido mantida nas realizações posteriores, essa classificação pode ser uma informação adicional, que pode contribuir na análise dos resultados deste trabalho. As

coordenadas das estações em cada uma das soluções do ITRF não serão apresentadas, mas podem ser facilmente obtidas através do endereço eletrônico do IERS.

Denominação da estação	Localização (Cidade – país)	Classificação no ITRF94	Placa Litosférica
GPS ONSA	Onsala – Suécia	A	Eurásia
GPS MADR	Madri – Espanha	A	Eurásia
GPS TROM	Tromso – Normandia	B	Eurásia
GPS METS	Metsahovi – Finlândia	C	Eurásia
GPS MATE	Matera – Itália	A	Eurásia
GPS WETT	Wetzell –Alemanha	A	Eurásia
GPS GOLD	Goldstone – EUA	A	América do Norte
GPS FAIR	Fairbanks – EUA	B	América do Norte
GPS 7295	Richmond – EUA	A	América do Norte
GPS PIN1Q	Pinyon Plats – EUA	B	Pacífico
GPS VAND	Vandenberg – EUA	A	Pacífico
GPS SANT	Santiago – Chile	B	América do Sul
GPS KOUR	Kourou – Guiana Francesa	B	América do Sul
GPS YAR1	Yarragadee – Austrália	B	Austrália

No ITRF 92, devido a ocorrência de terremotos, houve a necessidade de determinar a posição de algumas estações antes e depois destes fenômenos. Esse é o caso das estações GOLD, PIN1Q e VAND, das quais foram utilizadas nesse trabalho as coordenadas da segunda determinação. Ambas soluções estão disponíveis no site do IERS, onde a segunda determinação é identificada pela sigla PEQ (*Post earthquake*).

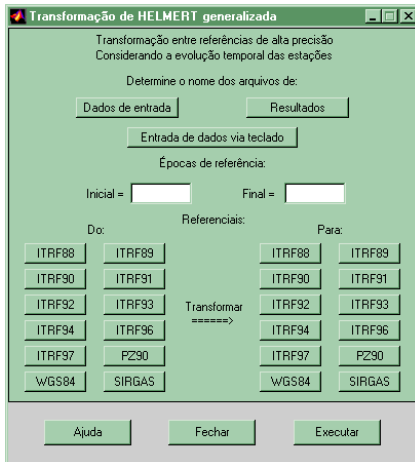



Figura 1 : Ilustração do programa HELGEN para efetuar transformação de Helmert generalizada entre diferentes referenciais de alta precisão.

- clique na imagem para ampliar -

Para facilitar a obtenção dos resultados foi implementado no Matlab, um programa que transforma uma lista de coordenadas pertencentes a um referencial para um outro, aplicando a equação (1), os parâmetros de transformação e o vetor velocidade que acompanha as coordenadas a serem transformadas. Esse programa é denominado HELGEN. A Figura 1 ilustra a tela principal do programa. Para os casos em que os referenciais envolvidos são alguns dos ITRFs, os parâmetros de transformação utilizados nesse programa são os mesmos apresentados na Tabela (1).

Como pode ser visto na  Figura 1, o programa também possibilita transformação de Helmert generalizada envolvendo o WGS84 (*World Geodetic System 1984*) e o PZ90 (*Parametry Zemli 1990*), utilizando para isso parâmetros de transformação adequados para esses referenciais (Malys *et al.*, 1997; Bazlov *et al.*, 1999). O WGS84 e o PZ90 são os referenciais utilizados na elaboração das efemérides transmitidas dos satélites GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), respectivamente (Soler, 1999).

5. Resultados

Utilizando o programa HELGEN, as coordenadas de todas as estações relacionadas na Tabela (2), referenciadas nos 5 ITRFs avaliados, foram transformadas para o ITRF94 na época 1996,4. As coordenadas das mesmas estações, referenciadas no ITRF94, foram atualizadas nessa época e subtraídas dos valores provenientes dos demais ITRFs. Dessas subtrações foram geradas discrepâncias que mostram a compatibilidade entre as redes de referência avaliadas. Esses valores são apresentados nas Figuras (2), (3) e (4) para as coordenadas locais E, N e *h*, respectivamente.

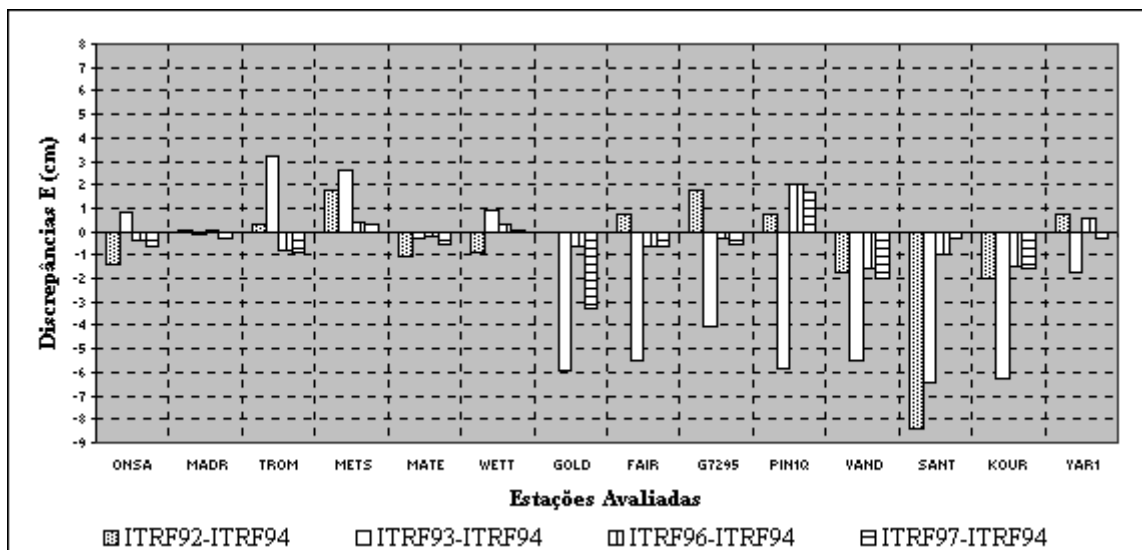


Figura 2 : Discrepâncias para a componente E, época 1996,4.

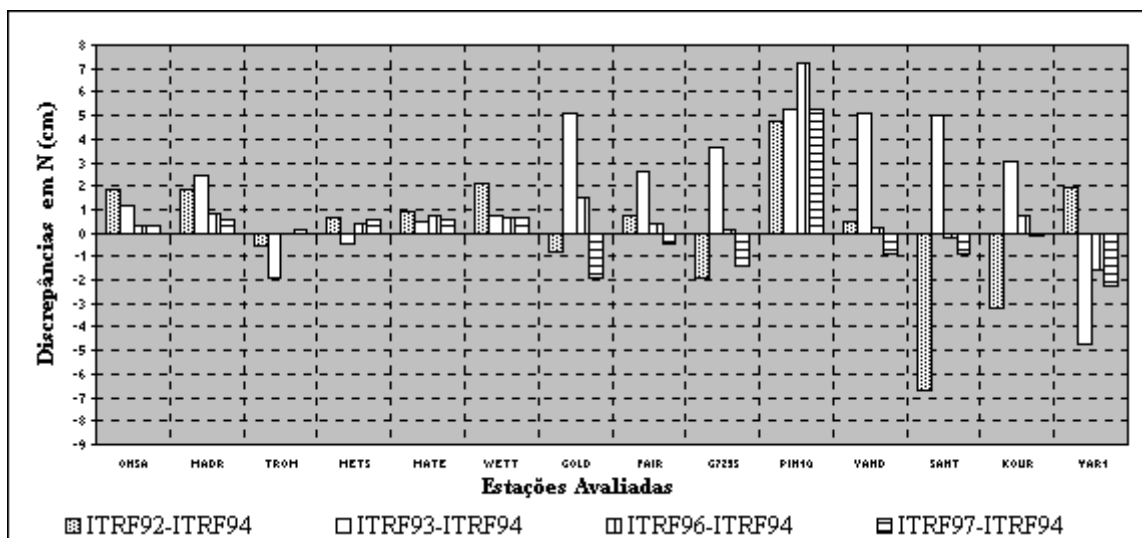


Figura 3 : Discrepâncias para a componente N, época 1996,4.

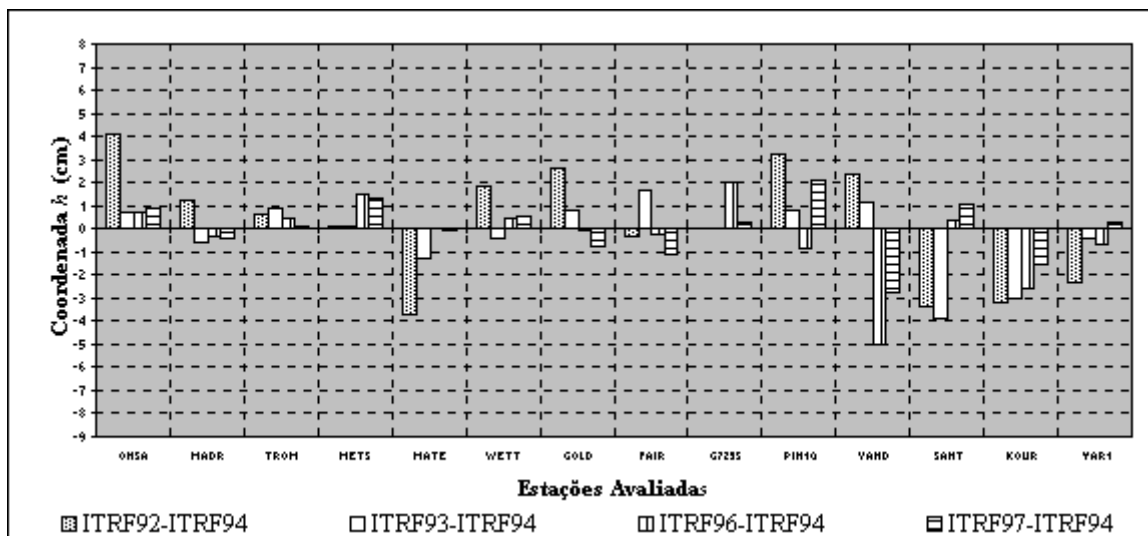


Figura 4 : Discrepâncias para a altitude geométrica h , época 1996,4.

5.1. Análise dos resultados

Considerando os resultados apresentados nas figuras 2, 3 e 4 pode-se notar a ausência de um padrão nas discrepâncias resultantes, ao comparar as diferentes realizações do ITRS. As discrepâncias oscilam de forma que dependendo da estação considerada um referencial apresenta resultados melhores que o outro. No entanto, se alterar essa estação os resultados podem ser diferentes. Mas mesmo sem um padrão definido tais discrepâncias revelam algumas características existentes entre os referenciais que materializam o ITRS.

As médias absolutas das discrepâncias foram de $1,68\text{cm}$, $1,81\text{cm}$ e $1,31\text{cm}$ em E, N e h , respectivamente, mostrando uma melhor compatibilidade na componente h .

Pode-se notar que nos resultados obtidos pelo experimento há a presença de valores positivos e negativos em todas as coordenadas, para cada um dos ITRFs avaliados. Isso indica a possível ausência de erros sistemáticos na aplicação da transformação de Helmert generalizada e nos parâmetros de transformação utilizados.

Em geral, nas componentes E, N e h as discrepâncias maiores foram resultantes do ITRF92 e do ITRF93. No caso do ITRF92, um fator importante que deve ser ressaltado é a época em que suas coordenadas estão referenciadas (época 1988,0), pois é a mais distante da época utilizada no experimento. Como o vetor velocidade não é constante, esse grande intervalo de tempo pode ser responsável pelas expressivas discrepâncias entre o ITRF92 e o ITRF94. No caso do ITRF93, o fato de sua materialização ter sido forçada para ser compatível com os parâmetros de rotação da Terra também deve ser levado em consideração, pois nesse caso a transformação de Helmert generalizada envolveu a aplicação de 14 parâmetros.

Por outro lado, um fato que ficou bastante evidente nos gráficos dos resultados foi a considerável melhora das materializações mais recentes do ITRS, pois as discrepâncias do ITRF96 e do ITRF97 foram geralmente menores. Como pode ser notado na Tabela (1), entre esses referenciais não há a necessidade de aplicar parâmetros de transformação, fato que já revela essa melhoria. Os menores valores obtidos nesses referenciais foram nas estações ONSA, MADR, TRON, MATE, e WETT, que pertencem às classes A e B do ITRF94 e estão localizadas na placa Eurásia. Essas estações apresentaram compatibilidade na ordem de 9 milímetros nas coordenadas locais E e N. Já na altitude geométrica elas apresentam compatibilidade de 15 milímetros.

Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que não há uma relação direta na compatibilidade entre as materializações do ITRS e a classificação das estações efetuada no ITRF94

(apresentada na Tabela (2)). A estação METS, por exemplo, pertencente à classe C, apresenta maior compatibilidade nas realizações mais recentes do que as estações GOLD e VAND, que pertencem à classe A. Outro exemplo é a estação TROM, classificada como B, que apresentou melhores resultados nessas mesmas materializações que a estação VANT, que é da classe A. Se for considerada apenas uma das três componentes das coordenadas locais, há vários outros exemplos que podem ser encontrados pela análise das discrepâncias.

Placas litosféricas	Número de estações	Maiores discrepâncias nas Coordenadas Locais (cm)			
		E	N	<i>h</i>	Todas
Eurásia	6	3,2	2,3	4,2	4,2
América do Norte	3	5,9	5,1	2,7	5,9
Pacífico	2	5,8	7,2	5,0	7,2
América do Sul	2	8,3	6,7	3,9	8,3
Austrália	1	1,9	4,8	2,3	4,8

Uma análise dos resultados do experimento com relação às placas litosféricas pode ser efetuada. Para isso basta comparar os valores das maiores discrepâncias entre as estações pertencentes a cada uma das cinco placas que contém as 14 estações utilizadas (ver Tabela (2)). Na Tabela (3) são apresentadas as maiores discrepâncias nas coordenadas locais entre as estações pertencentes a essas placas litosférica. Os valores da Tabela (3) mostram que a melhor compatibilidade entre os ITRFs foi apresentada pelas estações pertencentes à placa litosférica Eurásia.

6. Conclusões

A partir da análise nos resultados apresentados nesse trabalho pode se concluir que, para as estações consideradas, as materializações do ITRS avaliadas são compatíveis ao nível de 8,4 centímetros. Pode-se constatar também, como já era de se esperar, que as materializações mais recentes (ITRF94, ITRF96 e ITRF97), apresentam melhor compatibilidade, salvo algumas exceções que apresentaram comportamento oposto. Isso pode ser considerado uma indicação da melhoria da qualidade das últimas realizações do ITRS, mostrando que com o passar do tempo há uma evolução no refinamento dessas realizações.

Os resultados apresentados nesse trabalho são insuficientes para determinar com precisão a compatibilidade entre as diferentes materializações do ITRS, mas proporcionam uma boa indicação do que pode ser esperado. Avaliar corretamente essa compatibilidade envolve métodos estatísticos de análise multivariada. Para tanto, deve-se considerar um maior número de estações, as diferentes placas litosférica (e seus movimentos) e as características específicas do comportamento das deformações que são próprias de cada referencial materializado. Essas informações são importantes, pois podem explicar possíveis tendências nas discrepâncias que podem surgir em uma comparação entre as diferentes realizações do ITRS.

7. Referências Bibliográficas

- BAZLOV,E.A.; GALAZIN,V.N.; KAPLAM,B.L.; MAKSIMOV,V.G.; RODOZIN,V.P. – 1999 *GLONASS to GPS: A new Coordinate transformation*, GPS World, 10(1). 54+
- BOUCHER,C.; ALTAMINI,Z. – 1996 : *International Terrestrial Reference Frame*, GPS World, 7(9), 71-74.
- GREGORIUS,T. 1996 : *How it Works...GIPSY OASIS II*, Departament of Geomaties University of Newcastle upon Tyne.
- MCCARTHY,D.D, (ED), – 1996 – *IERS Technical Note 21*, observatoir de Paris, França.
- MALYS,S., SLATER,J.A., SMITH,R.W., KUNZ,L.E.; KEYON,S.C. – 1997 : *Refinements the World Geodetic System 1994*, Proc. 10th Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Kansas City, MO, 1997, 841-850, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, EUA.
- MONICO,J.F.G.; SEGANTINE,P.C.L – 1996 : *ITRF: Definições, Realizações e Aplicações*, Cartografia e Cadastro, Nº 5, pg 31-36, Lisboa.
- Soler,T. – 1999 : *Transformações Rigorosas entre sistemas de Referência de coordenadas: Aplicação ao GPS (ITRF, WGS84) e GLONASS (PZ90)* GeoConvergência, março, 1999, pg 30-38.

Agradecimentos

Este artigo contou com o suporte financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo, Processo Nº 99/04613-8.

Autores
Luiz Fernando Sapucci, Mestrando
Universidade Estadual Paulista -
UNESP
- Câmpus de Presidente Prudente -
Departamento de Cartografia - FCT
Curso de Pós-Graduação em Ciências
Cartográficas
19060-900 Presidente Prudente SP -
Brasil
✉ sapucci@prudente.unesp.br

Prof. Dr. João Francisco Galera
Monico
Universidade Estadual Paulista -
UNESP
- Câmpus de Presidente Prudente -
Departamento de Cartografia - FCT
Curso de Pós-Graduação em
Ciências Cartográficas
19060-900 Presidente Prudente SP -
Brasil
✉ galera@prudente.unesp.br



<http://ueppgps.prudente.unesp.br/>