

Los sistemas geodésicos de referencia. Evolución y tendencias actuales.

Geodetic Reference Systems. Evolution and current trends.

Dr. C. Noel Palmero Hernández. (1)

1. Empresa de Alta Tecnología UCT-IC. palmero@uct.geocuba.cu

RESUMEN.

En el artículo se aborda cuál es la tendencia actual de los Sistemas Geodésicos de Referencia (SGR), dado el hecho que las tecnológicas de posicionamiento por Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS) garantizan una cobertura global, con elevada operabilidad y exactitud, que han sustituido a las llamadas convencionales y que permiten ajustarse a los Marcos de Referencias Terrestres Internacional (ITRF) definidos por el Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS). Como aspecto novedoso y de importancia, además que contribuye a la ciencia y la técnica es el enfoque metodológico del artículo, que argumenta la evolución y tendencias actuales de los SGR, dejando sintetizado la manera de adoptar un ITRF.

Se exponen los beneficios de la adopción de algún ITRF como SGR (Datum Geodésico); así como la inconsistencia de los SGR locales para los estudios científicos sobre la geodinámica; y que constituyen un obstáculo para la integración a proyectos científicos en el ámbito nacional, regional y global.

Palabras claves: Datum Geodésico, Marcos de Referencias Terrestre, Sistemas Geodesics de Referencia, Sistemas Globales de Navegación por Satélites.

ABSTRACT

The article addresses the current trend of Geodetic Reference Systems (GRS), given that positioning technologies using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) guarantee global coverage, with high operability and accuracy, which have replaced conventional systems and allow for adaptation to the International Terrestrial Reference Frames (ITRF) defined by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). A novel and important aspect that contributes to science and technology is the methodological approach of the article, which argues the evolution and current trends of GRS, summarizing the way to adopt an ITRF.

The benefits of adopting an ITRF as a GRS (Geodetic Datum) are presented; as well as the inconsistency of local GRS for scientific studies on geodynamics; which constitute an obstacle for integration into projects scientists at the national, regional, and global levels.

Key words: Geodetic Datum, Terrestrial Reference Frames, Geodetic Reference Systems, Global Navigation Systems.

Recibido: 5/05/25

Apobado: 02/06/25

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Geodésicos de Referencias (SGR) surgen como una necesidad del desarrollo de la humanidad. Esta exige de una georreferenciación común con una determinada exactitud.

El artículo en su desarrollo fundamenta la necesidad e importancia de asumir un ITRF como SGR, dando un enfoque metodológico para su adopción.

El primer SGR se proyectó en 1872, con el objetivo de establecer un Nivel Medio del Mar (NMM) que fuera referencia común para el Sistema de alturas. Se utilizó el observatorio de Posdam, Alemania. En esa época no se había definido el meridiano de Greenwich como inicial para dar el valor de la coordenada geográfica de Longitud, que permitió el establecimiento del Tiempo Universal, lo cual ocurrió el 22 de octubre de 1884 en la Conferencia Internacional del Meridiano celebrada en Washington DC para establecer "un sistema de coordenadas estándar para la navegación marítima y la Cartografía".

Luego a través de las Mediciones de Grados se fueron obteniendo los parámetros geométricos de elipsoides que más se adaptaban a la figura de la Tierra como son el semieje mayor (a), semieje menor (b), la excentricidad (e) y el achatamiento (f).

Estos fueron adoptándose como la figura matemática de representación de la Tierra en los países o regiones que cubrían tales mediciones, orientándose en una primera aproximación por el denominado método sencillo, consistente en seleccionar un punto al que se les determinaba por métodos astronómicos su posición geográfica expresadas en las coordenadas Latitud (Φ) y Longitud (λ) astronómicas; así como el Acimut astronómico (A) en una dirección del terreno hacia otro punto y la distancia. Estos parámetros definían los denominados hoy Datums Geodésico clásicos. Ejemplos de ellos el Nort American Datum (NAD) □ NAD-27, Datum europeo ED-50.

Por lo anterior expresado, un SGR establecido de esa manera es local, no geocéntrico y es fijo al cuerpo de la Tierra, referido a una época.

A la República de Cuba fue exportado el NAD-27, siendo hasta nuestros días el reconocido internacionalmente.

No fue hasta que el hombre conquistara el espacio ultraterrestre, la posibilidad del desarrollo de las mediciones desde el espacio y establecer SGR geocéntricos e introducir y utilizar el Sistema de Coordenadas Cartesianas Espaciales (SCCE), con tres ejes con punto de origen en el geocentro o muy cercano a este y llegar a los modernos SGR geocéntricos, que aunque se definen para una época y fijos a la Tierra, son el importante salto para el conocimiento de la evolución de nuestro planeta y de la actividad humana en un mundo globalizado. Se tiene el World Geodetic System (WGS) WGS-84, como el más representativo y utilizado, con el que opera el GNSS "NavStar GPS". También, ya se puede incluir el GLONASS que opera en el Sistema denominado PZ-90.

DESARROLLO.

El paso de los SGR locales a geocéntricos globales.

El Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS), fue fundado en 1988 con la misión de definir el Sistema Internacional de Referencia Celeste (ICRS) y ponerlo en la práctica mediante el Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF); así como el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) y ponerlo en la práctica mediante el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). Además, ¡los Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP) para describir la relación variable en el tiempo entre el ICRF y el ITRF; así como estándares, constantes, modelos y datos geofísicos relacionados para la interpretación.

El ICRF se compone de coordenadas ecuatoriales de fuentes de radio extragalácticas observadas con tecnología de Interferometría de Bases Super Largas (VLBI por su acrónimo en inglés), lo que forma un marco casi de inercia, mientras que el ITRF se compone de un conjunto de coordenadas cartesianas tridimensionales y sus velocidades correspondientes que, en teoría, forman un marco de referencia ideal fijado a la corteza y centrado en la Tierra.

Anteriormente a los SGR actuales se tenía que distinguir los SGR Horizontales (planimétricos) de los SGR Altimétricos, lo que no es necesario en la actualidad, con el empleo del SCCE y el Modelo del Geoide compatible con el ITRF adoptado, debido a que existe el algoritmo de paso de SCCE a geodésicas.

Por otra parte, con la llegada de los GNSS quedan en desuso los métodos planimétricos tradicionales de desarrollo de las redes geodésicas (Triangulación, poligonometría), imponiéndose el empleo masivo de los GNSS, que, por su operatividad, elevada exactitud, tiene alcance en prácticamente todas las esferas de la vida económica, social y científica.

Al emplear GNSS las soluciones están referidas a un SGR Global que puede conectarse con las soluciones obtenidas con anterioridad en los SGR Locales, mediante los parámetros de transformación, obtenidos básicamente por la relación de parámetros geométricos y físicos (del campo gravitatorio) y posición de varios puntos de la Tierra comunes en ambos sistemas, dados tanto en el sistema de coordenadas geodésicas (elipsoidales), como en el SCCE.

Existen varios modelos para la obtención de los parámetros de transformación descritos en la bibliografía especializada:

Para sistemas paralelos.

Modelo estándar de Molodensky. (5 parámetros)

$$\begin{aligned}\bar{\varphi}_i - \varphi_i &= \frac{\rho}{M_i + h_i} (\text{Sen } \varphi_i \text{Cos } \lambda_i X_0 + \text{Sen } \varphi_i \text{Sen } \lambda_i Y_0 - \text{Cos } \varphi_i Z_0 - \left(M \frac{a}{b} + N \frac{b}{a} \right) \Delta \alpha \text{Sen } \varphi_i \text{Cos } \varphi_i - \\ &\quad - (Ne^2 \text{Sen } \varphi_i \text{Cos } \varphi_i) \Delta a \\ \bar{\lambda}_i - \lambda_i &= \left(\frac{\rho}{(N + h)_i \text{Cos } \varphi_i} (\text{Sen } \lambda_i X_0 - \text{Cos } \lambda_i Y_0) \right)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\bar{h}_i - h_i = -\text{Cos } \varphi_i \text{Cos } \varphi_i X_0 - \text{Cos } \varphi_i \text{Sen } \varphi_i Y_0 - \text{Sen } \varphi_i Z_0 + \frac{a}{N \Delta a} - \frac{Nb}{a \text{sen}^2 \varphi_i \Delta \alpha}$$

Para sistemas no paralelos.

Modelo de Bursa-Wolf

Preferiblemente se utiliza con sistemas geodésicos mundiales.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_A = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_B + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & 0 & -Z_1 & Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & Z_1 & 0 & -X_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & -Y_1 & X_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & X_i & 0 & -Z_i & Y_i \\ 0 & 1 & 0 & Y_i & Z_i & 0 & -X_i \\ 0 & 0 & 1 & Z_i & -Y_i & X_i & 0 \end{bmatrix}_B \times \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ \mu \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

i=1,....,n

Modelo de Molodensky- Badekas

Paso 1: Cálculo de la relación de escala μ y los ángulos de Rotación;

Paso 2: Cálculo de las traslaciones.

Paso 1

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_A = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_B + \begin{bmatrix} x_1 & 0 & -z_1 & y_1 \\ y_1 & z_1 & 0 & -x_1 \\ z_1 & -y_1 & x_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & 0 & -z_i & y_i \\ y_i & z_i & 0 & -x_i \\ z_i & -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix}_B \times \begin{bmatrix} \mu \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Paso 2

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{A_{prom}} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{B_{prom}} - \begin{bmatrix} X & 0 & -Z & Y \\ Y & Z & 0 & -X \\ Z & -Y & X & 0 \end{bmatrix}_{B_{prom}} \times \begin{bmatrix} \mu \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

dónde:

A- Sistema de referencia Local

B- Sistema de referencia mundial

$$x_i = X_i - X_{prom}$$

$$y_i = Y_i - Y_{prom}$$

$$z_i = Z_i - Z_{prom}$$

SOLUCIONES DE ITRF.

El IERS ha publicado los siguientes ITRF: ITRF88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95,96, 97, una combinación de 96+97, 2000, 2005, 2008, 2014 y el 2020.

Los ITRF están constituidos por una lista de estaciones a nivel mundial con sus valores de coordenadas referidas a una época de referencia y sus velocidades anuales.

El ITRF2020 es la última versión hasta el año 2025, mejorando el ITRF 2014. Se obtuvo de reprocesa soluciones de las técnicas geodésicas: VLBI, SLR, GNSS, y DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite).

MODELO DE TRANSFORMACIÓN.

$$\begin{aligned} X &= X_1 + \Delta m X_1 + \varepsilon_Z Y_1 - \varepsilon_Y Z_1 + X_0 \\ Y &= Y_1 + \Delta m Y_1 + \varepsilon_X Z_1 - \varepsilon_Z X_1 + Y_0 \\ Z &= Z_1 + \Delta m Z_1 + \varepsilon_Y X_1 - \varepsilon_X Y_1 + Z_0 \end{aligned} \quad (5)$$

En su representación matricial:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 + (1 + \Delta m) \times \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 \quad (6)$$

A continuación se muestran los parámetros de transformación desde el ITRF 2020 a los demás ITRFs. Publicada por IERS.

Tabla 1. Parámetros de transformación de ITRF2020 a otros ITRFs publicados por IERS.

Transformation parameters from ITRF2020 to past ITRFs.

SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS----->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2014	-1.4	-0.9	1.4	-0.42	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.0	-0.1	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	
ITRF2008	0.2	1.0	3.3	-0.29	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.0	-0.1	0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.7	0.1	-1.4	0.65	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.3	-0.1	0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	-0.2	0.8	-34.2	2.25	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.1	0.0	-1.7	0.11	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-65.8	1.9	-71.3	4.47	-3.36	-4.33	0.75	2015.0
rates	-2.8	-0.2	-2.3	0.12	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	14.5	-1.9	-85.9	3.27	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	26.5	12.1	-91.9	4.67	0.00	0.00	0.36	2015.0

rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	24.5	8.1	-107.9	4.97	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	29.5	32.1	-145.9	8.37	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	24.5	-3.9	-169.9	11.47	0.10	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	

SQUEMA METODOLÓGICO PARA LA ADOPCIÓN DE UN MARCO ITRF DESDE UN SGR LOCAL.

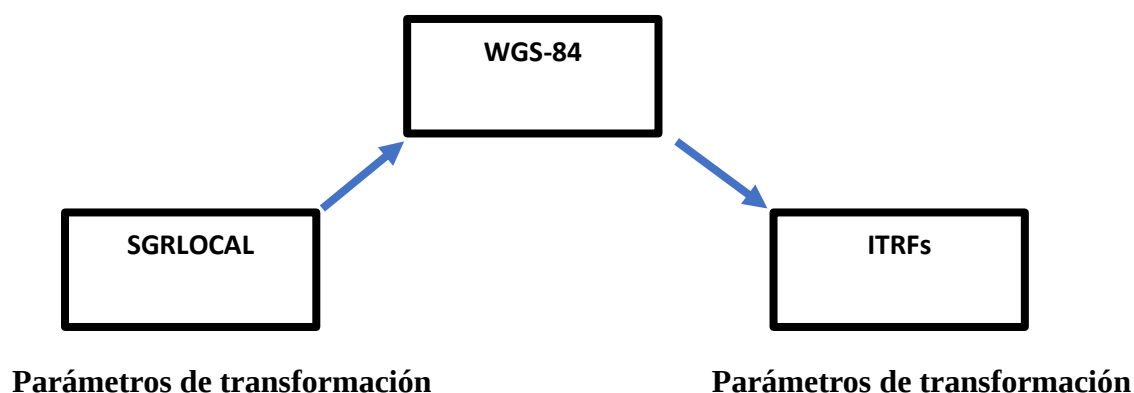


Figura 1. Expresa de forma gráfica la adopción de un marco ITRF desde un SGR Local.

BENEFICIOS QUE APORTA LA ADOPCIÓN DE UN ITRF COMO DATUMS.

Partiendo del hecho que han quedado obsoletos (inoperantes) los métodos y las tecnologías para el desarrollo de las redes geodésicas, principalmente referidas a las posiciones planimétricas, siendo reemplazados por los GNSS, que operan desde el espacio ultraterrestre a varios miles de km de la superficie de la Tierra de forma permanente y total cobertura, propiciando las posiciones de los puntos referidos a DATUMS geocéntrico en coordenadas en el Sistemas Cartesiano Espacial con elevadas precisiones y exactitudes, es incuestionable que se está en presencia de la mejor decisión para un SGR de un país o región geográfica, dado que:

- Al obtenerse las soluciones referidas al WGS-84, las diferencias en las posiciones de los puntos son menores a las que se originan desde posiciones de SGR locales.
- Las soluciones de los parámetros de transformación son más confiables, ya que sus errores medios cuadráticos tienden a ser más pequeños.
- De las dos anteriores, se puede plantear que para muchas aplicaciones no se necesita realizar transformaciones ya que las diferencias no son significativas.

- Se aportan datos de mayor calidad y coherencia para el monitoreo y modelación de la figura de la Tierra y su geodinámica tanto local, regional como a nivel global.
- Propicia la integración en proyectos científicos.

CONCLUSIONES.

1. Los Sistemas Geodésicos de Referencias han evolucionado hacia la adopción de Marcos de Referencias denominados ITRFs, a partir de las nuevas tecnologías de mediciones, sus elevadas exactitudes, cubrimiento global y softwares de procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos (mediciones).
2. Los Sistemas Geodésicos de Referencias locales como el NAD-27, no ofrecen consistencia para los estudios científicos sobre la geodinámica; así como son un obstáculo para la integración a proyectos científicos en el ámbito nacional, regional y global.
3. Las instituciones internacionales como IERS, IGS, aportan en sus publicaciones la información necesaria para la construcción de Sistemas Geodésicos de Referencias con Marcos modernos denominados Tres.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

1. itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt
2. Asociación Internacional de Geodesia (AIG) www.iag-aig.org
3. Servicio Internacional de los GNSS (IGS) www.igs.org
4. Servicio Internacional de Medición Láser (ILRS) <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
5. Servicio Internacional de VLBI (IVS) <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>
6. Servicio Internacional DORIS www.ids-doris.org
7. Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS).