

# **A EVOLUÇÃO DOS REFERENCIAIS USADOS EM GEODÉSIA: A ERA MODERNA**

*The evolution of referentials used in Geodesy: The Space Era*

DENIZAR BLITZKOW  
ANA CRISTINA CANCORRO DE MATOS  
EPUSP-PTR  
Caixa posta 61548  
05424-970 São Paulo – SP  
E-mail: dblitzko@usp.br

## **RESUMO**

A Era Espacial permitiu desenvolver metodologias de observação que levaram ao estudo de fenômenos até então impossíveis de serem considerados. Pode-se citar o movimento dos satélites artificiais, o deslocamento das placas tectônicas, as marés terrestres e oceânicas, os movimentos do eixo de rotação da Terra, as variações da velocidade de rotação, etc. A qualificação e a quantificação destes fenômenos exigem o estabelecimento de referenciais adequados. Após alguns anos de estudo e análise concluiu-se que dois referenciais seriam suficientes para quantificar todos os fenômenos relacionados com os interesses geodésicos e geodinâmicos: 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 um histórico geral da evolução dos referenciais, de seu estabelecimento e de sua manutenção, função atribuída atualmente ao IERS.

## **ABSTRACT**

The Space Era called the attention to observational methodologies that allowed the study of phenomena which was impossible to be considered a few years ago. The movements of artificial satellites, the plate tectonics, the earth and ocean tides, the movements of the Earth rotation axis, the change on the rotation velocity are examples far to be exhaustive. The qualification and quantity of these phenomena are only possible if convenient reference systems are established. After many years of analyses and research, the conclusion addressed two reference coordinate systems: a

terrestrial reference system and a celestial reference system. They are sufficient to deal with all geodetic and geodynamics phenomena related to the Earth. 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 historical evolution of the reference systems and they 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 o seu efeito na propagação de sinais é reconhecidamente o problema dominante do VLBI (Very Long Baseline Interferometry) com efeitos similares no GPS (Global Positioning System) e no SLR (Satellite Laser Range). Estes problemas vêm integrando a Meteorologia com a Geodésia e são estudados e analisados através de redes GPS de monitoramento contínuo, as quais ainda permitem a determinação do TEC (Total Electron Content) da ionosfera. Mas não fica por aí as interações, possibilitadas pelo GPS, da geodésia com outras atividades. O objetivo primordial do GPS, posicionamento instantâneo com precisão de poucos metros, tem aplicação na navegação 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 e GRACE (Gravity Recovery And Climate Experience) e a futura missão GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer), permitem vislumbrar novos desenvolvimentos. Um ponto importante a focalizar é a variação no tempo do campo gravitacional. Avaliações do referido campo a bordo de satélites já indicaram avanços consideráveis no entendimento da estrutura e da dinâmica núcleo/manto, na estrutura térmica e dinâmica na litosfera, na circulação oceânica e na tectônica de placas [Dickey, 2001].

Sabe-se que os últimos 100 anos vêm apresentando um desequilíbrio progressivo do efeito estufa devido a um aumento de certos gases na atmosfera, em particular, o CO<sup>2</sup>. 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 à taxa de 1 – 3 mm/ano nos últimos 100 anos. 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 nas calotas polares certamente contribuem de forma considerável. Isto acarreta numa redistribuição de massas cujo efeito é a variação, no tempo, do campo gravitacional e, portanto, da superfície geoidal.

Enfim, todos estes exemplos servem para retratar o aumento de envolvimento que a Geodésia tem experimentado nos últimos anos.

## 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., através de suas radiações luminosas; ela possui três razões para isso. Um dos mais antigos interesses 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 da variabilidade nos 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 sobre a 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 mudança de posição do corpo celeste que ocorre quando se muda a posição do observador (deslocamento paralático). 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 posições do astro em épocas distintas do ano. Assim sendo, a observação do astro a partir da superfície topográfica 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. Quando a pessoa começa a se deslocar, a sensação é de que os pingos caem inclinados vindos na direção do movimento e, espontaneamente, se 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 recebemos dos astros na direção do movimento do observador. Em função dos movimentos de um observador na superfície da Terra, cujas acelerações são relativamente grandes, a utilização do baricentro do sistema solar como origem de um sistema de referência, representa uma aproximação muito melhor de um referencial inercial.

### 3. COORDENADAS GEODÉSICAS E CARTESIANAS

Segundo se lê em [Gemael, 1981] “até há bem pouco, os geodestas se valiam de dois escalares — a latitude ( $\phi_G$ ) e a longitude ( $\lambda_G$ ) — 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 conjunto capaz de fixar a posição de um ponto no espaço. Primeiramente é que as duas redes, horizontal (triangulação,  $\phi$  e  $\lambda$ ) 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 se ressaltar que a determinação da altitude ortométrica depende do conhecimento da densidade no interior da crosta; os modelos de distribuição de



- 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 convenientes. 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 enumeradas:

- conceito;
- definição;
- materialização;
- densificação.

Do ponto de vista **conceitual** um referencial ideal seria aquele em que a origem seguisse a lei newtoniana da inércia (mantivesse-se em repouso ou em movimento retilíneo uniforme). Num referencial em que a origem seja o centro de massa da Terra a lei da inércia não se verifica 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 um tanto complicada em função dos fenômenos que envolvem o movimento do eixo de rotação da Terra, mas que 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 e eventualmente a escala de sistemas de coordenadas.

Através de observações levadas a efeito sobre objetos adequados para o caso, a partir de pontos devidamente materializados sobre a superfície da Terra, estabelece-se um conjunto de coordenadas de referência para os mesmos. 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 GPS 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 a partir de 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).

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, 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: "International Earth Rotation Service (IERS)". 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 extra-galáticas de rádio e a relação do mesmo com outros sistemas de referência celeste;
- 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 dissiminando os resultados para atendimento às necessidades dos usuários. [IERS, 1995].

Figura 2 – Rede de referência do IGS.

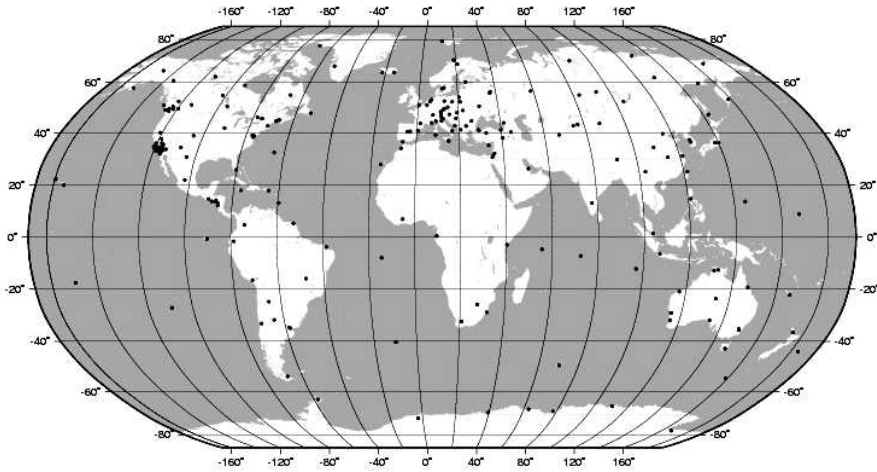


Fig. 3 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS





## 5. REFERENCIAL CELESTE

A origem e os eixos de um referencial, em particular o RC, não podem ser materializados de forma direta. É necessário escolher uma estrutura física que sirva de base para a definição daqueles elementos. Durante muito tempo utilizou-se o conjunto de 1535 estrelas do catálogo FK4 cujas coordenadas uranográficas, ascensão reta e declinação, eram catalogadas. 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 é  $0,02''$  em posição e  $0,8$  mas (miliarcosegundo) por ano no movimento próprio. As coordenadas dos catálogos estão referidas, por convenção, ao ano Juliano 2000 (J2000). O calendário Juliano foi estabelecido pelo imperador romano Júlio Cesar e tem como origem o ano 4713 a.C. O ano Juliano tem a mesma duração do ano civil, 365,25 dias solares médios. Logo, o ano Juliano 2000 corresponde no calendário Gregoriano ao ano 2713 a.C.

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 destes objetos [Gontier et al., 1997]. De conformidade com esta recomendação, o ICRS (IERS Celestial Reference System) é realizado pelo ICRF (IERS Celestial Reference Frame) definido através de um catálogo de coordenadas equatoriais (uranográficas), ascensão reta e declinação, de objetos extragaláticos obtidas a partir de observações VLBI, relativas ao equador médio 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. Os referidos objetos são conhecidos como quasares, abreviação da expressão em inglês: Quasi-Stellar Radio Source (Quasars). A precisão típica na posição dos quasares é de  $\pm 0,3$  mas.

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. 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 de rádio 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 reconstruídas por correlação dos sinais gravados nas duas estações. Um ponto 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. 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 mas, exigindo, portanto, o uso de modelos de nutação e precessão mais acurados para definir o equador médio J2000 relativo ao sistema IERS. Finalmente, a origem da ascensão reta deve ser próxima do equinócio dinâmico 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 o Sistema de Referência Celeste do IERS, cuja sigla é 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 – ITRS (IERS Terrestrial Reference System) é definido conforme os critérios estabelecidos pelo IERS. Trata-se de um sistema geocêntrico, isto é, origem no centro de massa da Terra, o que inclui os oceanos e a 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  $\pm 3$  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  $90^\circ$  de  $OX_1$ , completa um sistema dextrógiro.

A manutenção de um Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS) é uma das atribuições do IERS, como já mencionado. Ele 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, etc.). O ITRS satisfaz aos seguintes critérios: [McCarthy, 1996]

- É geocêntrico, sendo o centro de massa definido para a Terra total o que inclui os oceanos e a atmosfera;
- sua escala é aquela de um catálogo terrestre local no sentido relativístico da teoria da gravitação;
- sua orientação é aquela definida inicialmente pelo BIH em 1984;
- a evolução da orientação no tempo é garantida pela condição de "não rotação da rede" (no-net-rotation) com relação aos movimentos tectônicos sobre toda a Terra, do ponto de vista global.

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, para um 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 nº2 da IUGG adotada na XXª Assembléia Geral em 1991. Por outro lado, as materializações do ITRS são produzidas pelo IERS sob a sigla ITRFyy (IERS 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 análise). Por exemplo, ITRF94 designa a realização construída em 1995 usando todas as observações levadas a efeito até o final de 1994. Além das coordenadas são fornecidas suas variações no tempo. 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] (ver cap. 5). 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 é obtida através de um modelamento relativista adequado. Especificamente, conforme resoluções da IAU e da IUGG, a escala é consistente com o TCB (Tempo Coordenado Baricêntrico). Em relação à origem, somente observações que incluam técnicas dinâmicas (SLR, LLR, GPS, DORIS) permitem determinar o centro de massa. O VLBI garante a orientação do sistema celeste e 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-NUVEL1A.

A vinculação entre os sistemas celestes e terrestres é feita através dos parâmetros de orientação da Terra (EOP – Earth Orientation Parameters). Estes parâmetros descrevem a orientação de um dado referencial terrestre, em função do tempo, em relação a um dado referencial celeste. Consistem em 5 componentes:  $x, y$  são as coordenadas do CEP (Polo Celeste das Efemérides) relativamente ao polo do

referencial terrestre (IRP);  $d\psi$ , de 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. 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 ITRFyy. 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. No ano de 2000, por exemplo, foram divulgadas as coordenadas das estações e parâmetros de transformação de 2000 para diferentes realizações: 1997, 1996, 1994, ..., 1988. 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 é instantânea; isto pode ocorrer no momento de um terremoto. A análise contínua das observações, sobretudo GPS, 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.

## 7. AGRADECIMENTOS

Muitas das idéias aqui expostas em relação aos métodos astronômicos foram absorvidas em exposições do Prof. Dr. Ramacrishna Teixeira em 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 recente visita ao DGFI, em Munique, com o Dr. Hermann Drewes e o Dr. Klaus Kaniuth serviram para aperfeiçoar algumas idéias.

## 8. 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.
- DICKEY J. (2001). Interdisciplinary Space Geodesy: Challenges in the New Millennium. Jet Propulsion Laboratory. Internal report. Pasadena.
- GEMAE L. C. (1981). Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- 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.
- IER S (1995). Missions and goals for 2000. IERS-IUGG-IAU. Observatoire de Paris. Paris.
- IER S (1997). 1997 IERS Annual Report. Observatoire de Paris. Paris.
- 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.
- 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.

(Invited paper. Recebido em 14/05/02.)