

Sistemas Geodésicos de Referência

Pratica de Docênciā

Doutorando Henry D. Montecino C.^{1,2}
Profa. Doutora Regiane Dalazoana.¹
henrymontecino@udec.cl

¹Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná - UFPR, Brasil

²Departamento de Cs. Geodésicas y Geomática
Universidad de Concepción - UdeC, Chile

Pratica de Docênciā, Abril de 2017



Motivação

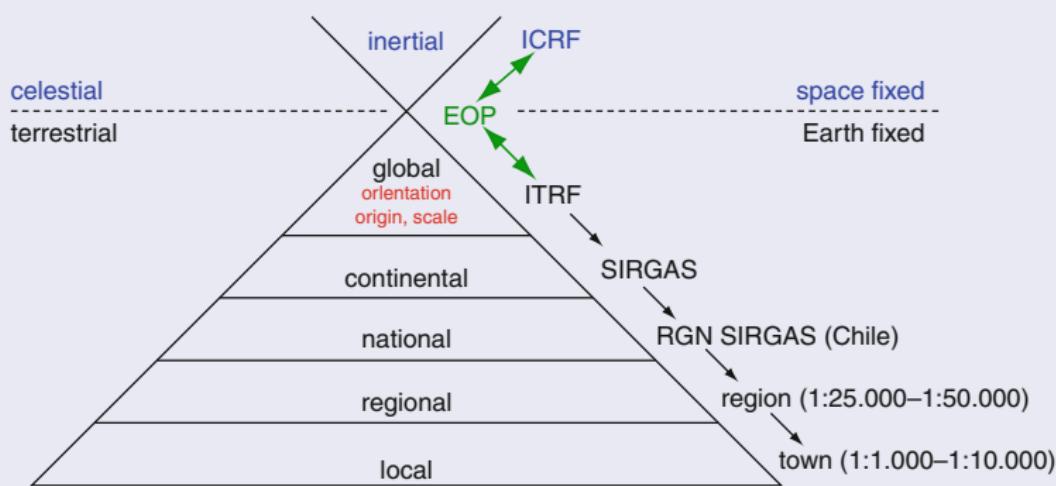


Figura : Jerarquia dos Sistemas Geodésicos de Referência

A definição e a realização dos sistemas de referência são imprescindíveis para modelar as observáveis, descrever as órbitas dos satélites, representar, interpretar e, quando necessário, transformar os resultados.

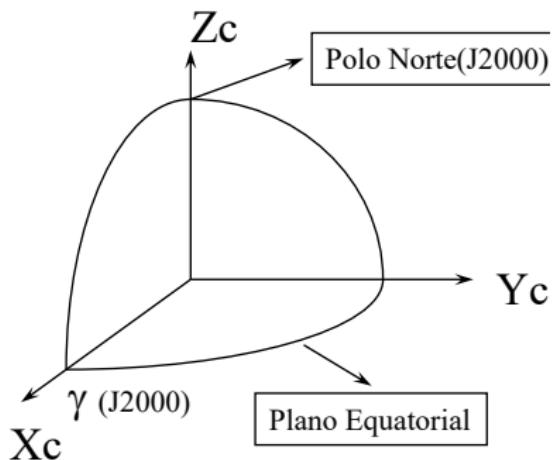
Elementos básicos en un SGR

Sistema de Referencia (*System*)

- Constantes, convenciones, modelos e parâmetros, que servem como a base necessária para a representação matemática de as quantidades geométricas e físicas;
- e.g. um sistema cartesiano tridimensional com origem no geocentro, orientação equatorial, escala métrica e gira com a Terra; e
- O International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) prepara a definição dos denominados sistemas de referência convencionais e seu implementação.

Rede de Referencia (*Frame*)

- Elementos necessários para a realização de um sistema de referência;
- No caso celestes fixos, é essencialmente um catálogo adoptado de objetos celestes como estrelas o quasares; e
- No caso terrestre as coordenadas dos pontos (estaciones terrestres, observatórios), assim como suas velocidades.



- CCRS: (Convencional Celestial Reference System)
- Coordenadas Equatoriais
- Origem: Centro Massa Terra
- Eixo X_c : aponta para o equinócio vernal médio as 12 hs TDB (Barycentric Dynamical Time) em 1 de janeiro de 2000 (Dia Juliano 2451545,0), época J2000.
- Eixo Z_c : direção do pólo norte celeste médio para a época J2000
- Eixo Y_c : completa o sistema dextrógero.
- O CCRS substituiu oficialmente o sistema FK5 em 1° de janeiro de 1998.
- O CCRS baseia-se numa definição cinemática, fazendo com que as direcções do eixo fiquem fixas em relação à matéria distante do universo

Conventional Celestial Reference Frame - CCRF

- O CCRS é materializado por um referencial celeste (CCRF) definido pelas coordenadas precisas de objetos extragalácticos, principalmente quasares;
- Essas fontes estão tão distantes que seus movimentos adequados esperados devem ser insignificantemente pequeno; e
- As posições atuais são conhecidas como melhores que um miliarsegundo, sendo a precisão máxima limitada principalmente pela instabilidade da estrutura das fontes em comprimentos de onda de rádio.
-

Conventional Terrestrial Reference System - CTRS

Sistema de Referência Terrestre Convencional (CTRS). Um CTRS é definido pelo conjunto de todas as convenções, algoritmos e constantes que fornecem a origem, escala e orientação desse sistema e sua evolução temporal (McCarthy and Petit 2004).

Conventional Terrestrial Reference Frame - CTRF

Rede de Referência Terrestre Convencional (CTRF). Uma Rede de Referência Terrestre Convencional é definido como um conjunto de pontos físicos com coordenadas precisamente determinadas em um sistema de coordenadas específico como a realização de um Sistema de Referência Terrestre ideal. Actualmente, distinguem-se dois tipos de Redes, nomeadamente dinâmicos e cinemáticos, dependendo se um modelo dinâmico é ou não aplicado no processo de determinação destas coordenadas (McCarthy and Petit 2004).

International Celestial Reference System-ICRS

Sistemas de Referência Celestes

Aantecedentes Gerais (Seitz et al. 2014):

- O *International Celestial Reference System-ICRS* também é conhecido como sistema inercial; e
- O ICRS é um sistema de orientação, ou seja a posição de um objeto vem dada pelos ângulos: ascensão reta (α) e declinação (δ).

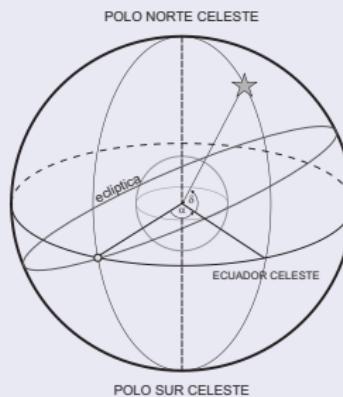


Figura : Sistema de coordenadas equatoriales celeste

International Celestial Reference System-ICRS

Sistemas de Referência Celestes

Definição c.f. (Seitz et al. 2014)

- O origem do ICRS está no baricentro do sistema solar;
- O polo celeste corresponde ao polo médio na época J2000 (01.01.2000, 12:00 (meio-dia) Hora Universal (UT)) predito por um modelo de Precessão e um modelo de Nutação;
- É coerente com o polo do catálogo de estrelas FK5;
- O origem da ascensão reta se define como perto do equinócio dinâmico em J2000.0.
- O eixo X se definiu inicialmente na realização com base na adopção da ascensão reta média de 23 fontes de rádio num grupo de catálogos consistentes compilado mediante a fixação da ascensão reta da fonte 3C273B ao valor do FK5;
- A escala é definida pelo metro no S.I.;
- Além do *ICRS*, existe um *Geocentric Equatorial Inertial System -GEIS*, definido analogamente a ICRS, pero com seu origem no geocentro.

International Celestial Reference Frame-ICRF

Rede de Referência Celestes

Realização c.f. (Seitz et al. 2014)

- A realização do ICRS é o ICRF;
- O ICRF consiste em posições de fontes de rádio extragalácticas. As fontes são, na maioria dos casos, quasares muito distantes;
- A última realização é a ICRF2;
- Calcula-se a partir da análise da observação *Very Long Baseline Interferometry - VLBI* realizado pelo grupo de VLBI no GSFC de EE.UU, baseado em longas series de tempo (≈ 30 anos) de dados VLBI.
- A IAU e o IERS agora realizam o cálculo e a liberação de uma nova realização, ICRF3, dentro dos próximos anos. Isto foi necessário, já que a missão europeia astrométrica espacial, que está em marcha desde o 2013, proporcionará um referencial celeste óptico com precisão da posição, cobertura do céu , e densidade sem precedentes; e
- Outras Realizações são: Catálogos estelares, efemérides planetárias, efemérides lunares, efemérides satelitais.

International Celestial Reference System-ICRS

Rede de Referência Celestes

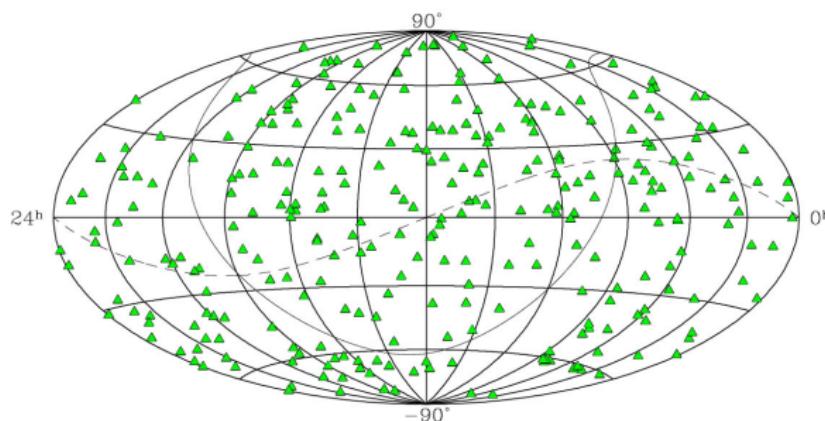


Figura : Mapa do Céu de 295 fontes do ICRF2. Creditos: Dave Boboltz / USNO

International Terrestrial Reference System-ITRS

Sistemas de Referência Terrestre

Antecedentes Gerais:

- Um *Terrestrial Reference System - TRS* é um sistema de referência espacial co-rotacional com a Terra no seu movimento diurno no espaço;
- As posições dos pontos unidos á superfície sólida da Terra tem coordenadas que se sometem a só pequenas variações com o tempo, devido aos efeitos geofísicos (p.ej. deformações tectónicas o de mares);
- Uma rede de referência terrestre (Terrestrial Reference Frame -TRF) é um conjunto de pontos físicos com coordenadas determinadas com precisão num sistema de coordenadas específico (cartesiana, geográfico, mapas, etc) unido a um sistema de referência terrestre. Tal TRF se disse que é una realização do TRS.
- Um exemplo de um TRS é o caso do ITRS com seu correspondiente realizacao ITRF. O ITRF é a rede de referecia geodésico mais preciso utilizado hoje em dia. Foi estabelecido pelo IERS.

International Terrestrial Reference System-ITRS

Sistemas de Referência Terrestre

A definição do ITRS é resumida como:

- Origem: Centro de massa da Terra incluindo o oceano e a atmosfera;
- Escala: O metro;
- Orientação: Coincidente com o sistema Bureau Internationale de l'Heure (BIH) 1984 ($\pm 3mas$).
- Evolução: No net rotation com respeito à crosta.
- Elipsoide: Geodetic Reference System 1980 (GRS80).

No Net Rotation

A condição NNR implica condicionar o momento angular nulo (minimizar a energia cinética) em toda a Terra:

$$h = \int_{crust} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} dm = 0 \quad (1)$$

Onde dm é um elemento de massa, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ as velocidades em x, y, z respetivamente.

International Terrestrial Reference System-ITRS

Origem-Sistemas de Referência Terrestre

Segundo Drewes (2009) a origem geocêntrica pode ser realizado por parâmetros gravimétricos porque o geocentro é definido como o centro de massa da Terra (M = massa total da Terra):

$$x_0 = \iiint x \frac{dm}{M}; y_0 = \iiint y \frac{dm}{M}; z_0 = \iiint z \frac{dm}{M}$$

As equações anteriores estão relacionadas com as fórmulas de mais abaixo para os coeficientes harmônicos esféricos do campo de gravidade da Terra (a = semi eixo maior da Terra):

$$C_{11} = \iiint x \frac{dm}{aM}$$

$$S_{11} = \iiint y \frac{dm}{aM}$$

$$C_{10} = \iiint z \frac{dm}{aM}$$

Isto significa que se no posicionamento por satélite é utilizado um modelo de campo de gravidade com $C_{11} = S_{11} = C_{10} = 0$ para a determinação das órbitas de satélite, é introduzido um sistema de coordenadas com a origem $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ (no geocentro).

International Terrestrial Reference Frame-ITRF

Rede de Referência Terrestre

A realização do ITRS é resumida como:

As Coordenadas x_{t_0} y velocidades v_{t_0} , na época t_0 de um grande número de estações, equipadas com al menos uma das técnicas (VLBI, SLR, GNSS e DORIS). Além disso...

- Três centros de combinação ITRS são estabelecidos: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), Institute Géographique National (IGN), e o National Resources Canada (NRCan);
- As diferentes realizações são denominadas $ITRF_{yyyy}$, onde o subíndice $yyyy$ representa o ano; e
- Os parâmetros de transformação entre realizações anuais são publicadas nas convenções do IERS. As coordenadas de uma estação numa época arbitrária t são derivadas de:

$$x_t = x_{t_0} + v \cdot (t - t_0) + \sum_i \Delta x_{it} \quad (2)$$

Onde t_0 é a época de referência, v a velocidade da estação, e Δx_i são correções devido a vários efeitos dependentes do tempo, tais como: Movimentos das placas tectónicas, As mares da Terra sólida, Carregamento oceânica, carregamento atmosférica, etc.

International Terrestrial Reference Frame-ITRF

Rede ITRF

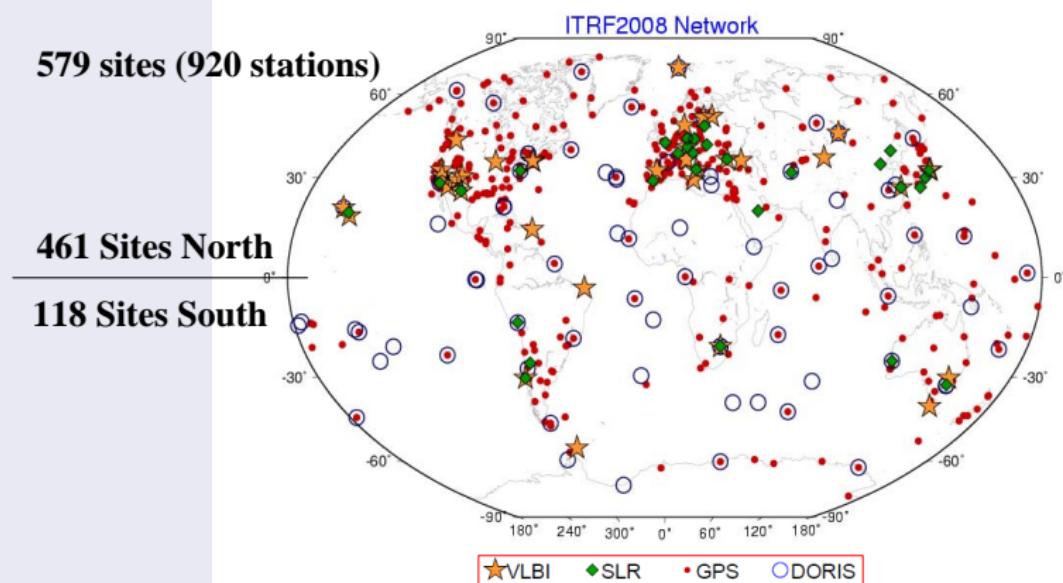


Figura : Estações ITRF2008 por técnica

International Terrestrial Reference Frame-ITRF

Benchmarks



Exercício

Necessita-se calcular a posição da estação UFPR para a época $t = 2010,35$, a qual tem as seguintes coordenadas e velocidades para a época de definição $t_0 = 2000,4$

$$\varphi_{t_0} = 25^\circ 26' 54,1269'' S \quad v_\varphi = 0,0123 m/a$$

$$\lambda_{t_0} = 49^\circ 13' 51,4372'' W \quad v_\lambda = -0,0034 m/a$$

Considere $1'' \approx 30m$

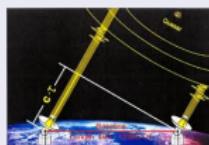
International Terrestrial Reference Frame-ITRF

Sensibilidade das técnicas da Geodesia Espacial

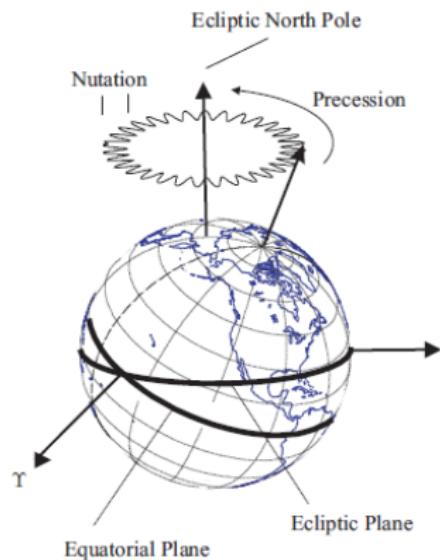
	Coord. estación	Coord. fuente	Polo Terr.	EOP			Parám. implícitos
			DUT1	LOD	Nutación	Origen	Escala
VLBI	X	X	X	X	X	X	X
SLR	X		X		X		X
GNSS	X		X		X		
DORIS	X		X		X		

Figura : Sensibilidade das técnicas geodésicas espaciais com respeito aos parâmetros geodésicos relacionados com as realizações do ITRS e ICRS

Técnicas

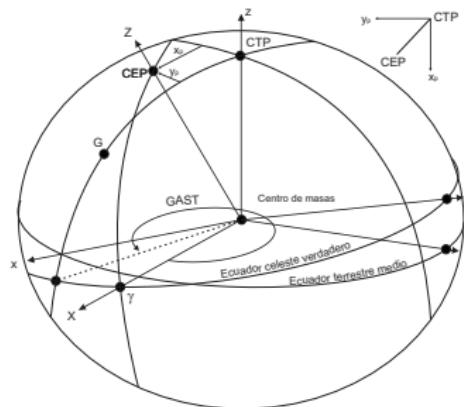
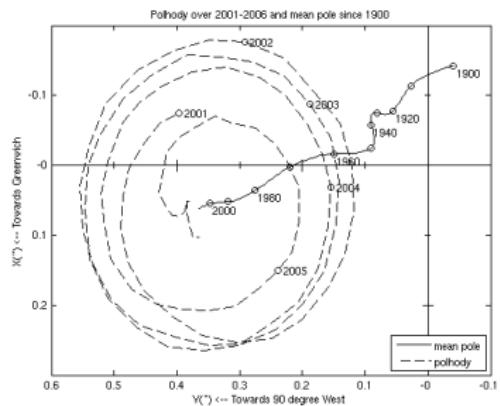


Transformação do ITRF ao ICRF



- O pólo de rotação da Terra não é fixo no espaço, porque principalmente o movimento de precessão e de nutação;
- A Precessão é o movimento circular lento, com o pólo de rotação com relação ao espaço inercial com um período de cerca de 26.000 anos;
- A Nutação é um movimento mais rápido sobreposta na precessão, e é constituída por um número de oscilações que varia desde um período de 14 dias 18,6 anos;
- Ambos os movimentos são previsíveis com um grau elevado precisão;
- *Length of Day - LOD*; e
- Movimento do polo.

Movimento do Polo



Transformação do ITRF ao ICRF

Variação em LOD (Pinjian 1994)

Variação	LOD	Causas
secular	$2 \cdot 10^{-3}$ sec/century	tidal friction
decade	0.0007 sec/year	core-mantle interaction
annual	0.5 msec	atmospheric movement;tides
semi-annual	0.3 msec	
50-day	0.2 msec	
monthly	0.5 msec	
fortnightly	0.5 msec	atmospheric movement;tides
day to hours	0.1 msec	

Variação no Movimento Polar (Pinjian 1994)

Variação	x_p, y_p	Causas
secular	$0,003''/year$	core-mantle interaction
Chandler wobble	$0,15''$	eigenvalue
annual	$0,1''$	atmospheric movement;tides
semi-annual	$0,05''$	
monthly		
fortnightly	a few milli-arcsecond	
day to hours		atmospheric movement;tides

Transformação do ITRF ao ICRF

Denotando as coordenadas de ICRF pelo vetor R_Y e as correspondentes coordenadas no ITRF pelo vetor r_{\oplus} , tem-se:

$$r_{\oplus} = [W][T][N][P]R_Y \quad (3)$$

Onde W , T , N e P são as matrizes do movimento do polo, GAST, nutacão, e precessão.

A transformação de coordenadas do ITRF para o ICRF é (Xu 2007):

$$R_Y = ([W][T][N][P])^{-1}r_{\oplus} = ([P][N][T][W])^T r_{\oplus} \quad (4)$$

- Movimento do polo

$$\begin{aligned} [W] &= R_M \\ &= R_2(-x_p)R_1(-y_p) \\ &= \begin{bmatrix} \cos x_p & \sin x_p \sin y_p & \sin x_p \cos y_p \\ 0 & \cos y_p & -\sin y_p \\ -\sin x_p & \cos x_p \sin y_p & \cos x_p \cos y_p \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

Transformação do ITRF ao ICRF

- Rotação da Terra

$$[T] = R_S = R_3(GAST) \quad (6)$$

Donde,

$$GAST = GMST + \Delta\Psi \cos \varepsilon + 0,00264'' \sin \Omega + 0,000063'' \sin 2\Omega \quad (7)$$

Onde $GMST$ é o Tempo Sideral Medio de Greenwich, Ω é a longitud media do nodo ascendente da Lua.

- Nutação

A matriz Nutação consiste em três matrizes de rotação sucessivas (Leick 2004)

$$\begin{aligned} [N] &= R_N = R_1(-\varepsilon - \Delta\varepsilon)R_3(-\Delta\psi)R_1(\varepsilon) \\ &\approx \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\psi \cos \varepsilon & -\Delta\psi \sin \varepsilon \\ \Delta\psi \cos \varepsilon_t & 1 - \Delta\varepsilon & 0 \\ \Delta\psi \sin \varepsilon_t & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Onde ε é a oblicuidad media do ángulo eclíptico da época, $\Delta\psi$ y $\Delta\varepsilon$ são os ángulos de nutação en longitud e oblicuidad, $\varepsilon_t = \varepsilon + \Delta\varepsilon$, y

$$\varepsilon = 84381,448'' - 46,8150''T - 0,00059''T^2 + 0,001813''T^3$$

Transformação do ITRF ao ICRF

- Precessão

A matriz Precessão consiste em três matrizes de rotação sucessivas (Leick 2004)

$$R_P = R_3(-z)R_2(\theta)R_3(-\eta)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos z \cos \theta \cos \eta - \sin z \sin \eta & -\cos z \cos \theta \sin \eta - \sin z \cos \eta & -\cos z \sin \theta \\ \sin z \cos \theta \cos \eta + \cos z \sin \eta & -\sin z \cos \theta \sin \eta + \cos z \cos \eta & -\sin z \sin \theta \\ \sin \theta \cos \eta & -\sin \theta \sin \eta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde z, θ, η são os parâmetros de Precessão

Exemplo:

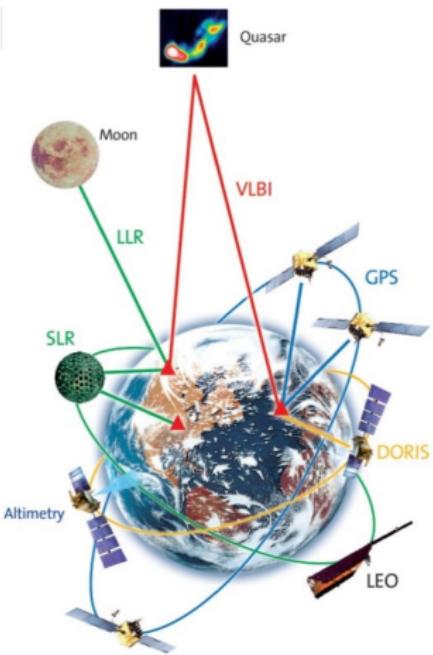
Despreciando a Precessão, Nutação e o movimento polar mostrar que:

$$\begin{bmatrix} X_\Upsilon \\ Y_\Upsilon \\ Z_\Upsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\oplus \\ Y_\oplus \\ Z_\oplus \end{bmatrix}$$

onde $\theta = GAST$.

Calcular $X_\Upsilon, Y_\Upsilon, Z_\Upsilon$ para o ponto de latitude $\varphi = 30^\circ N$, $\lambda = 191^\circ E$, $R_\oplus = 6371km$ e $\theta = 304^\circ$.

Global Geodetic Reference System-GGRS



- A Assembleia Geral das Nações Unidas aprovaram a resolução sobre o Referencial Geodesico Global (GGRF) para o desenvolvimento Sustentável o 26 de Fevereiro de 2015;
- O GGRF inclui a geometria, campo da gravidade da Terra, e orientação da Terra com respeito ao referencial celeste;
- O GGRF é um Referencial Geodesico Integrado, incorporando o ITRF e o ICRF, o futuro Referencial Internacional de Altitudes (International Height Reference Frame - IHRF), e a nova rede global de gravidade absoluta (IGSNN) de acordo com as resoluções No. 1 e No. 2 da IAG 2015, respectivamente.

Global Geodetic Reference System-GGRS

Definição do GGRS

- Para o ponto físico P , o potencial $W_P = W(X)$ é avaliado na coordenada X no ITRS;
- A unidade de tempo é o segundo e a unidade de comprimento é o metro ambos dois no SI;
- A altitude física é a diferença $-\Delta W_P$ entre o potencial W_P do campo de gravidade da Terra no ponto P considerado e o potencial geoidal do elipsóide de nível W_0 ;
- O vetor de gravidade g é o gradiente do potencial do campo de gravidade da Terra;
- Geometria e gravidade são funções implícitas do tempo;
- São necessários parâmetros fundamentais e convenções para o uso de modelos, por exemplo, o sistema de maré e procedimentos;
- O ICRS, baseado numa definição cinemática, é um sistema quase inercial. O ICRS fornece a base celeste para o GGRS;
- A relação entre o ITRS e o ICRS é descrita pelos EOP.

Global Geodetic Reference System-GGRS

Realização do GGRS

A rede de pontos terrestres é global, com densificação nacional e regional da infra-estrutura geodésica. Esta rede de estações GGRF tipicamente compreende:

- observatórios geodésicos fundamentais que empregam todas as técnicas geodésicas espaciais co-localizadas com instrumentos gravimétricos, permitindo a ligação entre X , W e g ;
- Outras estações geodésicas que incluem também maregrafos de referência, pontos de referência de altura e pontos gravimétricos co-localizados sempre que for possível com instrumentos geodésicos espaciais.

Todas as estações GGRF devem ser:

- funcionar continuamente, a longo prazo, para assegurar a estabilidade do GGRF;
- equipada com tecnologia de observação de ponta para produzir Medidas de quantidades geodésicas;
- Monitorado continuamente para detectar deformações superficiais da Terra; e
- Conectados a datums verticais para relacionar com precisão suas diferenças de geopotencial para unificação.

Referencias I

- Drewes, H. (2009). Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum - Basic Considerations. *International Association of Geodesy Symposia*, 133:3–9.
- Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. Wiley.
- McCarthy, D. D. and Petit, G. (2004). *IERS conventions (2003)*.
- Pinjian, L. (1994). Determination of earth rotation parameters and adjustment of a global geodetic network using the global positioning system.
- Seitz, M., Angermann, D., Gerstl, M., Bloßfeld, M., Sánchez, L., and Seitz, F. (2014). Geometrical reference systems. In Freedon, W., Nashed, M. Z., and Sonar, T., editors, *Handbook of Geomathematics*, pages 1–35. Springer Berlin Heidelberg.
- Xu, G. (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Springer.