

# TRANSFORMAÇÃO ENTRE REFERENCIAIS CELESTE E TERRESTRE DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO IAU 2000

João Francisco Galera Monico

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – [galera@prudente.unesp.br](mailto:galera@prudente.unesp.br)

## RESUMO

Com a introdução da Resolução IAU 2000 pela IUGG, que passou a vigorar a partir de 1<sup>o</sup> de janeiro de 2003, algumas modificações foram introduzidas nos modelos de precessão e nutação; conseqüência de melhorias na acurácia das observações envolvidas no processo de monitoração. Os modelos até então utilizados foram substituídos pelo IAU 2000A, podendo ser também utilizado o IAU200B, dependendo da precisão exigida. Nesse artigo tem-se como objetivo apresentar alguns conceitos, bem como os procedimentos a serem adotados para realizar a transformação de um referencial celeste para terrestre, e vice-versa, considerando a nova resolução.

**Palavras-chave:** IAU 2000, Precessão e Nutação, Movimento do pólo, Ângulo de Rotação da Terra.

## TRANSFORMATION BETWEEN TERRESTRIAL AND CELESTIAL REFERENTIALS ACCORDINGLY WITH THE IAU200 RESOLUTION

### ABSTRACT

With the introduction of the IAU 2000 resolution by IUGG, which started to be applied on January 1 2003, some modifications were introduced in the models related to precession and nutation, due to better accuracy of the measurements involved in the process. The models so far used were substituted by IAU 2000A and IAU2000B; the latter for low accuracy. The main aim of this paper is to present some concepts, as well as the procedures to be followed in order to transform from a celestial to a terrestrial referential, and vice-versa, considering the new resolution.

**Keywords:** IAU2000, Precession and Nutation, Wobble motion, Earth rotation angle.

## 1. INTRODUÇÃO

Na Assembléia Geral da IAU (*International Astronomy Union* – Associação Astronômica Internacional), em 1991, através da resolução A4, foi adotada explicitamente a teoria da relatividade como sendo a base para a definição e realização de referenciais (McCarthy, 1992). Em termos de referencial celeste, essa resolução introduziu o BRS (*Barycentric Reference System* – Sistema de referência baricêntrico) e o GRS (*Geocentric Reference System* – Sistema de referência geocêntrico), com origem, respectivamente, no baricentro do sistema solar e no geocentro e com as direções dos eixos coordenados fixas em relação a objetos distantes no universo. Logo, o sistema não deve apresentar rotação global com respeito a uma série de objetos extragalácticos. Adicionalmente, estipulou que o plano principal e respectiva origem deveriam estar tão próximos quanto possível do equador médio e do equinócio dinâmico da época J2000 (McCarthy, 2003, p. 10). Logo, nesse sistema, o eixo X<sup>c</sup>, origem da ascensão reta, aponta muito próximo ao equinócio dinâmico às 12hs TDB (*Barycentric Dynamical Time* – Tempo Dinâmico Baricêntrico), em 1<sup>o</sup> de janeiro de 2000. O eixo Z<sup>c</sup> aponta na direção do Pólo de Referência Convencional, na mesma época, e o eixo Y<sup>c</sup> completa o sistema dextrogiro. Esse sistema foi adotado na Assembléia Geral da IAU em 1997, sob a denominação de ICRS (*International Celestial Reference System* – Sistema de Referência Celeste Internacional) e substituiu o sistema FK5 em 1<sup>o</sup> de janeiro de 1998. Com a aprovação das convenções IERS 2000 (McCarthy, 2003), as siglas BRS e GRS passaram a ser denominadas BCRS e GCRS respectivamente (C advém de *Celestial* - Celeste).

No ICRS, quer seja o BCRS ou o GCRS, as direções fundamentais permanecerão fixas no espaço, independentemente do modelo que descreve o movimento dos objetos do sistema solar. Esses objetos

serão monitorados e suas posições eventualmente re-estimadas de acordo com a qualidade e a disponibilidade de informações, mas as direções dos eixos coordenados serão mantidas fixas.

Para que as várias realizações do sistema celeste tenham continuidade, as orientações dos eixos do ICRS devem ser consistentes com o equador e equinócio na época J2000, tal como considerado no FK5. Desta forma, como as novas realizações do ICRS são de melhor qualidade que o FK5, elas podem ser consideradas como refinamento do mesmo.

O ICRS é materializado por uma série de coordenadas equatoriais, ascensão reta e declinação, de fontes de rádio extragaláctico *quasars* (*Quasi Stellar Radio Source*), determinadas a partir da técnica de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Realizações do ICRS, que é o referencial estabelecido pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service* – Serviço Internacional de Rotação da Terra e de Sistema de Referência), denominado ICRF (*ICRS Celestial Reference Frame*), vinham ocorrendo anualmente entre 1989 e 1995. O IERS propôs que a versão de 1995 fosse adotada como sendo o ICRS, o que foi oficialmente aceito, conforme já citado, na assembleia da IAU de 1997. A última realização é de 1999, e conta com 667 objetos (IERS, 1999). A manutenção do ICRS requer que a estabilidade das coordenadas das fontes seja monitorada através de novas observações VLBI e análises. As atualizações aparecem nas publicações do IERS.

Uma realização do ICRS dentro do espectro visível é o catálogo Hipparcos, o qual contém uma lista de coordenadas de 118218 estrelas para a época J1991,25, com precisão da ordem de 0,77 e 0,64 *mas* (um milionésimo do arco de segundo) em ascensão reta e declinação respectivamente (McCarthy, 2003 p. 12). Essas coordenadas foram determinadas usando o telescópio óptico do satélite Hipparcos (*High Precision Parallax Collecting Satellite*). Trata-se de uma realização de melhor qualidade que o FK5.

A vinculação do ICRF com um referencial prático de ser utilizado no posicionamento por satélite se concretiza através do ITRF (*ICRS Terrestrial Reference Frame* – Realização do referencial terrestre do IERS).

O ITRS (*International Terrestrial Reference System* - Sistema de Referência Terrestre Internacional) é um sistema de referência espacial que rotaciona com a Terra em seu movimento no espaço. Idealmente, tem origem no centro de massa da Terra e orientação equatorial (eixo  $Z^T$  aponta na direção do pólo). De acordo com recomendação emanada da resolução N<sup>o</sup> 2 da IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics* – Associação Internacional de Geodésia e Geofísica), adotada em Viena em 1991, esse sistema deve atender as seguintes definições (McCarthy, 2003; McCarthy, 1996):

- é geocêntrico, e o centro de massa é definido usando a Terra toda, incluindo oceanos e atmosfera;
- a escala é consistente com o TCG (Tempo Coordenado Geocêntrico) para um referencial geocêntrico;
- sua orientação inicial foi dada pela orientação do BIH (*Bureau International de L'Heure*) na época 1984,0; e
- sua evolução temporal em orientação é assegurada pelo uso da condição de rede que não rotaciona com respeito ao movimento tectônico horizontal sobre toda a Terra.

Em essência, o CTRS é um sistema fixo na Terra, isto é, ele rotaciona com ela. No que concerne à escala, ela está diretamente relacionada com a referência de tempo utilizada. Na determinação das órbitas dos satélites com alta precisão, onde aparece um sistema de tempo, os efeitos relativísticos devem ser levados em consideração. A evolução temporal em orientação é garantida pela introdução da condição de um referencial NNR (*No Net Rotation* – Rede Sem Rotação) (McCarthy, 1996; McCarthy, 2003). Essas duas condições foram efetivamente implementadas no ITRF2000.

Realizações do CTRS são produzidas pelo IERS ITRS-PC (ITRS *Product Center*- Centro de produção do ITRS). Cada realização é composta por um catálogo de coordenadas e velocidades de um grupo de estações IERS. Em geral, essas estações têm sido levantadas com VLBI, SLR (*Satellite Laser Range*), GPS e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*). Cada uma das realizações é designada por ITRF-yy (*International Terrestrial Reference Frame*) O número yy deve especificar os dois últimos dígitos do último ano cujos dados contribuíram com a realização em consideração (Boucher and Altamimi, 1996).

No posicionamento por satélite, os referenciais de interesse são geocêntricos, pois os satélites têm como origem de seu movimento o centro de massa da Terra. Logo, em termos de referenciais celeste e terrestre, o interesse é pelo GCRS e ITRS respectivamente. Classicamente, a transformação do GCRS para o ITRS é efetuada usando uma seqüência de rotações que levam em consideração a precessão (P), a nutação (N), a rotação e orientação da Terra (S), incluindo o movimento do pólo. Com a introdução da resolução IAU 2000, algumas modificações foram introduzidas nos modelos até então utilizados e amplamente divulgado na literatura especializada (Gemael, 1981; Seeber, 2003; Bock, 1998; Hofmaan Wellenhof et al., 1997; Leick, 1985; Monaco 2000).

Considerando o exposto, o objetivo do presente artigo é apresentar de forma sucinta os conceitos envolvidos, considerando a nova resolução, bem como os procedimentos para realizar a transformação entre referenciais celeste e terrestre que atenda a nova resolução. Exemplos práticos serão apresentados.

## 2. TRANSFORMAÇÃO ENTRE SISTEMAS CELESTE E TERRESTRE

Com a introdução da Resolução IAU 2000, os modelos até então utilizados (IAU1976 para precessão e IAU 1980 para nutação) foram substituídos pelo IAU 2000A, podendo ser também utilizado o IAU200B, dependendo da precisão exigida. Enquanto o primeiro proporciona precisão da ordem de 0,2 *mas* (mili arcos de segundos), no segundo esse valor reduz para 1 *mas* (McCarthy, 2003, p.33).

Em face dessas alterações, ao realizar as transformações de precessão e nutação, o que se obterá será um sistema de Coordenadas Celeste Intermediário (CCI), ao invés do verdadeiro, como até então comparecia na literatura (Gemael, 1981; Monico 2000). Logo, o pólo celeste realizado é denominado CIP (*Celestial Intermediate Pole* - Pólo celeste intermediário), em substituição ao CEP (*Celestial Ephemeris Pole* – Pólo celeste das efemérides). A direção do CIP na época J2000,0 tem que ser compensada em relação ao pólo do GCRS de forma consistente com o novo modelo de precessão e nutação. O movimento do CIP no GCRS (precessão e nutação) é realizado através dos modelos citados para períodos maiores que dois dias, acrescido de correções dependentes do tempo, as quais serão proporcionadas pelo IERS, através de observações astro-geodésicas. Isso requer do IERS o monitoramento dessas correções. O movimento do CIP no ITRS (movimento do pólo) também é proporcionado pelo IERS, através de observações astro-geodésicas e modelos que incluem variações de alta frequência. Logo, a nutação para período menores que dois dias (nutação forçada), é introduzida no modelo de movimento do CIP no ITRS.

Para realizar a transformação compatível com a nova resolução, mas utilizando as expressões baseadas nos modelos IAU 1976 de precessão e IAU 1980 para nutação, deve-se proceder como comparece na literatura (Gemael 1981; Seeber, 2003; Monico 2000) e aplicar correções ao modelo. A acurácia ficará restrita a do modelo IAU 2000B de precessão e nutação.

A transformação de um sistema celeste para terrestre, segundo o novo conceito é dada por:

$$\overset{p}{X}^T = W(t)R(t)Q(t)\overset{p}{X}^c \quad (01)$$

onde  $W(t)$ ,  $R(t)$  e  $Q(t)$  representam, respectivamente, as matrizes de rotação resultante do movimento do pólo, ângulo de rotação da Terra e do movimento do pólo celeste no sistema celeste (precessão e nutação).

A matriz  $W(t)$  é obtida a partir de:

$$W(t) = R_3(s')R_2(-x_p)R_1(-y_p) \quad (02)$$

com  $x_p$  e  $y_p$  as coordenadas do pólo e  $s'$  sendo uma quantidade que proporciona a posição do TEO (*Terrestrial Ephemeris Origin* - Origem terrestre das efemérides) no ITRS. (McCarthy, 2003, p.35). Essa quantidade só é sensível a grandes variações no movimento do pólo, sendo que a mesma será menor que 0,4 *mas* no próximo século. Ela pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$s' = -47uas t \quad (03)$$

onde *uas* representa micro arcos de segundo. O parâmetro  $t$  é definido por:

$$t = (TT - 2451545,0) / 3625,0 \quad (04)$$

e  $TT$  representa tempo terrestre, sendo que

$$TT = TAI + 32,184s = T_{GPS} + 19s + 32,184s \quad (05)$$

sendo  $TAI$  o tempo atômico internacional e  $T_{GPS}$  o tempo GPS.

A matriz  $R(t)$  é obtida a partir do ângulo de rotação da Terra ( $\theta(t)$ ). Esse ângulo é medido sobre o equador do CIP, entre o CEO (*Celestial Ephemeris Origin* - Origem das efemérides celeste) e o TEO. As figuras 1 e 2 mostram os elementos envolvidos nos referenciais celeste e terrestre e a relação entre o CEO, TEO e ( $\theta(t)$ ). O ângulo de rotação da Terra é obtido a partir de sua relação linear com o  $UT_1$ :

$$\theta(Tu) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448Tu) \quad (06)$$

com  $Tu = (\text{Data Juliana em } UT_1 - 2451545,0)$ . Os termos CEO e TEO, de acordo com a resolução B1.8 da IAU 2000, referem-se a origens não sujeitas a rotação no GCRS e ITRS respectivamente. Importante lembrar que

$$UT_1 = UTC + DUT_1, \quad UTC = TAI - n^0 \text{ de saltos de segundos (32 s at é 31/12/2004)} \quad (07)$$

sendo que  $UTC$  representa o tempo universal coordenado e  $DUT_1$  é fornecido pelo IERS juntamente com os elementos do movimento do pólo. Para maiores detalhes, consulte McCarthy (2003, p.39).

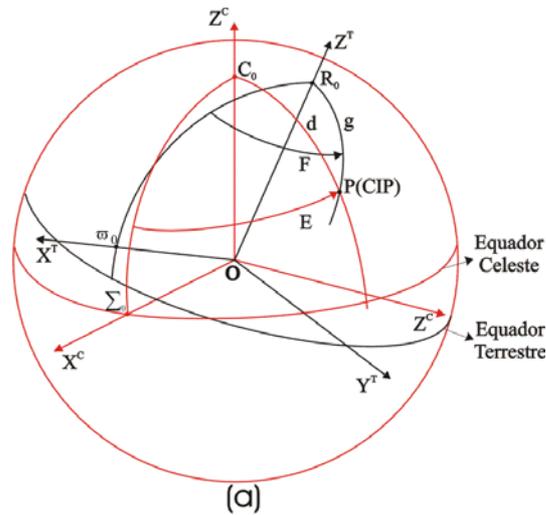


Figura 1: Referenciais Terrestre e Celeste no contexto da resolução IAU 2000

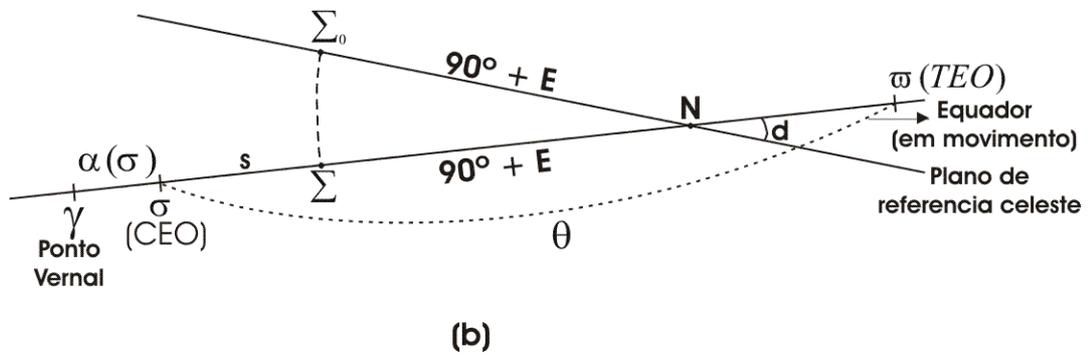


Figura 2: Definição do CEO, TEO e ângulo de rotação da Terra  $\theta$

A matriz  $Q(t)$ , é obtida a partir da seguinte expressão:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - ax^2 & -axy & x \\ -axy & 1 - ay^2 & y \\ -x & -y & 1 - a(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \cdot R_3(s) \quad (07)$$

com  $a = 1/2 + 1/8(x^2 + y^2)$ .

As coordenadas  $x$  e  $y$  proporcionam a posição do CIP no GCRS, baseadas nos modelos IAU2000A ou IAU2000B. A quantidade  $s$  proporciona a posição do CEO no equador do CIP (Fig. 2). As séries para obtenção das coordenadas celestes do CIP e o valor de  $s$  estão disponíveis em McCarthy, (2003). Mas as análises das observações VLBI têm mostrado que ainda ocorrem deficiências no novo modelo. Desta forma, o IERS irá publicar as correções para serem aplicadas ao modelo. Tratam-se das correções do pólo celeste (*celestial pole offset*), denominadas de  $\delta x$  e  $\delta y$ , para serem aplicadas em  $x$  e  $y$  respectivamente.

É importante citar que o IERS disponibiliza o código de rotinas em linguagem Fortran que permitem implementar a resolução IAU 2000. Elas estão disponíveis em <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5>. Algumas rotinas adicionais, necessárias para a completa implementação, estão disponíveis em <http://www.iau-sofa.rl.ac.uk>. Trata-se de uma série de rotinas que compõem o SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*). Nesse endereço pode-se encontrar também a própria implementação dos modelos IAU 2000.

Desde janeiro de 2003 os serviços do IERS estão publicando seus boletins (Bulletin A, Bulletin B e C04EOP-PC) contendo as quantidades  $\delta x$  e  $\delta y$  com respeito ao modelo de precessão e nutação IAU2000A, além de conter os parâmetros publicados até então.

### 3. EXEMPLO PRÁTICO DE TRANSFORMAÇÃO UTILIZANDO O NOVO CONCEITO

#### 3.1. OS PACOTES DE SUBROTINAS E FUNÇÕES DO IERS E DO SOFA PARA TRANSFORMAÇÃO

Há duas formas de implementar a resolução IAU para transformar do ITRS para o GCRS, tendo como base a equação 1. A nova transformação é baseada no CEO e  $\theta$  (ângulo de rotação da Terra), enquanto que também é possível usar a transformação baseada no equinócio e Tempo Sideral Aparente de Greenwich (GST). Para ambas, o IERS disponibiliza um conjunto de sub-rotinas e funções apropriadas para esse fim. Para detalhes o leitor pode consultar a seguinte página na Internet: <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5> (acessada em 20 de maio de 2004).

Para ambos casos, o movimento do pólo ( $W(t)$ ) da equação 1 é obtido via a utilização da rotina POM2000, requerendo para tanto os parâmetros de movimento do pólo ( $x_p$ ,  $y_p$ ) e a quantidade  $s'$ . Essa última é obtida a partir da função SP2000.

A matriz do efeito combinado da precessão e nutação acrescida de um efeito corretivo, resultando na matriz  $Q(t)$ , para a transformação baseada no CEO, é obtida a partir da sub-rotina BPN2000, tendo como dados de entrada as coordenadas  $x$  e  $y$  do CIP e a quantidade  $s$  que define o CEO. As coordenadas do CIP e  $s$  são obtidas a partir da rotina XYS2000A. Para a transformação baseada no equinócio, a obtenção da matriz  $Q(t)$  requer as componentes de nutação  $\Delta\psi$  e  $\Delta\epsilon$ , que podem ser preditas utilizando o modelo IAU2000A por meio da sub-rotina NU2000A. De posse das componentes da nutação, a matriz  $Q(t)$  pode ser obtida a partir da rotina CBPN2000.

O componente intermediário é o ângulo de rotação da Terra que define a matriz  $R(t)$  na expressão 1. Enquanto na transformação baseada no CEO, o ângulo em questão é  $\theta$ , o qual é obtido a partir da sub-rotina ERA2000; no outro caso, trata-se do GST, que pode ser obtido pela chamada da rotina GST2000, necessitando da nutação em longitude  $\Delta\psi$ , que foi obtida anteriormente.

Finalmente, de posse dos três componentes ( $W(t)$ ;  $Q(t)$  e  $R(t)$ ), e utilizando a sub-rotina T2C2000, obtém-se a matriz que proporciona a transformação do sistema terrestre para celeste. Para a transformação de celeste para terrestre, basta inverter a matriz resultante da sub-rotina T2C2000.

#### 3.2. APLICAÇÃO NAS COORDENADAS DOS SATELITES DADAS EM ITRF2000

Visando ilustrar uma aplicação simples e muito utilizada em softwares científicos, apresenta-se a seguir o caso da aplicação da transformação de um referencial terrestre para o celeste. Para tanto, as coordenadas do satélite GPS, PRN 1, para o dia 02 de junho de 2003, dadas em ITRF2000 para essa data, foi transformada para o GCRS.

As coordenadas dos satélites são dadas em função do tempo GPS. Logo, o tempo GPS teve que ser transformado para tempo terrestre (TT), conforme equação (05). Do Boletim B do IERS obteve-se os valores de  $x_p = 0,02134''$ ,  $y_p = 0,54699''$  e  $DUT1 = -0,4$  s.

A Figura 3 mostra as coordenadas do satélite ( $X_t$ ,  $Y_t$  e  $Z_t$ ) no ITRS (sistema terrestre). A Figura 4 mostra a mesma situação, mas no GCRS (sistema celeste), com as coordenadas obtidas a partir da transformação.

Das figuras 3 e 4 pode-se observar que as coordenadas apresentam comportamentos característicos em cada um dos sistemas. A diferença fundamental entre eles se deve ao movimento de rotação da Terra, haja vista que o sistema terrestre rotaciona com ela, o que não ocorre no celeste.

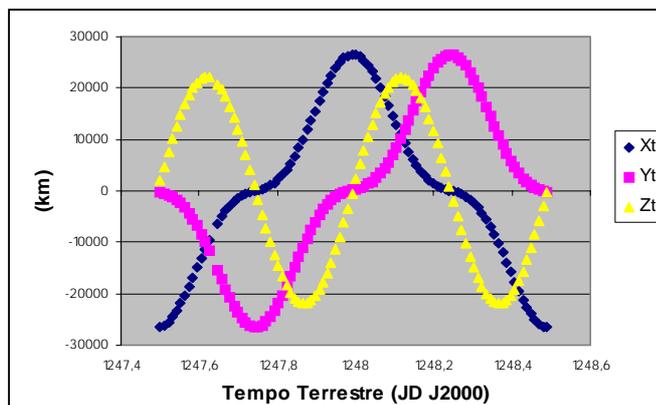


Figura 3: Coordenadas do PRN1 (GPS) no ITRS

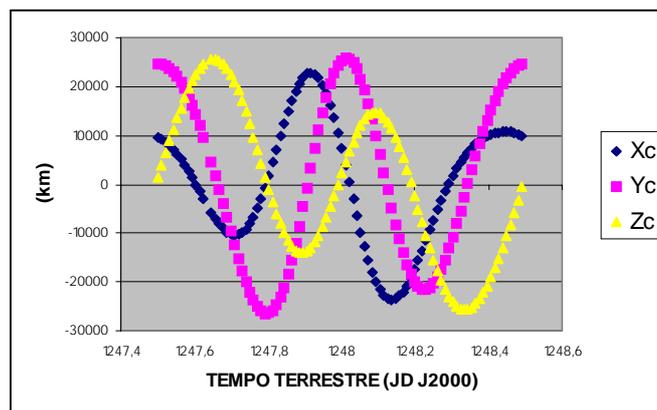


Figura 4: Coordenadas do PRN1 (GPS) no GCRS

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Foram apresentados os novos conceitos e procedimentos envolvidos na transformação entre referenciais terrestres e celestes, baseados na resolução IAU 2000. O procedimento tradicional, baseado no equinócio vernal e tempo sideral de Greenwich foi substituído por um novo, o qual fica baseado no CEO e  $\theta$ . Esse último apresenta uma relação linear com o UT1.

Foi realizada uma aplicação para ilustrar o procedimento. As coordenadas do satélite GPS, PRN 1, dadas em ITRF2000, foram transformadas para o GCRS. Trata-se de uma aplicação muito utilizada em softwares científicos destinados ao processamento de dados GPS.

Outras possibilidades poderão ser exploradas pelos leitores, bastando para tanto utilizar as referências apresentadas no texto.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOUCHER, C.; ALTAMIMI Z. **International Terrestrial Reference France**. GPS World, p. 71-4, September 1996.
- GEMAEL C. **Referenciais Cartesianos utilizados em Geodesia**, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, 1981,
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. 4.ed. Wien: Springer-Verlag, 1993. 326 p.
- IERS 1999 **International Earth Rotation Service Annual Report**, Observatoire de Paris, Paris, 1999.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New York: John Wiley & Sons, 1995.560p.
- McCARTHY D. D. **IERS Standards (1992)**, IERS Technical Note 13, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, 150p., 1992.
- McCARTHY D. D. **IERS Conventions (1996)**, IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, 95p., 1996.
- McCARTHY D. D. **IERS Standards (2000)**, IERS Technical Note 23, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, 138p., 2003.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000. 287 p.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 586 p.
- BOCK Y. Reference Systems. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2 ed. Berlin: Springer Verlage, 1998a, p. 1-41.

#### 6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao CNPq pelo apoio financeiro por meio de bolsa PQ (Processo 308456/2003-3).