

A EVOLUÇÃO DOS REFERENCIAIS USADOS EM GEODÉSIA

A Era Moderna

Denizar Blitzkow
Ana Cristina Cancoro de Matos
EPUSP-PTR
Caixa posta 61548
05424-970 São Paulo – SP
E-mail: dblitzko@usp.br

Edição de março de 2007, revisada do artigo publicado no Boletim de Ciências Geodésicas, vol 8, no. 1, pp. 3 - 16.

RESUMO

A Era Espacial permitiu desenvolver metodologias de observação que levaram ao estudo de fenômenos até então impossível de ser realizado. Pode-se citar o deslocamento das placas litosféricas, as marés terrestres e oceânicas, os movimentos do eixo de rotação da Terra, as variações da velocidade de rotação da mesma, o movimento dos satélites artificiais, etc. A qualificação e a quantificação destes fenômenos exigem o estabelecimento de referenciais adequados. Após anos de estudo e análise concluiu-se que dois referenciais seriam suficientes para quantificar todos os fenômenos relacionados com os interesses da geodésia, da engenharia e da geodinâmica: um referencial terrestre e um referencial celeste. A conceituação, a definição e a realização dos referenciais constituem as etapas naturais para o seu estabelecimento e a sua manutenção. Através de observações espaciais, seja a corpos celestes seja aos satélites artificiais, os referenciais são materializados. O presente trabalho apresenta uma descrição geral da evolução dos referenciais na era moderna, de seu estabelecimento e de sua manutenção, função atribuída atualmente ao IERS.

ABSTRACT

The Space Era brought the attention to methodologies of observation that allowed the study of phenomena impossible to be considered a few years ago. The lithospheric plates, the earth and ocean tides, the movements of the Earth rotation axis, the change in the angular velocity, the movements of artificial satellites are some examples. The qualification and quantification of these phenomena are only possible if convenient reference systems are established. After many years of analysis and research the attention was addressed to two reference coordinate systems: a terrestrial reference system and a celestial reference system. They are sufficient to deal with all geodetic, engineering and geodynamic phenomena. The concept, the definition and the materialization are the natural steps for the establishment and the maintenance of the reference systems. The materialization is carried out through the observation of satellites as well as space objects. This paper is intended to present a description on the evolution of the reference systems and the present maintenance on the responsibility of IERS.

1. Introdução

Conforme o dicionário Webster, "Geodésia é um ramo da matemática aplicada que se preocupa com a determinação do tamanho e da forma da Terra, com a exata

posição de pontos sobre a sua superfície e com a descrição das variações do seu campo de gravidade". Com certeza a Geodésia atual vai muito além disso; não é simples matemática aplicada e nem se dedica exclusivamente a um processo de observações.

Entre muitos exemplos de fenômenos com os quais a Geodésia tem envolvimento, sabe-se que a atmosfera é a fonte principal de excitação da rotação da Terra em escala sazonal e interanual. Em consequência, o momento angular da Terra (duração do dia), é muito correlacionado com o momento angular atmosférico (MAA) axial. Além disso, incertezas do vapor de água na atmosfera e os seus efeitos na propagação de sinais são reconhecidamente algo que merece a atenção no uso do VLBI (Very Long Baseline Interferometry), no GPS (Global Positioning System) ou mais genericamente no GNSS (Global Navigation Satellite System) e no SLR (Satellite Laser Range). Estas características vêm integrando a Meteorologia com a Geodésia e são estudados e analisados através de redes GNSS de monitoramento contínuo. A análise das observações destas redes permite ainda a determinação do TEC (Total Electron Content) na ionosfera. Mas não fica por aí as interações da geodésia com outras atividades. O objetivo primordial do GPS, posicionamento instantâneo com precisão de poucos metros, tem aplicação na navegação terrestre, aérea e marítima; no controle de frotas com consequências positivas na logística de transportes; na agricultura de precisão com benefícios na avaliação da produtividade e no uso racional dos insumos agrícolas. Além disso, as medidas precisas (centimétricas) do GPS, possíveis através da técnica de 'Fase de Batimento da Portadora', permitem aplicações na área da engenharia tanto na locação de obras quanto no monitoramento de grandes estruturas.

O aprimoramento das redes GPS, as modernas missões CHAMP (**C**hallenging **M**inisatellite **P**ayload) e GRACE (**G**ravity **R**ecovery and **C**limate **E**xperiment) e a futura missão (2007/2008) GOCE (**G**ravity field and steady-state **O**cean **C**irculation **E**xperiment), permitem vislumbrar novos e desafiadores interesses. Um ponto importante a focalizar é a variação no tempo do campo gravitacional. Avaliações do referido campo através de satélites já indicaram avanços consideráveis no entendimento da estrutura e da dinâmica núcleo/manto, da estrutura térmica e dinâmica na litosfera, da circulação oceânica e da tectônica de placas [Dickey, 2001].

Observa-se, desde o início do último século, um desequilíbrio progressivo do efeito estufa devido a um aumento de certos gases na atmosfera, em particular, o CO₂. A consequência direta é o aumento constante da temperatura da Terra. Um dos efeitos imediatos é a elevação do nível médio do mar que vem ocorrendo, em caráter global, à taxa de 1 – 3 mm/ano no último século. As fontes para a elevação do nível do mar ainda são incertas. A expansão térmica dos oceanos é, com certeza, a mais importante. Mas, o derretimento das geleiras nas altas montanhas e das calotas polares certamente contribui de forma considerável. Isto acarreta numa redistribuição de massas cujo efeito é a variação, no tempo, do campo gravitacional e, portanto, da superfície geoidal.

No passado se dividia a geodésia em física, geométrica e espacial. Esta divisão perdeu sua razão de ser em função da interação que existe entre as metodologias que envolvem as atividades envolvidas nas três áreas. A tendência atual é separar três objetos distintos da geodésia: a geometria da Terra, os parâmetros de orientação do planeta no espaço e o campo de gravidade envolvendo o geóide. Enfim, pode-se

concluir que a Geodésia tem um envolvimento muito grande com várias atividades da geociência.

2. A Geodésia e a Astronomia

A Geodésia tem uma estreita e antiga relação com a Astronomia no que diz respeito ao estabelecimento de referenciais. A Astronomia basicamente se dedica à observação dos corpos celestes: estrelas, planetas, cometas, quasares, etc., a partir de suas radiações luminosas. Ela possui três razões para isso. Um dos primeiros interesses desde as antigas civilizações pela observação das estrelas foi quantificar a emissão de luz das mesmas, objeto da fotometria. Registros muito antigos da astronomia já classificavam os corpos celestes em ordem de grandeza em função da intensidade luminosa que chegava ao observador. Por outro lado, observando uma estrela em diferentes épocas, pode-se verificar se a luminosidade varia com o tempo. O estudo desta variabilidade leva a vários fenômenos associados às estrelas: pulsação, sistemas múltiplos, explosões, micro lentes gravitacionais, etc. Um outro interesse bastante antigo é pela posição do astro, objeto da astrometria. Embora o maior interesse seja na posição espacial, o não conhecimento das distâncias da grande maioria dos astros faz com que, quase sempre, a palavra posição signifique a direção de onde vem a luz, isto é, a posição do astro na esfera celeste. Neste aspecto, há diversas possibilidades de posicionar o astro, mas a que se mostrou mais conveniente, por independe do movimento de rotação da Terra, foi através das coordenadas equatoriais (uranográficas): ascensão reta e declinação. Esta aplicação une mais intimamente a Geodésia e a Astronomia. Finalmente, a era mais moderna permitiu desenvolver sensores para medir o espectro das radiações oriundas das estrelas, caracterizando a espectroscopia. Entre outras possibilidades, consegue-se depreender a existência de raias de comprimentos distintos de onda no espectro. Isto leva a conclusões sobre, por exemplo, a constituição físico-química do astro.

Para a Geodésia, a astrometria caracteriza a aplicação mais fundamental uma vez que este tipo de observação, conduzida através de um equipamento ótico (luneta) ou mais recentemente eletrônico (VLBI), permite a definição e a materialização do sistema celeste de referência.

Por outro lado, para entender conceitos a serem estabelecidos nos parágrafos a seguir, é essencial considerar certos fenômenos associados com a observação de um astro. O primeiro deles é a paralaxe. Trata-se da aparente mudança de posição (direção) do corpo celeste (deslocamento paralático) que ocorre quando se muda a posição do observador. Isto tem origem em distintos aspectos relacionados ao observador. A observação em instantes diferentes resulta numa paralaxe chamada diária, fruto do deslocamento do ponto de observação, em consequência do movimento de rotação da Terra. Por outro lado, se o observador estiver sobre a superfície da Terra ou for imaginado no centro de massa da mesma, haverá uma paralaxe devido ao deslocamento correspondente. Além disso, a Terra tem seu movimento de translação ao redor do Sol, o que resulta na chamada paralaxe anual, com diferentes direções do astro em épocas distintas do ano. Assim sendo, a observação do astro a partir da superfície física da Terra resulta na determinação de direções vinculadas a um referencial topocêntrico. Se houver necessidade de referir as direções ao geocentro ou ao baricentro do sistema solar é preciso eventualmente corrigir a paralaxe resultante da translação correspondente. Um

segundo fenômeno é a aberração. A título de ilustração, observe-se o que ocorre com um transeunte em dia de chuva; parado, na presença de uma chuva sem vento, ele observa os pingos caindo verticalmente. Ao se deslocar, a sensação é de que os pingos caem inclinados vindos na direção contrária ao movimento e, espontaneamente, inclina o guarda-chuva. Como consequência dos movimentos do observador (rotação e translação) e do fato da velocidade da luz ser finita, este mesmo fenômeno deslocará a luz que é recebida dos astros na direção do movimento do observador.

Em função dos movimentos de um observador na superfície da Terra, eventualmente com acelerações não desprezíveis, a utilização do baricentro do sistema solar como origem de um sistema de referência, representa uma aproximação muito melhor de um referencial inercial. Isto é possível dentro da relatividade geral.

3. Coordenadas Geodésicas e Cartesianas

Segundo se lê em [Gemael, 1981] “até há bem pouco, os geodestas se valiam de dois escalares — a latitude (ϕ_G) e a longitude (λ_G) — para definir, não a posição de um ponto P sobre a superfície física da Terra, mas de sua projeção P' sobre a superfície do modelo de referência adotado, o elipsóide de revolução (fig. 1); um terceiro escalar — a altitude ortométrica (H) — relaciona o ponto P com o geóide (superfície equipotencial fundamental do campo de gravidade). Este terceiro número, de natureza física e não geométrica como os anteriores, não constitui com aqueles um

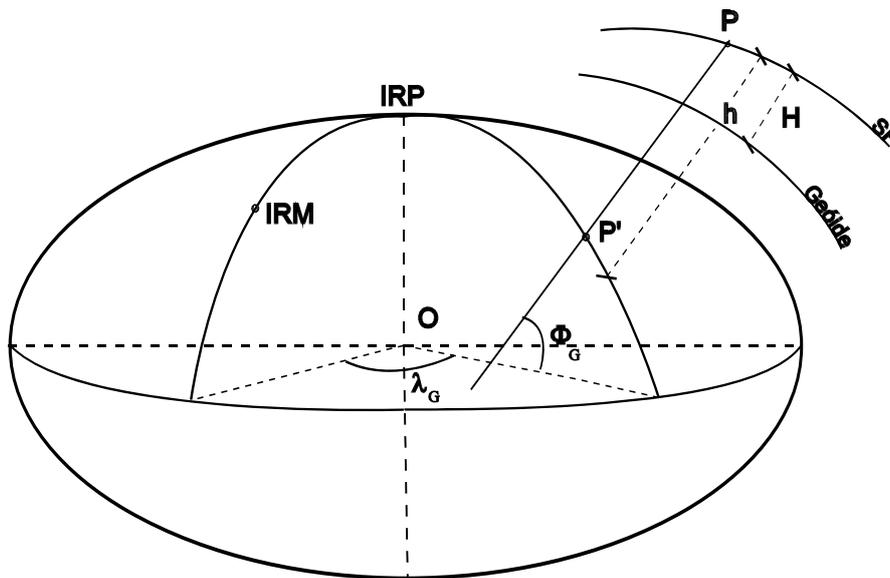


Fig. 1 – Representação das coordenadas geodésicas no elipsóide.

conjunto capaz de fixar a posição de um ponto no espaço. Primeiramente as duas redes, horizontal (triangulação, ϕ e λ) e vertical (nivelamento, H), são independentes. Em segundo lugar, a altitude ortométrica não define a posição do ponto em relação ao elipsóide, mas sim ao geóide”. Finalmente, há que ressaltar que a determinação da altitude ortométrica depende do conhecimento da distribuição de densidades no interior da crosta; os modelos existentes de distribuição de densidade ainda são insuficientes

para o cálculo da altitude ortométrica a partir do nivelamento geométrico, ao menos em caráter continental e dentro das precisões exigidas, e.g., na geodésia e na engenharia.

A partir da década de 60, o desenvolvimento da Geodésia Celeste (tridimensional), através do posicionamento por satélite, permitiu obter as coordenadas cartesianas (y_1, y_2, y_3) do centro elétrico da antena numa estação de rastreamento, referidas a um terno cartesiano "geocêntrico" (Y_1, Y_2, Y_3). Tais coordenadas podem ser transformadas para um terno cartesiano "quase-geocêntrico" ou "local", isto é, com origem no centro geométrico do elipsóide, e convertidas em curvilíneas (ϕ, λ, h), h representando a altitude geodésica ou elipsoidal, consistente com as duas outras coordenadas em função do elipsóide adotado (Fig. 1).

4. Referenciais: motivação e conceituação

A Terra, seu meio ambiente e os corpos celestes em geral, não são estáticos: deslocam-se, giram e podem se deformar. Vários fenômenos dinâmicos podem ser citados como exemplos:

- movimentos de placas da litosfera: inter-placa e intra-placa
- marés oceânicas e terrestres
- efeitos de carga sobre a crosta (e.g., soerguimento pós-glacial)
- movimento de rotação
- deslocamento do eixo de rotação
- comportamento dinâmico do sistema Terra-Lua
- movimento dos planetas e dos satélites, etc.

O estudo qualitativo e quantitativo de tais fenômenos exige o estabelecimento de referenciais adequados. A Era Moderna, valendo-se das técnicas espaciais, conseguiu aprofundar os estudos e chegou a uma conclusão definitiva em relação ao problema da referência. As etapas racionais necessárias para o estabelecimento de um sistema de referência estão equacionadas em [Oliveira, 1998] e são assim enunciadas:

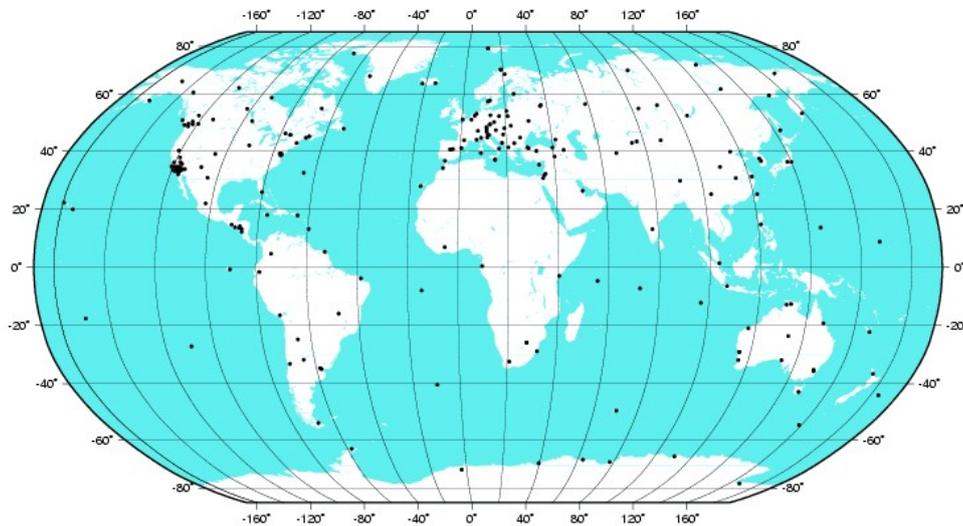
Conceito
Definição
Materialização
Densificação

Do ponto de vista **conceitual** um referencial ideal seria aquele em que a origem seguisse a lei newtoniana da inércia (se mantivesse em repouso ou em movimento retilíneo uniforme). Um referencial em que a origem seja o centro de massa da Terra não pode ser definido como inercial por força do movimento de translação que implica numa aceleração da origem. Esta aceleração é pequena e daí a razão para qualificar o referencial de "quase-inercial". Porém, se a origem for transladada para o baricentro do sistema solar, o que é possível no contexto da relatividade geral, o sistema passa a ser inercial. Além disso, é necessário um referencial cujos eixos coordenados sejam fixos no espaço, tanto em relação à origem quanto à orientação, ou estejam sujeitos a variações no tempo bem conhecidas em relação a algo fixo. A questão relacionada com a orientação dos eixos é complicada até certo ponto, em função dos fenômenos que envolvem o movimento do eixo de rotação da Terra, mas a era moderna permitiu um equacionamento adequado.

Por outro lado, para que seja possível a realização de comparações é necessário adotar "convencionalmente" uma **definição** do referencial. Para isso são estabelecidos princípios que fixam a origem, a orientação dos eixos e a escala de sistemas de coordenadas.

Através de observações levadas a efeito a partir de pontos devidamente materializados sobre a superfície da Terra e conduzidos sobre objetos adequados para o caso, estabelece-se um conjunto de coordenadas de referência para os pontos. Este conjunto **materializa** uma rede de referência, normalmente com caráter global, utilizada para vincular outras determinações. Um exemplo de uma rede de referência materializada é a do IGS (International GNSS Service) (Figura 2).

As redes com características globais implicam numa distribuição de pontos separados por centenas e até milhares de quilômetros. As necessidades práticas, bem como, as técnicas de obtenção de coordenadas vinculadas a uma referência global exigem o estabelecimento de redes com um espaçamento menor entre os pontos materializados (poucas dezenas de quilômetros). Isto implica na implantação de pontos de **densificação**, os quais compõem as redes de referência continentais, nacionais ou regionais como, por exemplo, a rede SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) que se enquadra no primeiro caso (Figura 3).



Fonte: [www.igs](http://www.igs.org)

Figura 2 – Rede de referência do IGS.

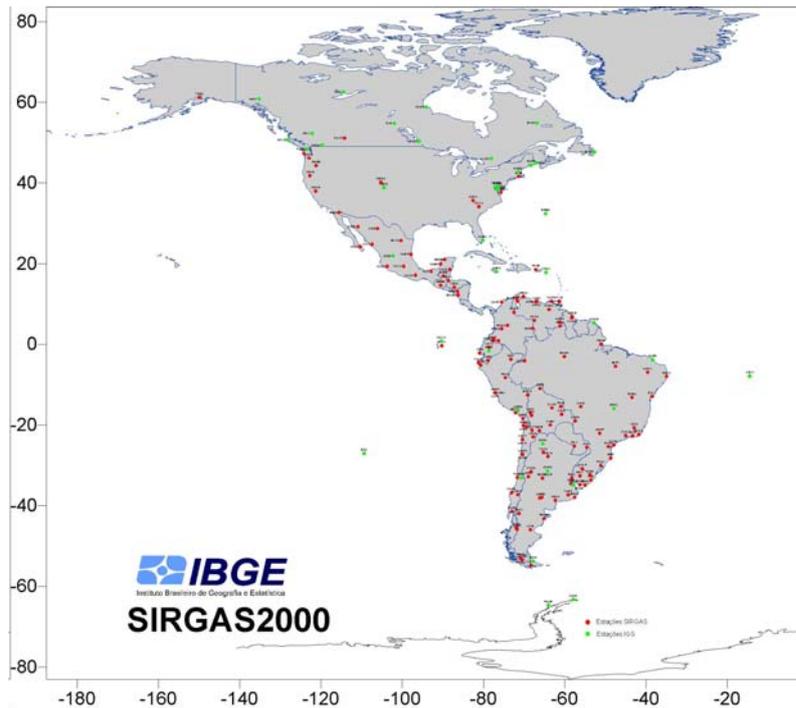


Fig. 3 – Rede de Referência do SIRGAS.

Três associações internacionais, diretamente interessadas, têm envidado esforços na conceituação, na definição e na materialização de referenciais: a Associação Internacional de Geodésia, a União Astronômica Internacional e a União Geodésica e Geofísica Internacional. Elas conhecidas pelas suas siglas, respectivamente: IAG, IAU e IUGG. A densificação tem ficado por conta de organizações nacionais e locais.

A Era Espacial, depois de algumas décadas de estudo e análise, permitiu concluir que dois referenciais são suficientes: o Referencial Celeste (RC) e o Referencial Terrestre (RT). O RC tem sua origem no baricentro do sistema solar e seus eixos orientados fixamente no espaço. O RT acompanha a Terra em seu movimento de rotação entorno do eixo e de translação ao redor do Sol e tem sua origem no centro de massa da Terra.

A IUGG e a IAU criaram em 1987, tendo iniciado seu funcionamento em 1º janeiro de 1988, um serviço especial denominado, na época, "International Earth Rotation Service" (IERS), hoje "International Earth Rotation and Reference Systems Service", mantida a mesma sigla. O IERS substituiu o IPMS (International Polar Motion Service) e a sessão de rotação da Terra do BIH (Bureau International de l'Heure). O IERS é um dos membros da chamada Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis (FAGS) e é responsável pelas seguintes funções:

- a definição e a manutenção de um sistema de referência terrestre convencional baseado em técnicas de observações de alta precisão da geodésia espacial;
- a definição e a manutenção de um sistema de referência celeste convencional baseado em fontes de rádio extra-galácticas e a relação do mesmo com outros sistemas celestes de referência;

- a determinação dos parâmetros de orientação da Terra (EOP – Earth Orientation Parameters) que servem para conectar os dois sistemas, em conjugação com um modelo convencional da precessão/nutação;
- a organização de atividades operacionais para a observação e a análise de dados, coletando e arquivando dados e resultados apropriados, e disseminando os mesmos para atendimento às necessidades dos usuários. [IERS, 1995].

5. Referencial Celeste

A origem e os eixos de um referencial, em particular o Referencial Celeste (RC), não podem ser materializados de forma direta. Eles são estabelecidos (definidos) de uma forma convencional e é necessário escolher uma estrutura física que sirva de base para a sua materialização. Durante muito tempo utilizou-se o conjunto de 1535 estrelas do catálogo FK4 cujas coordenadas uranográficas, ascensão reta e declinação, eram definidas. Este sistema completava-se com os valores de precessão e da obliquidade da eclíptica de Newcomb e a teoria da nutação de Woollard [Seeber, 1993].

Em meados da década de 80 o Astronomisches Rechen Institut compilou um novo catálogo, o FK5 [Kovalevsky et al., 1989]. Resultado da comparação de 100 novos catálogos com o FK4, o FK5 permitiu melhorar os movimentos próprios individuais das estrelas de um fator 2. O sistema usou os valores convencionais de precessão IAU(1976), uma nova determinação do equinócio, do equador e a rotação do padrão local de repouso [Kovalevsky et al., 1989]. Esta última inovação introduziu o sistema parcialmente cinemático e não puramente dinâmico. A precisão média atingida no FK5 foi de $\pm 0,02''$ em posição e $\pm 0,8$ mas (miliarcosegundo) por ano no movimento próprio. As coordenadas dos catálogos estão referidas, por convenção, à época J2000, que corresponde à época juliana em 1 de janeiro de 2000, 12hs TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico) [Torge, 2001, §2.2.2]. O calendário Juliano foi estabelecido pelo imperador romano Júlio Cesar e tem como origem o ano 4713 a.C., constituindo uma contagem contínua de dias. O ano Juliano tem a mesma duração do ano civil, 365,25 dias solares médios. Assim, a chamada época J2000, 1º de janeiro de 2000, corresponde a 2.451.545,0 dias Julianos.

Em 1991, nas recomendações sobre Sistemas de Referência, a IAU optou por objetos extragaláticos distantes, em substituição às estrelas, que definissem de forma adequada um referencial celeste e adotou direções que fossem fixas em relação a um conjunto selecionado destes objetos [Gontier et al., 1997]. De conformidade com esta recomendação, o ICRS (International Celestial Reference System) é realizado pelo ICRF (International Celestial Reference Frame) definido através de um catálogo de coordenadas equatoriais (uranográficas), ascensão reta e declinação, de objetos extragaláticos; as coordenadas são obtidas a partir de observações VLBI, relativas ao equador médio em J2000 [McCarthy, 1996]. Uma vantagem fundamental dos objetos extragaláticos é que suas distâncias são tão grandes que seus movimentos próprios são indetectáveis, mesmo com as técnicas atuais mais precisas, contrariamente ao que ocorre com as estrelas, o que garante uma estabilidade rotacional ao referencial. Além disso, ainda devido à distância que os separa da Terra, as paralaxes diurna e anual também são imperceptíveis. Mesmo a paralaxe oriunda de uma suposta observação a partir do centro de massa da Terra ou do baricentro do sistema solar é desprezível. Daí afirmar-se que, dentro do conceito da relatividade geral, a origem do ICRS é o

baricentro do sistema solar. Esta característica permite assegurar que, para todos os efeitos, o ICRS é um sistema inercial. Na transformação entre os referenciais celeste e terrestre não há necessidade de considerar a referida translação entre as origens, uma vez que o interesse exclusivo é pela orientação dos eixos. Os objetos referidos acima são conhecidos como quasares, abreviação da expressão em inglês: Quasi-Stellar Radio Source (Quasars). A precisão típica na posição dos quasares é de $\pm 0,35$ mas em ascensão reta e $\pm 0,40$ mas em declinação.

A nova escolha de objetos extragaláticos para a realização de direções fiduciais foi possível graças à técnica altamente precisa de observação, o VLBI. Trata-se de uma técnica geométrica que mede precisamente direções no espaço e a distância entre as antenas na superfície. Usando um par de antenas, que podem estar separadas por até milhares de quilômetros, a diferença no tempo de chegada nas duas estações de sinais de alta frequência emitidos por fontes estelares é medida com precisão de poucos pico-segundos (a luz percorre 1 mm em 3 pico-segundos). O atraso no tempo e sua derivada primeira são reconstituídas por correlação dos sinais gravados nas duas estações. Uma questão fundamental no VLBI é o relógio que serve para datar os eventos. Ele deve ser muito estável em curtos períodos. O VLBI utiliza um padrão de frequência constituído pelo maser de hidrogênio que tem estabilidade de 10^{-14} em 1000 segundos [Gontier, et al. 1997]. As bandas de frequência usadas nas aplicações geodésicas do VLBI são S e X, com frequência de 2,3 e 8,4 GHz e comprimentos de onda de 13 cm e 3,6 cm, respectivamente.

Em função da evolução descrita acima conclui-se que a escolha da estrutura física é um tanto arbitrária o que leva a qualificar os referenciais de "convencionais".

Quando da escolha dos novos objetos fiduciais, os quasares, a IAU introduziu explicitamente a teoria da Relatividade Geral como fundamento para todos os problemas teóricos e de análise de observações relacionados ao tempo e ao espaço. De acordo com as novas regras, as direções fundamentais do RC permanecerão fixas no espaço; serão independentes do modelamento do movimento dos objetos do sistema solar. Os objetos serão monitorados e suas posições eventualmente re-estimadas de acordo com a qualidade e a disponibilidade de informações, mas a direção dos eixos coordenados será mantida, para consistência com o FK5 [Gontier et al., 2006]. A origem é o baricentro do sistema solar e o plano primário é próximo ao equador médio em J2000 [Arias et al., 1995] [McCarthy, 1996]. Enfatize-se que o plano primário do sistema IERS é vinculado à precessão convencional IAU(1976) e à teoria da nutação IAU(1980). Sabe-se hoje que estes modelos estão errados em vários milíarcosegundos, exigindo, portanto, o uso de modelos de nutação e precessão mais acurados para definir o equador médio em J2000 relativo ao sistema IERS. Este fato é levado em consideração nas novas convenções da IAU2000 (IERS, 2004). Finalmente, a origem da ascensão reta deve ser próxima do equinócio dinâmico em J2000, consistente com o valor convencional do FK5 (12h 29m 6,6997s em J2000) [Arias et al., 1995]. Estas e outras especificações compõem as recomendações do Grupo de Trabalho sobre Sistemas de Referência, pesquisadas durante vários anos e adotadas pela IAU em 1997 [Kovalevsky et al., 1997]. Com isso ficou definido, por convenção, o Sistema de Referência Celeste do IERS, o ICRS, tendo as seguintes características:

- a origem está no baricentro do sistema solar;
- o eixo OX_1 é orientado segundo o equinócio vernal do equador médio J2000;
- o eixo OX_3 orientado para o polo convencional das efemérides na época J2000, o CEP (Celestial Ephemeris Pole);

- o eixo OX_2 completando um sistema dextrógiro;
portanto, direções consistentes com aquelas do FK5.

6. Referencial Terrestre

O Sistema de Referência Terrestre do IERS, o ITRS (International Terrestrial Reference System) é definido conforme os critérios estabelecidos pelo IERS, sendo fixo na Terra. Trata-se de um sistema geocêntrico, isto é, origem no centro de massa da Terra, o que inclui a parte sólida, líquida (oceanos - hidrosfera) e gasosa (atmosfera), e que foi melhor caracterizado recentemente através das técnicas SLR (Satellite Laser Range) e LLR (Lunar Laser Range). A orientação dos eixos foi definida em 1984 pelo BIH e é mantida pelo IERS dentro de ± 3 mas. (IERS 1997, pg. II-3). Durante muito tempo o eixo OY_3 do RT foi orientado segundo a posição média do polo no período 1900 – 1905, na época chamado CIO (Conventional International Origin). Após a introdução da nova orientação em 1984, o que foi possível com a melhoria do modelo de nutação, o mesmo passou a ser denominado IERS Reference Pole e representado pela sigla IRP. Ainda consistente com o sistema BIH 1984 o eixo OX_1 é orientado segundo o IERS Reference Meridian (IRM). O eixo OX_2 , a 90° de OX_1 , completa um sistema dextrógiro. O ITRS acompanha o movimento diário de rotação da Terra. Com isso, as coordenadas de pontos sobre a superfície da Terra variam pouco com o tempo, excessão aos movimentos geodinâmicos (movimentos das placas tectônicas) e de marés.

A materialização de um Sistema de Referência Terrestre Internacional é uma das atribuições do IERS, como já mencionado. O sistema é usado tanto para analisar conjuntos individuais de uma das técnicas disponíveis atualmente (VLBI, SLR, LLR, GPS, DORIS, PRARE) ou a combinação das observações individuais visando um conjunto único de informações (coordenadas de estações, parâmetros de orientação, UT1, velocidade dos pontos). O ITRS satisfaz aos seguintes critérios [McCarthy, 1996], numa tentativa de adequar a definição à materialização:

- É geocêntrico, sendo o centro de massa definido para a Terra total o que inclui também os oceanos e a atmosfera;
- sua escala é compatível com um catálogo local de coordenadas terrestres, no sentido relativístico da teoria da gravitação;
- sua orientação é aquela definida inicialmente pelo BIH em 1984;
- a evolução da orientação da rede no tempo é garantida pela condição de "não rotação residual da rede" (no-net-rotation) com relação aos movimentos tectônicos sobre toda a Terra, do ponto de vista global. Em resumo, a solução é obtida impondo a condição de que a integral dos movimentos das placas, em tese movimentos angulares ao redor do centro de massa, seja nula globalmente.

A adoção destes critérios não deixa de ser convencional o que torna comum a denominação CTRS (Conventional Terrestrial Reference System) sendo mais comum a sigla ITRS. O sistema é materializado atualmente através de um catálogo de coordenadas e de velocidades, num dado momento, para um conjunto de estações. Tais coordenadas são especificadas pelo terno cartesiano (X_1 , X_2 , X_3), preferencialmente, e suas derivadas em relação ao tempo. Quando do uso de coordenadas geográficas é recomendado o GRS80 cujo elipsóide é dado pelos seguintes parâmetros:

$$\begin{array}{ll} a = 6\,378\,137,0 \text{ m} & \text{(semi-eixo maior)} \\ e^2 = 0,00669438003 & \text{(quadrado da excentricidade)} \end{array}$$

Em suma, o CTRS estabelecido pelo IERS é conhecido pela sigla ITRS (IERS Terrestrial Reference System) e é especificado pela resolução n° 2 da IUGG adotada na XX^a Assembléia Geral em 1991, Viena.

A título de observação cabe uma consideração sobre o centro de massa da Terra. Em princípio, o centro de massa da Terra é estabelecido pelas observações laser e GNSS. Entretanto, pairam algumas incertezas no problema. Primeiramente, como saber se o centro de massa varia em função das redistribuições de massa (as águas das geleiras e das calotas polares, o movimento das placas tectônicas) ou não. Há quem argumente que a conservação do momento angular impede a mudança no centro de massa. Por outro lado, as observações que garantem a origem do referencial estão sujeitas a incertezas na maneira de combinar e ponderar as diferentes observações na solução da rede IGS e nas injunções dos modelos de movimento das placas. Isto tem levado a uma distinção no que é o geocentro e no que é o centro de massa, assegurando que o referencial tem origem no geocentro, o qual imperfeitamente coincide com o centro de massa.

7. Materializações do ITRS

Como foi enfatizado no §4, uma vez definido, o sistema ITRS precisa ser materializado. Desde 1988 vem se evoluindo para materializações cada vez mais compatíveis com a definição. Por outro lado, as materializações implicam em soluções globais para as coordenadas das estações de observação da rede IGS. As soluções através do Método dos Mínimos Quadrados trazem inúmeras dificuldades em função da necessidade de tratar diferentes tipos de observações (VLBI, GPS, LLR, SLR, DORIS) e do equacionamento das injunções necessárias e possíveis. Um estudo a este respeito pode ser encontrado em [Monico, 2005].

As materializações do ITRS são produzidas pelo IERS sob a sigla ITRFyy (International Terrestrial Reference Frame) sendo yy os dois últimos dígitos do último ano em que as observações contribuíram na realização em apreço (não são somente observações de um ano que entram na solução). Por exemplo, ITRF94 designa a realização construída em 1995 usando todas as observações levadas a efeito até o final de 1994. A partir do ano 2000 decidiu-se identificar pelos quatro dígitos do ano, e.g., [Boucher et al., 2004] descreve os resultados do ITRF2000. Nas diversas realizações o IERS publica as coordenadas das estações, as variações no tempo (velocidades) e os parâmetros de transformação da realização em apreço para as anteriores. Em [Boucher et al., 2004] a Tabela 4.1 (pág. ?????) apresenta os parâmetros de transformação e suas variações no tempo do ITRF2000 para as 9 realizações anteriores (1997, 1996, 1994, 1993, 1992, 1991, 1990, 1989 e 1988). A compatibilização das diferentes realizações é feita usando a transformação de similaridade através de sete parâmetros: três translações, três rotações e uma escala.

As variações das coordenadas das estações no tempo são o resultado dos movimentos tectônicos que acarretam deslocamento dos pontos, portanto, mudanças nas coordenadas. Assim, a posição de um ponto sobre a superfície da Terra, para distintas épocas, deve ser expressa na forma:

$$\bar{X}(t) = \bar{X}_o + \bar{V}_o(t - t_o) + \sum_i \Delta \bar{X}_i(t) \quad (1)$$

onde $\Delta \bar{X}_i$ são correções devido aos vários efeitos de variação com o tempo e \bar{X}_o e \bar{V}_o são a posição e a velocidade da época inicial t_o . As correções incluem o deslocamento de maré da Terra sólida, a carga do oceano, a carga pós-glacial e a carga da atmosfera. As coordenadas são dadas num referencial convencional onde os efeitos de todas as marés são removidos [McCarthy, 1996]. No processamento das observações levadas a efeito nos vários anos \bar{X}_o e \bar{V}_o devem entrar como incógnitas. Em particular, quando da ocorrência de um evento não linear (terremoto, evento vulcânico, etc.) um novo \bar{X}_o é adotado.

A escala do ITRS é obtida através de um modelamento relativista adequado. Especificamente, conforme resoluções da IAU e da IUGG, a escala é consistente com o TCB (Coordenada Temporal Baricêntrica). Em relação à origem, somente observações que incluam técnicas dinâmicas (SLR, LLR, GPS, GLONASS, DORIS) permitem determinar o geocentro (centro de massa). O VLBI garante a orientação do sistema celeste e contribui com a escala do ITRS; ele só pode ser referido à origem através das coordenadas obtidas para uma estação numa dada época através de técnicas externas ao mesmo.

O Polo e o Meridiano de Referência, respectivamente, IRP (International Reference Pole) e IRM (International Reference Meridian) são consistentes com as correspondentes direções no Sistema Terrestre BIH (BTS) dentro de 0,005". O Polo de Referência do BIH foi ajustado ao CIO (Conventional International Origin) em 1967. A incerteza do IRP em relação ao CIO é de $\pm 0,03$ ". A evolução da orientação no tempo é assegurada através da chamada "condição de não rotação da rede" em relação a movimentos tectônicos horizontais em toda a Terra. Para tanto, a referência é o NNR-NUVELIA.

A vinculação entre os sistemas celeste e terrestre é feita através dos parâmetros de orientação da Terra - EOP. Estes parâmetros descrevem a orientação de um dado referencial terrestre, em função do tempo, em relação a um referencial celeste. Consistem em 5 componentes: x, y são as coordenadas do CEP (Polo Celeste das Efemérides) relativamente ao polo do referencial terrestre (IRP); $d\psi$, $d\epsilon$ são as diferenças em longitude e em obliquidade respectivamente, do polo celeste em relação à direção estabelecida no referencial celeste pelos modelos convencionais de precessão/nutação da IAU; tempo universal (UT1), que está vinculado ao Tempo Sideral Médio de Greenwich, permite o acesso ao ângulo de rotação do referencial terrestre relativamente ao referencial celeste, ambos materializados, contado ao redor do eixo do CEP. É expresso pela diferença UT1 - TAI, sendo este último o Tempo Atômico Internacional.

Finalmente, algumas considerações devem ser enfatizadas. O ITRS, tal como caracterizado pelo IERS, é adotado por definição e não deixa de ser uma convenção. A partir da definição é necessário materializá-lo o que não pode ser feito de forma direta. Na prática, o sistema é materializado através das coordenadas de um conjunto de estações, por exemplo, a rede IGS, as quais são obtidas por uma das técnicas espaciais ou por uma combinação de várias delas, isto quando há técnicas co-locadas (locadas conjuntamente). Toma-se os cuidados necessários para que as coordenadas estejam perfeitamente referidas ao ITRS. Na realidade, as coordenadas são obtidas a partir de observações, que têm sua margem de erro, e de modelos que levam em consideração fenômenos da crosta, e que também não são perfeitos. Por outro lado, vem se estimando

as coordenadas das estações periodicamente. É o que constitui o ITRF_y. Assim sendo, existem diversas materializações (realizações) do ITRS, por exemplo, ITRF90, ITRF91, ITRF95, etc., cada um se propondo a ser a melhor aproximação possível. A comparação das coordenadas das diferentes realizações resulta em parâmetros de transformação de Helmert, e até mesmo sua variação no tempo, que são divulgadas conjuntamente com as coordenadas. Na divulgação é sempre caracterizada a realização específica para a qual valem os parâmetros. Em resumo, os parâmetros administram o problema das diferenças entre as realizações.

Mas há uma outra questão que envolve as coordenadas e não os parâmetros de transformação. Trata-se do fato de que as estações se movimentam ao longo do tempo em função dos processos geodinâmicos. Normalmente o deslocamento é linear, mas há casos em que ocorre um deslocamento instantâneo; isto pode ocorrer no momento de um terremoto. A análise contínua das observações, sobretudo GPS e agora GNSS, nas estações IGS tem permitido estimar a variação das coordenadas com o tempo a partir de uma coordenada inicial X_0 e de uma velocidade inicial V_0 (equação 1).

Portanto, há dois aspectos a cuidar na transformação. Exemplificando, quando se tem as coordenadas de uma estação referidas à realização ITRF2000 e se deseja as coordenadas da mesma referidas ao ITRF97, aplica-se os respectivos parâmetros de transformação. Porém, se o objetivo for conhecer as coordenadas da estação onde ela estava em 1997, é preciso levar em consideração as velocidades de deslocamento, o que é muitas vezes denominado de transformação completa de Helmert. A América do Sul decidiu adotar como referencial comum o SIRGAS2000, coincidente com o ITRF2000. A época adotada no Brasil é 2000,4. Nos demais países varia a época.

8. Vinculação entre o TRS e CRS

A Terra não tem uma distribuição homogênea de massa, sendo a principal heterogeneidade a protuberância equatorial. Além disso, a Terra tem partes muito viscosas, líquidas até, como os oceanos, e partes menos viscosas, o núcleo externo. Há também a atmosfera que é gasosa e que resulta em processos de interação com as partes líquida e sólida. Há necessidade de monitorar as deformações e deslocamentos da parte sólida e as variações da parte líquida (nível do mar, camadas de gelo, etc.). Por outro lado, quando se considera o sistema solar, todos os corpos giram entorno do baricentro do sistema; mas este na prática coincide com o centro de massa do Sol, uma vez que a massa do mesmo é predominante no sistema. O sistema Terra-Lua é mais simples do que o sistema solar, porém, com uma característica específica. A massa da Terra não é predominante e o centro de massa do sistema está em um ponto distante do centro de massa da Terra de aproximadamente $2/3$ do raio. Ou seja, pode-se dizer que os planetas giram entorno do centro de massa do Sol; mas, no caso do sistema Terra-Lua, os astros envolvidos giram entorno do baricentro do sistema; por outro lado este sistema gira entorno do centro de massa do Sol. O fato tem consequência na consideração da força de maré. Finalmente, a Terra experimenta deslocamentos de massa como, o movimento das placas tectônicas (intra-placa e inter-placa), a variação do nível do mar função do aumento da temperatura média (expansão térmica) e do derretimento das geleiras e das calotas polares. Isto tudo faz com que a Terra seja um corpo girando no espaço com diversas oscilações, livres e forçadas. O resultado é um eixo de rotação sempre em movimento ao longo do tempo. Em consequência, a transformação entre o referencial

celeste, fixo no espaço, e o referencial terrestre, fixo na Terra, passa a não ser algo trivial.

Em suma, considerando um eixo (imaginário) de rotação, ao observá-lo constata-se oscilações do mesmo no espaço, traduzidos por 4 movimentos principais: precessão, nutação (longos períodos – milhares ou dezenas de anos respectivamente), movimento do pólo (período mais curto) e a deriva para oeste. Numa tentativa de explicação simples pode-se pensar numa situação em que uma pessoa se fixasse no espaço e passasse a observar continuamente o pólo a partir de um instante. Após algumas horas apenas de observação verificaria um pequeno movimento do ponto. Persistindo um pouco mais na observação (vários dias) o movimento continuaria de uma forma aparentemente irregular. Mantendo-se a observação por alguns anos notar-se-ia uma tendência de um movimento em círculo, porém, irregularmente. É o que se conhece por “movimento do pólo” representado na figura 4 pela linha tracejada (a polódia). Porém, olhando para este movimento num período maior (vários anos) a constatação vai além e nota-se uma deriva para oeste representada pela linha de círculos na figura 4. No contexto destes dois movimentos convencionou-se escolher um ponto num dado momento e adotá-lo como orientação do Sistema de Referência Terrestre, o CIP (Conventional International Pole). Indo além e extendendo a observação ao polo por dezenas de anos ficaria clara a existência de um movimento mais lento, a nutação, com um período de 18,6 anos (Figura 5). Se hipoteticamente o observador ficasse milhares de anos observando ainda comprovaria a existência da precessão (período de 25 600 anos). Uma certa posição do pólo nestes dois movimentos de períodos mais longos foi convencionalmente adotado como orientação do eixo Z do sistema celeste e denominado CEO (Celestial Ephemeris Origin).

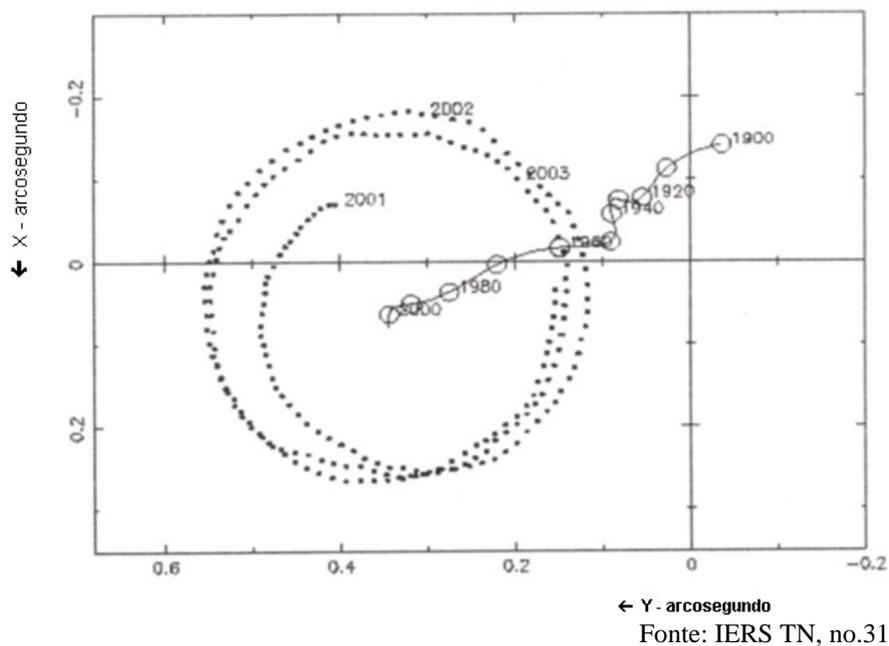
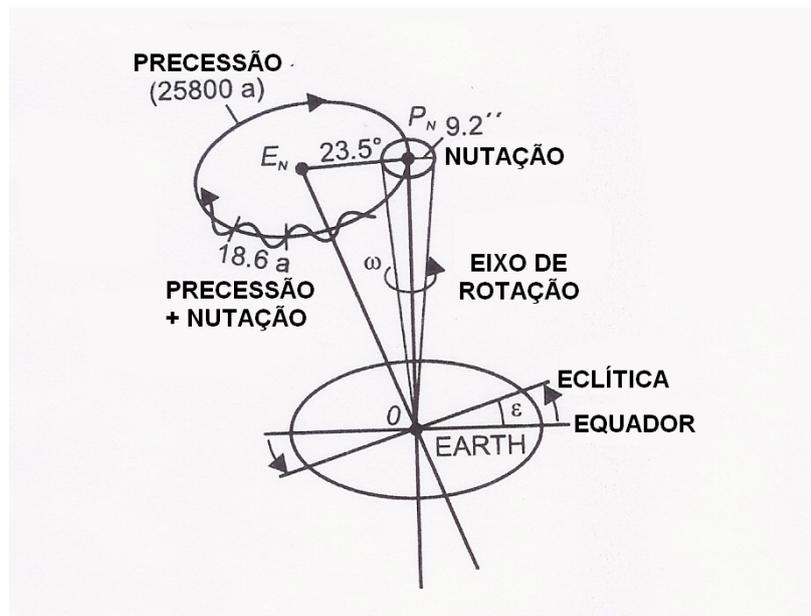


Figura 4: Movimentos do eixo de rotação: polódia e deriva para oeste.



(Figura retirada de Seeber, 1993)

Figura 5: Movimento de precessão e de nutação.

Os diferentes fenômenos fazem com que o eixo de rotação terrestre não coincida com o eixo de inércia. O resultado é os movimentos do eixo de rotação entorno do eixo da eclíptica. Assim, os referenciais terrestre e celeste se vinculam entre si através dos parâmetros de orientação da Terra, que descrevem os movimentos do eixo de rotação em relação ao eixo da eclíptica, em associação com os modelos de precessão (componente secular) e de nutação (componente periódica). A expressão de transformação para uma data t é a seguinte:

$$\vec{X}^C = Q(t)R(t)W(t)\vec{X}^T \quad (2)$$

sendo Q , R e W as matrizes de transformação oriundas do movimento do polo celeste no sistema celeste (precessão e nutação), da rotação da Terra ao redor do eixo do polo, e do movimento do polo respectivamente. As matrizes de precessão e de nutação são definidas através dos modelos estabelecidos pela IAU em 1976 e em 1980 respectivamente [IERS, 1992], recentemente corrigidos pelo IERS através de observações VLBI.

Os sistemas de referência e os procedimentos inerentes a eles, a cargo do IERS, estão baseados em resoluções aprovadas e recomendadas por uniões internacionais. Assim, o sistema celeste segue a Resolução A4 da IAU de 1991. O sistema foi oficialmente iniciado e implantado pela Resolução B2 da IAU em 1997 e sua definição foi objeto de um refinamento através da Resolução B1 da IAU em 2000. O sistema terrestre se baseia na Resolução 2 da IUGG. Já a transformação entre os sistemas celeste e terrestre é fundamentada pela Resolução B1 da IAU em 2000. [IERS, 2004], [Monico, 2004].

Observação: Para se definir a posição de um ente ou um evento no espaço usa-se uma coordenada compatível. Assim, é usual se utilizar coordenadas geodésicas, cartesianas ou outras, como UTM. Para se posicionar o evento no tempo a coordenada apropriada é a temporal (de tempo). Neste caso igualmente há mais de uma possibilidade de escolha da coordenada temporal dependendo de um caráter relativista da

origem. Por exemplo, pode-se referir ao geocentro ou ao baricentro do sistema solar. Neste aspecto refere-se a uma coordenada temporal geocêntrica - TCB (Time Coordinate Geocentric ou coordenada temporal baricêntrica - TCB (Time Coordinate Baricentric). Há um certo vício em confundir o entendimento com o TUC (Tempo Universal Coordenado) que não deixa de ser igualmente uma coordenada temporal, mas por ser estabelecido por um órgão internacional (BIH) passou a ser entendido como um tempo coordenado. No caso do TCG e do TCB não se trata de um tempo coordenado, mas de uma coordenada temporal (de tempo).

9. Agradecimentos

Muitas das idéias aqui expostas em relação aos métodos astronômicos foram absorvidas em exposições do Prof. Dr. Ramacrishna Teixeira em diferentes visitas realizadas ao Observatório Astronômico de Valinhos. Além disso, os autores são gratos a ele pela leitura do artigo e pelas sugestões fornecidas. Discussões levadas a efeito, em visita ao DGFI, com o Dr. Hermann Drewes e o Dr. Klaus Kaniuth serviram para aperfeiçoar alguns conceitos. Discussões com o Dr. João Francisco Galera Monico enriqueceram o conteúdo em vários aspectos. Finalmente, importantes sugestões foram incorporadas ao texto após a leitura atenciosa do Prof. Edvaldo Simões da Fonseca Jr.

10. Referências Bibliográficas

- Arias E. F., Charlot P., Feissel M. & Lestrade J. F. (1995). The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. *Astronomy and Astrophysics*, 303, pp. 604-608.
- Boucher C., Altamini Z., Sillard P., Vernier M.F. (2004). The ITRF2000. IERS Technical Note no. 31, IERS ITRS Centre, Institut Géographique National, França.
- Dickey J. (2001). *Interdisciplinary Space Geodesy: Challenges in the New Millennium*. Jet Propulsion Laboratory. Internal report. Pasadena.
- Gemael C. (1981). *Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia*. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Gontier A. M., Arias E. F., Barache C. (2006). Maintenance of the ICRF using the most stable sources. *In*: IERS Technical Note 34. Observatoire de Paris. Paris.
- Gontier A. M., Feissel M. Ma C. (1997). The contribution of VLBI to the realization of a Celestial Reference System. *In*: IERS Technical Note 23. Observatoire de Paris. Paris.
- IERS (1995). *Missions and goals for 2000*. IERS-IUGG-IAU. Observatoire de Paris. Paris.
- IERS (1997). *1997 IERS Annual Report*. Observatoire de Paris. Paris.
- IERS (1992). *IERS Technical Note 13*. Observatoire de Paris. Paris.
- IERS (2004). *IERS Conventions (2003)*. Technical Note 32. Editors : Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodasie. Frankfurt.
- Kovalevsky J. (1989). *Stellar Reference Frames*. *In*: IERS Technical Note 23. Observatoire de Paris. Paris.
- Kovalesvsky J., Mueller I.I., Kolaczek B. (1989). *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*. IERS Technical Note 23. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- McCarthy D. D. (1996) *IERS conventions (1996)*. IERS Technical Note 21. Observatoire de Paris. Paris.

- Monico J.F.G. (2005). Fundamentos matemáticos envolvidos na combinação de soluções para a realização dos ITRS. Comunicação pessoal do artigo em preparação.
- Monico J.F.G. (2004). Transformação entre referenciais celeste e terrestre de acordo com a Resolução IAU 2000. In: Série em Ciências Geodésicas, vol. 4. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba.
- Mueller I. I. (1969). Spherical and practical astronomy as applied to geodesy. Frederick Ungar Co. New York.
- Oliveira L. C. (1998). Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD-69 – Uma proposta metodológica de transformação. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo.
- Seeber G. (1993). Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin.
- Torge W. (2001). Geodesy. 3rd Edition. De Gruyter, Berlin.