

CAPÍTULO 8

Efectos de la rotación terrestre

Laura I. Fernández

The moment he was set at liberty, he looked up to the sky and down to the ground, and, stamping with his foot, in a contemplative mood, said, *Epur si move*; that is, still it moves, meaning the earth.

—Giuseppe Baretti. “*The Italian Library*”

La orientación instantánea de la Tierra en el espacio queda completamente determinada por tres cantidades independientes, por ejemplo, los ángulos de Euler. Sin embargo para poder vincular ambos sistemas de referencia, terrestre y celeste, es necesario incorporar parámetros adicionales.

Los Parámetros de la Orientación Terrestre (EOP, Earth Orientation Parameters) constituyen un juego de cinco parámetros que caracterizan completamente la orientación de la Tierra en el espacio, pero que también se utilizan para estudiar las irregularidades de la rotación terrestre.

Dos de los parámetros tienen en cuenta las diferencias entre la determinación observacional (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) del Polo celeste y su posición establecida por las teorías convencionales de Precesión y Nutación vigentes al momento del cálculo. Estas dos cantidades se conocen como corrimientos del Polo celeste (Celestial Pole Offsets) y el estudio de su evolución a lo largo del tiempo ha sido de gran importancia en la actualización de las convenciones de la IAU.

Los apartamientos de la rotación terrestre con respecto a un giro uniforme pueden estudiarse y monitorearse a partir de los tres parámetros adicionales. Dos de ellos se conocen como las componentes del movimiento del polo (x_p , y_p) y no son otra cosa más que las componentes ecuatoriales de la posición del eje instantáneo de rotación en el Sistema de Referencia Terrestre. El parámetro restante refiere a la diferencia entre el valor real de la velocidad angular de rotación de la Tierra y un valor constante (convencionalmente establecido) que debería tener la Tierra si rotara a velocidad uniforme. Un cambio en la velocidad del giro terrestre provocará obviamente un cambio en la longitud del día y es por esto que el parámetro

en cuestión suele denominarse como variación a la longitud del día (ΔLOD , $\Delta\text{Length-Of-Day}$). Su estimación se efectúa a partir de las diferencias entre dos escalas de tiempo: una escala no uniforme que contempla la velocidad real de rotación de la Tierra (TU1) y una escala de tiempo uniforme derivada del tiempo atómico internacional (TUC). Al subconjunto de los EOP formado por estos tres últimos parámetros, (x_p , y_p) y ΔLOD , también se los conoce como parámetros de la rotación terrestre (ERP, Earth Rotation Parameters).

En este capítulo presentaremos las definiciones y características de los cinco EOP que se utilizarán en el capítulo 10 para transformar una posición referida al Marco de Referencia Terrestre en una posición en un Marco de Referencia Celeste con origen en el Geocentro.

Corrimientos del Polo celeste

Para un dado instante, la posición y el desplazamiento previsto del Polo celeste en el Marco de Referencia Celeste queda completamente determinado por los modelos de Precesión y Nutación convencionalmente establecidos por la IAU. Si nos referimos a las series de la Nutación adoptadas por la IAU en 1980 (Seidelman, 1982) y el modelo de Precesión IAU 1976 (Lieske, 1977), entonces estaremos describiendo la posición y trayectoria del Polo Celeste de Efemérides (CEP, Celestial Ephemeris Pole). Si en cambio nos referimos a los modelos IAU vigentes desde el año 2000 (IAU2000A para Nutación e IAU2006 para Precesión), estaremos hablando del *Polo Celeste Intermediario* (CIP, Celestial Intermediate Pole). En cualquier caso, la posición del Polo celeste determinada a partir de mediciones (VLBI) diferirá de la posición convencionalmente establecida según el modelo vigente. Tales diferencias, entendidas como defectos o correcciones a los modelos, se denominan *Corrimientos del Polo Celeste*, comúnmente conocidos por su denominación en inglés *Celestial Pole Offsets* (CPO).

Tabla 8.1.

Corrimientos del Polo celeste instantáneo (CPO)

IAU1976/IAU1980	IAU2006/IAU2000A
$d\psi, d\epsilon$	dX, dY

Nota. Convenciones IERS 1996 a la izquierda e IERS 2010 a la derecha.

La posición de Ecuador Celeste Medio J2000.0 y su respectivo Polo en cualquier instante, esta teóricamente materializada por los modelos incluidos en las convenciones IERS 1996 que

describen el comportamiento dinámico de la Tierra en un sistema de referencia celeste dinámico e inercial. Durante la década de los años 90, diferentes trabajos científicos independientes demostraron que estos modelos son capaces de acumular algunas milésimas de segundos de arco (msa) de error con respecto a los mismos parámetros de la Precesión y la Nutación determinados a partir de las observaciones VLBI, que en esa época ya acumulaba aproximadamente 15 años de datos (Arias y otros, 1995). En otras palabras, los CPO alcanzaron varias milésimas de segundo de arco de amplitud.

Dado que los CPO pueden interpretarse como un estimador de los errores en la posición modelada del Polo celeste con respecto a un sistema de referencia fijo al espacio, este hecho marcó un llamado de atención acerca del comportamiento de los modelos IAU 1980 e IAU 1977. Estos últimos fueron adoptados décadas atrás cuando las mediciones astrométricas se realizaban mayormente en el rango visible. Tales mediciones resultan hoy imprecisas frente a las precisiones alcanzadas posteriormente con VLBI.

Los resultados de los trabajos publicados en la segunda mitad de los años '90 (Souchay y otros, 1995; Charlot y otros, 1994; Ma y otros, 1998) fueron consistentes y mostraron que el Polo del ICRS se apartaba del Polo celeste Medio Convencional J2000.0.

Mientras que Souchay y otros (1995); Ma y otros (1998) sólo consideraron datos VLBI, Charlot y colaboradores (1994) trabajaron con 24 años de datos LLR¹ (Lunar Laser Ranging) además de los 15 años de mediciones VLBI acumuladas al momento. En general todos los autores coinciden en señalar una tasa aproximada de variación en longitud ($\dot{\psi}$, Precesión lunisolar) de -3 msa/año y en oblicuidad ($\dot{\varepsilon}$, Nutación) de aproximadamente -0,25 msa/año, respectivamente.

Souchay y colaboradores (1995) propusieron correcciones, poniendo de manifiesto la necesidad de modificar y actualizar los modelos convencionales de la IAU a los nuevos requerimientos de precisión de las técnicas de la astrometría y geodesia espacial, que desde la década de los 90 paulatinamente reemplazaron a la mayoría de las observaciones astrométricas hechas en el rango visible.

En el marco de las convenciones IAU 2010, los CPO varían con magnitudes por debajo de 1 msa. De nuevo, estos expresan la diferencia entre la ubicación (X e Y) del eje instantáneo de rotación (CIP²) en el Marco de Referencia Celeste determinado por VLBI y su posición determinada por los modelos IAU2006 (para Precesión) (Capitaine y colaboradores, 2003; 2005) e IAU2000A (para Nutación) (Mathews y colaboradores, 2002). Actualmente los CPO se denominan como dX, dY y reemplazan a los anteriores parámetros $\dot{\psi}$ y $\dot{\varepsilon}$. Aunque las magnitudes de dX, dY son mucho más pequeñas, estos no resultan nulos a causa de la

¹ Técnica de la Geodesia Espacial basada en la determinación de los tiempos de viaje de ida y vuelta de pulsos láser entre una estación en la Tierra y espejos reflectores en la superficie de la Luna.

² Ver Capítulo 10

nutación libre del núcleo (FCN, Free Core Nutation; también conocida como Nutación Libre casi diurna). La FCN se origina en la rotación del núcleo fluido de la Tierra y tiene amplitud y fase impredecibles. Tanto la FCN como cualquier otro efecto que no se tenga en cuenta en los modelos de Precesión y Nutación adoptados impactará en los CPO (Kaplan, 2005).

Zerhouni y Capitaine (2009) estimaron las correcciones a las coordenadas del Polo celeste dX , dY usando datos de LLR. En ese trabajo los autores demostraron que aunque la técnica no es tan precisa ni tan densa en sus resultados como VLBI, la combinación de ambas técnicas puede revelar mayor cantidad de detalles que el uso de VLBI de forma aislada. En particular, las series de datos de ambas técnicas combinadas podrían mejorar la determinación del término de Nutación de 18.6 años. Recientemente, Belda y colaboradores (2018) presentan un método para la predicción de los CPO que utiliza modelos empíricos para la FCN, un factor determinante en las variaciones temporales de los CPO.

Movimiento del polo

Ya hemos visto que el eje instantáneo de rotación de la Tierra determina el Polo celeste Verdadero³ (IERS 1996) en el Marco de Referencia Celeste y sus desplazamientos en el sistema de referencia inercial son descritos por los respectivos modelos de Precesión - Nutación.

En esta sección consideraremos los desplazamientos del eje de rotación terrestre con respecto al Marco de Referencia Terrestre. En particular, el cambio instantáneo de dirección del eje de rotación con respecto a un eje z fijo o *Polo de la figura*⁴ en el Marco de Referencia Terrestre, se denomina *movimiento del polo* (MP) y puede parametrizarse con 2 cantidades (x_p, y_p) también conocidas como *coordenadas del polo terrestre*.

La posición del eje instantáneo de rotación (P) con respecto al eje de la figura (Z_i) se determina a través de sus coordenadas polares (γ, Γ) (Woolard y Clemence, 1966, p. 201).

En la Figura 8.1, puede verse que claramente que las coordenadas del eje instantáneo de rotación en el Marco de Referencia Terrestre serán $(x_p, -y_p, 1)$, donde convencionalmente se establece que

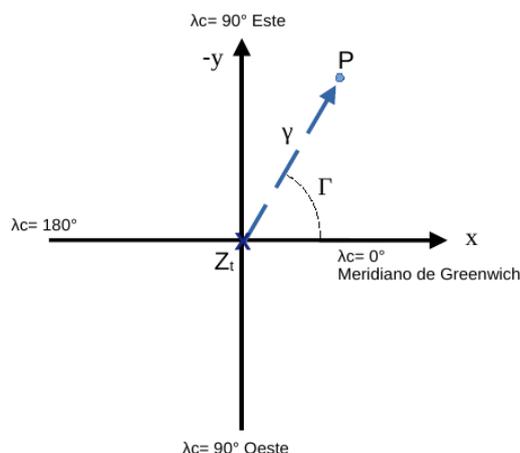
$$x_p = \gamma \cos \Gamma ; -y_p = \gamma \sin \Gamma \quad (8.1)$$

³ Equivalente al CIP en IERS 2010, ver Capítulo 10

⁴ Convencionalmente establecido según la dirección del máximo momento de inercia del planeta

Figura 8.1.

Coordenadas polares del eje instantáneo de rotación terrestre con respecto al eje de la figura (Z_i)



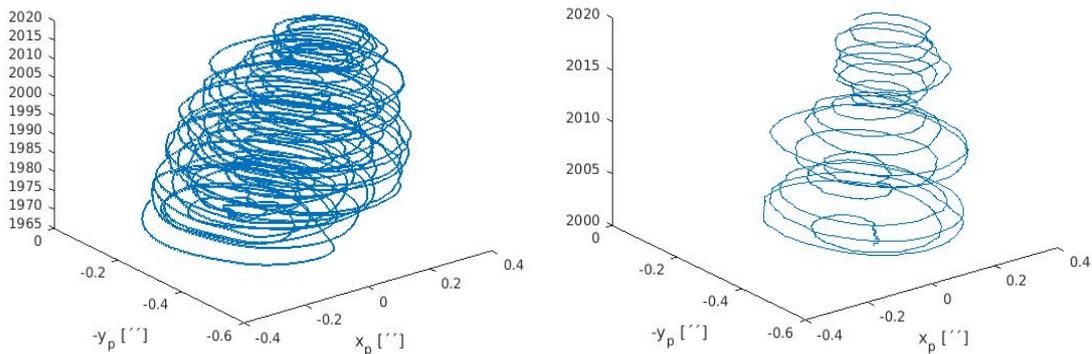
Nota. Vista desde un plano sobre el polo norte terrestre. λ_c refiere a la longitud terrestre convencional.

De lo anterior puede verse que la convención establece que la coordenada x se mide a lo largo del Meridiano de Greenwich, mientras que la coordenada y se mide a lo largo del meridiano 90° de longitud Oeste. El desplazamiento temporal de la posición del eje instantáneo de rotación con respecto al eje de la figura describe una curva característica denominada *polodhe* o *polodia* (ver figura 8.2). La amplitud de este movimiento casi circular varía entre $0,05''$ y $0,25''$ con un periodo aproximado de 6 años (ESAA, 1992). Asumiendo un valor de 6378,14 kilómetros para el radio ecuatorial de la Tierra, tales apartamientos equivalen a un arco de longitud entre 1,55 y 7,73 metros respectivamente sobre la superficie terrestre. El MP se compone por la superposición de varios movimientos con escalas de tiempo desde seculares a sub- diurnos que obedecen a los movimientos forzados por condiciones atmosféricas y/o geofísicas. Estas condiciones perturbadoras cambian continuamente alterando la dinámica de la rotación terrestre a partir de los movimientos angulares relativos generados y de las redistribuciones de masa que modifican el tensor de inercia del planeta.

La Figura 8.2 muestra los apartamientos observados del polo instantáneo de rotación con respecto al polo de la figura. Desde la Figura 8.2 (izq.) se distingue claramente una deriva de la trayectoria. La dirección de la deriva esta aproximada en $\lambda = 75^\circ$ Oeste y se estima que el efecto es causado por el rebote post-glacial y el deshielo de los glaciares (McCarthy y Seidelmann, 2018, p. 78).

Figura 8.2.

(Izquierda) Movimiento del polo en segundos de arco ["] en función del tiempo. (Derecha) Detalle de los últimos 20 años.



Casi todas las causas del movimiento del polo son eventos geofísicos⁵ y por ende, son independientes de la acción gravitatoria de fuerzas externas. Dado que en general estos eventos son impredecibles, la posición del Polo Instantáneo de Rotación se determina observacionalmente de modo regular. El Centro para la Orientación terrestre, perteneciente al IERS (<https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php>) es el encargado de brindar las coordenadas diarias del eje instantáneo de la rotación (Bizouard y otros, 2019).

El cambio instantáneo en la dirección del eje de rotación con respecto a la corteza terrestre puede analizarse en primera aproximación considerando un trompo que gira en torno a su eje.

En 1765 Euler predijo que si el eje de rotación de la Tierra no coincidía con el eje principal de inercia, entonces este describiría una circunferencia con respecto al eje de la figura en 305 días. En efecto, Euler consideró a la Tierra como un sólido rígido y simétrico respecto de eje polar. Por lo anterior, el cociente estimado de sus momentos de inercia será

$$\frac{I_3 - I_1}{I_3} = 0,00327 \quad (8.2)$$

donde $I_3 = 8,036 \times 10^{37} \text{ kg m}^2$ es el momento de inercia polar de la Tierra e $I_1 = 8,01 \times 10^{37} \text{ kg m}^2$ es el momento de inercia ecuatorial del planeta⁶. Además, desde la

⁵ A las causas geofísicas se superpone una pequeña parte remanente de la acción lunisolar con período diario (Woolard y Clemence, 1966)

⁶ Valores IAG 1999

Figura 8.3 podemos ver que si la velocidad angular de rotación de la Tierra ($\vec{\omega}$) se aparta un ángulo ξ de la dirección del eje de simetría z convencional, este vector ($\vec{\omega}$) comenzará a girar en torno a z precesando con una velocidad angular $\vec{\Omega}$ en un periodo T y describiendo un cono. De este modo, la proyección de ($\vec{\omega}$) en el eje z permanecerá constante (ω_z). Dado que el ξ estimado es de 0,125", de la Figura 8.3 puede verse que $\cos(\xi) = \omega_z / \omega$, pero ξ es un ángulo pequeño y por lo tanto, el valor de su coseno en radianes puede aproximarse a 1.

Luego, $\omega_z \simeq \omega$. El valor de la velocidad angular $\vec{\Omega}$ con la que el vector $\vec{\omega}$ gira en torno al eje z convencional será (Goldstein, 1994, p. 268-270)

$$\Omega = \frac{(I_3 - I_1)}{I_3} \omega_3 \quad (8.3)$$

Reemplazando los valores de ecuación (8.2) en la ecuación (8.3) y considerando $\omega = 2\pi/1$ día quedará $\Omega \simeq 0,0205$ [rad/día]. Luego, como $\Omega = 2\pi/T$ el periodo estimado para el movimiento Euleriano será $T \approx 306$ días.

En 1891 Seth C. Chandler descubre el efecto predicho por Euler a partir de observaciones y estima su amplitud en 0,5". Sin embargo, el periodo observado por Chandler resultó ser de 432 días en lugar de 306 (McCarthy y Seidelmann, 2018). La respuesta a esta diferencia se encuentra la falta de rigidez de la Tierra.

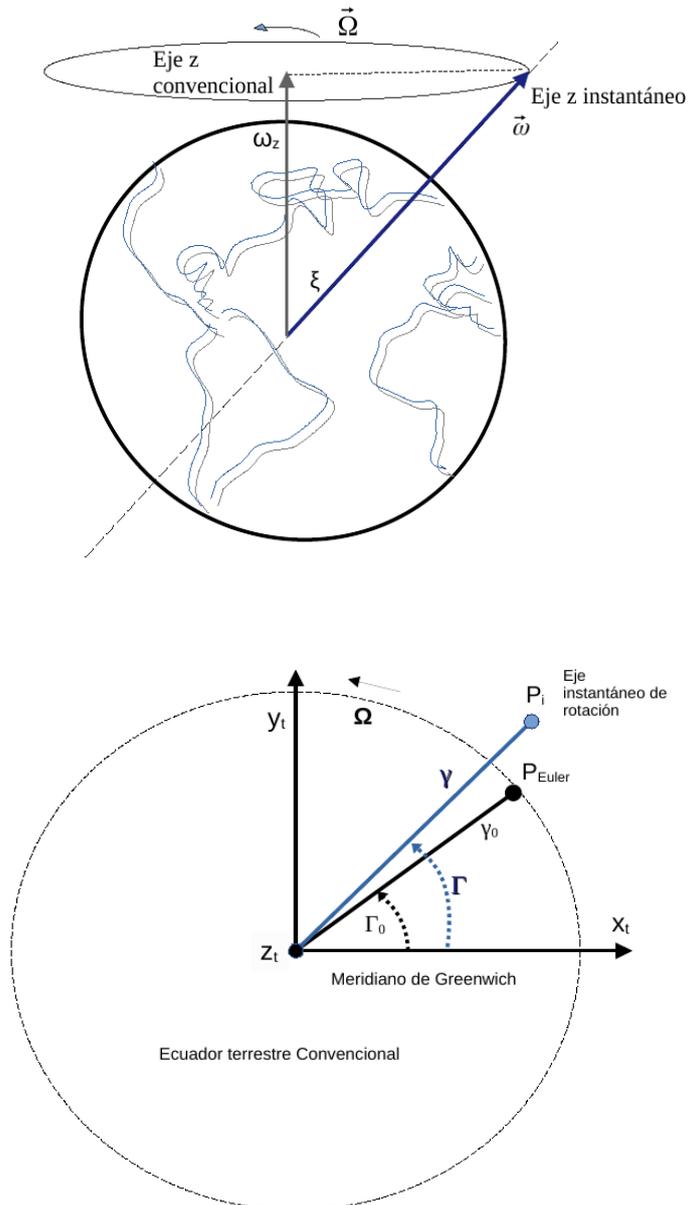
A partir de una análisis espectral de la señal puede verse que la contribución más importante a los términos periódicos del MP proviene de un término con periodo de 432-434 días denominado *bamboleo de Chandler* en honor a su descubridor. A esta contribución, siguen en importancia (considerando su amplitud) las variaciones estacionales (anuales y semi-anuales) debidas principalmente a las redistribuciones de masas de agua y atmosféricas durante el año.

Cambios en las coordenadas terrestres

El MP no afecta las coordenadas celestes (p. ej. α y δ) de un objeto celeste. Sin embargo afectará la reducción de todas las mediciones efectuadas con instrumental colocado en la superficie terrestre dado que producirá cambios en la latitud y longitud terrestres del sitio de observación.

Figura 8.3.

(Arriba) Movimiento Euleriano del vector velocidad angular $\vec{\omega}$ en torno al eje de simetría de la Tierra. (Abajo) Movimientos del Polo instantáneo de rotación y el Polo del movimiento Euleriano.



Nota. El movimiento Euleriano considera a la Tierra como un cuerpo rígido, simétrico y aislado. La figura de abajo muestra una vista superior del movimiento de los polos con respecto a los ejes del Marco de Referencia Terrestre convencional.

La variación de las latitudes geográficas debidas al movimiento del polo, también fueron confirmadas durante 1891. Efectivamente, se realizaron en simultáneo las determinaciones astronómicas de la latitud del lugar en dos estaciones apartadas casi 180° en longitud (λ): Berlín y Waikiki. Debido a este hecho las variaciones en latitud resultaron opuestas en fase. Estos descubrimientos empíricos, junto con el trabajo de Chandler, condujeron al establecimiento del Servicio Internacional de las Latitudes (ILS⁷) en 1895.

En sus comienzos, el ILS sólo dispuso de 5 estaciones ubicadas a una latitud de 39° 8' N y comenzó su operación rutinaria en 1899 (Smylie, 2013, p. 274). El ILS evolucionó a medida que pasaron los años y puede considerarse como uno de los precursores del actual IERS.

El procedimiento astronómico para determinar la latitud (ϕ) de una dada estación se conoce como método de Horrebow-Talcott⁸ y consiste en medir las distancias cenitales de pares de estrellas con declinación conocida, transitando al norte y al sur del cenit, respectivamente. Luego,

$$\phi = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) + \frac{1}{2}(z_s - z_n) \quad (8.4)$$

donde δ_1 y z_n son la declinación y distancia cenital de la estrella culminando al norte del cenit y δ_2 y z_s corresponden a la estrella culminando al sur de cenit. Las estrellas 1 y 2 se elegían por tener alturas (complemento de la distancia cenital) casi iguales y en general eran estrellas circumpolares. Cuando los valores de $z \lesssim 30^\circ$ y las culminaciones eran casi simultáneas, el uso de los telescopios cenitales y/o tubos fotográficos cenitales produjo determinaciones de ϕ de gran precisión (Woolard y Clemence, 1966, p. 229).

Siguiendo la interpretación de Woolard y Clemence, (1966, p. 199-200), la variación de las coordenadas terrestres (ϕ, λ) de una dada estación a causa del Movimiento del Polo puede deducirse matemáticamente desde la Figura 8.4. Nótese que se han indicado las intersecciones de los meridianos convencional e instantáneo con sus respectivos Ecuadores.

La Figura 8.5 nos muestra un detalle de los triángulos esféricos sobre los cuales debemos operar la deducir las respectivas fórmulas de variación. Comenzaremos operando sobre el triángulo con vértices en el eje z de la figura, el eje instantáneo de rotación y el cenit del lugar.

Aplicando la formula del coseno,

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0\right) \cos \gamma + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0\right) \sin \gamma \cos(-\lambda_0 + \Gamma) \quad (8.5)$$

$$\sin \phi = \sin \phi_0 \cos \gamma + \cos \phi_0 \sin \gamma \cos(-\lambda_0 + \Gamma) \quad (8.6)$$

⁷ International Latitude Service

⁸ También llamado "Método de alturas iguales", ver capítulo 4

Desarrollando el coseno de la diferencia y considerando que γ es un ángulo muy pequeño, por lo tanto si lo expresamos en radianes, es válido aproximar $\text{sen}(\gamma) \approx \gamma$ y el $\text{cos}(\gamma) \approx 1$

$$\text{sen } \phi \simeq \text{sen } \phi_0 + \gamma \text{ cos } \phi_0 [\text{cos } \lambda_0 \text{ cos } \Gamma + \text{sen } \lambda_0 \text{ sen } \Gamma] \quad (8.7)$$

Aplicando la propiedad distributiva y reemplazando por la ecuación (8.1)

$$\text{sen } \phi \simeq \text{sen } \phi_0 + \text{cos } \phi_0 [x_p \text{ cos } \lambda_0 - y_p \text{ sen } \lambda_0] \quad (8.8)$$

Si expresamos $\text{sen}(\phi)$ como $\text{sen}(\phi) = \text{sen}[(\phi - \phi_0) + \phi_0]$.

Denominando $\Delta \phi = \phi - \phi_0$ y desarrollando el seno de la suma

$$\text{sen } \phi = \text{sen } \Delta \phi \text{ cos } \phi_0 + \text{cos } \Delta \phi \text{ sen } \phi_0 \quad (8.9)$$

Dado que $\Delta \phi$ es muy pequeño, si lo expresamos en radianes

$$\text{sen } \phi \simeq \Delta \phi \text{ cos } \phi_0 + \text{sen } \phi_0 \quad (8.10)$$

Reemplazando la ecuación (8.10) en la ecuación (8.8)

$$\Delta \phi \text{ cos } \phi_0 + \text{sen } \phi_0 \simeq \text{sen } \phi_0 + \text{cos } \phi_0 [x_p \text{ cos } \lambda_0 - y_p \text{ sen } \lambda_0] \quad (8.11)$$

Simplificando adecuadamente, quedará

$$\Delta \phi \simeq [x_p \text{ cos } \lambda_0 - y_p \text{ sen } \lambda_0] \quad (8.12)$$

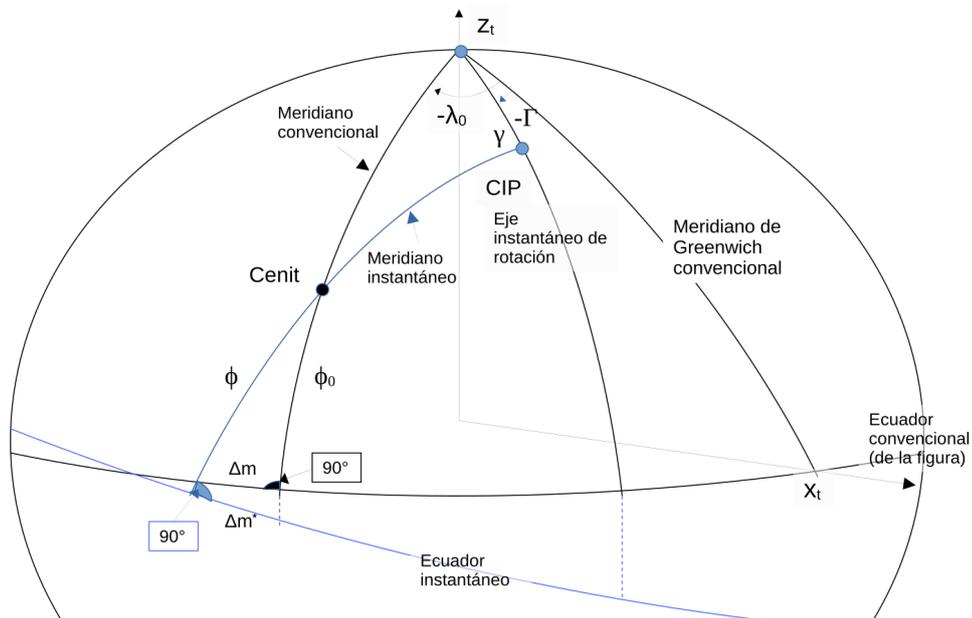
Para deducir las variaciones en las longitudes debido al Movimiento del Polo, aplicamos la fórmula del seno al mismo triángulo anterior

$$\frac{\text{sen } \Delta m}{\text{sen } \gamma} = \frac{\text{sen}(-\lambda_0 + \Gamma)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \quad (8.13)$$

$$\text{sen } \Delta m \text{ cos } \phi = \text{sen } \gamma \text{ sen}(-\lambda_0 + \Gamma) \quad (8.14)$$

Figura 8.4.

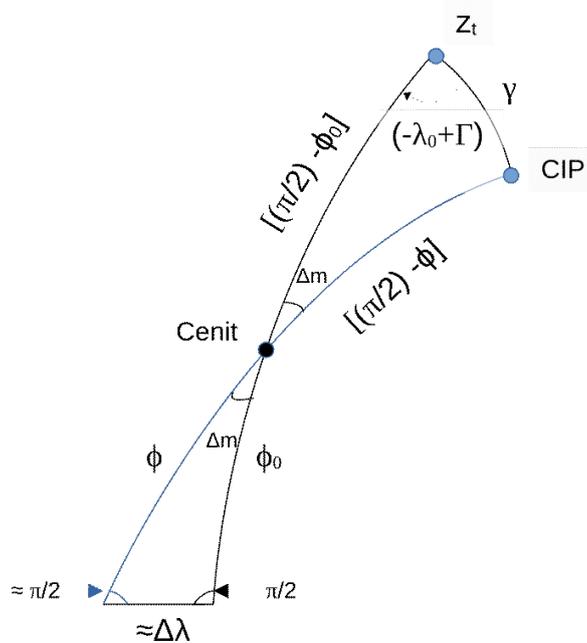
Variación de las coordenadas terrestres por movimiento del polo.



Nota. Sitio al oeste de Greenwich. Adaptado de *Spherical Astronomy* (p. 201), por Woolard E. W. y Clemence G. M., 1966, Academic Press.

Figura 8.5.

Triángulos esféricos involucrados en la variación de la latitud y longitud terrestres.



Nota. Sitio al oeste de Greenwich.

Dado que γ es un ángulo muy pequeño, la intersección del meridiano de lugar instantáneo con el Ecuador convencional no es estrictamente un ángulo recto, aunque su valor es muy próximo a $(\pi/2)$. Por esta razón, con el objetivo de cuantificar la diferencia entre las longitudes instantánea y convencional, puedo aproximar $\phi \approx \phi_0$ y la ecuación (8.14) quedará

$$\text{sen } \Delta m \cos \phi_0 \approx \text{sen } \gamma \text{ sen } (-\lambda_0 + \Gamma) \quad (8.15)$$

Desarrollando el seno de la diferencia y aproximando $\text{sen}(\gamma) \approx \gamma$ para γ expresado en radianes quedará

$$\text{sen } \Delta m \cos \phi_0 \approx \gamma [\text{sen } \Gamma \cos \lambda_0 - \cos \Gamma \text{ sen } \lambda_0] \quad (8.16)$$

Aplicando la propiedad distributiva y reemplazando con la ecuación (8.1),

$$\text{sen } \Delta m \cos \phi_0 \approx [-x_p \text{ sen } \lambda_0 - y_p \cos \lambda_0] \quad (8.17)$$

Para encontrar el valor del $\text{sen}(\Delta m)$ es necesario aplicar fórmula del seno al triángulo con vértices en el cenit, la intersección del meridiano de lugar convencional con el Ecuador convencional y la intersección del meridiano de lugar instantáneo con el Ecuador convencional. Por lo anterior, aunque este último ángulo no es exactamente igual a un ángulo recto, podemos aproximarlo a $(\pi/2)$ sin perder generalidad. Luego

$$\frac{\text{sen } \Delta m}{\text{sen } \Delta \lambda} \simeq \frac{\text{sen}(\pi/2)}{\text{sen } \phi_0} \quad (8.18)$$

$$\text{sen } \Delta m \simeq \frac{\text{sen } \Delta \lambda}{\text{sen } \phi_0} \quad (8.19)$$

Reemplazando la ecuación (8.19) en la ecuación (8.17) y despejando

$$\text{sen } \Delta \lambda \approx \frac{\text{sen } \phi_0}{\cos \phi_0} (-x_p \text{ sen } \lambda_0 - y_p \cos \lambda_0) \quad (8.20)$$

Nótese que el sitio escogido se ubica al oeste de Greenwich, luego $\Delta \lambda = -\lambda + \lambda_0$, por lo tanto la diferencia entre las longitudes instantánea y convencional será $-\Delta \lambda$. Como antes,

aproximando el seno de un ángulo pequeño por el valor del ángulo en radianes en la ecuación (8.20) resultará

$$\Delta \lambda \approx \operatorname{tg} \phi_0 (x_p \operatorname{sen} \lambda_0 + y_p \operatorname{cos} \lambda_0) \quad (8.21)$$

Cambios en la longitud del día

Ya hemos visto la cronología de los avances en el estudio del Movimiento del Polo. Analizaremos a continuación el estudio de los cambios en la velocidad de rotación terrestre.

Sin dudas el inicio a la comprobación empírica y el estudio de las irregularidades de la rotación terrestre puede ubicarse con precisión en la segunda mitad del siglo XIX.

La idea de la rotación terrestre, asociada al movimiento aparente diurno del cielo estrellado, fue objeto de controversias y numerosas teorías desde la antigüedad. Efectivamente, desde la época de Tolomeo (90-168 AC) se usó la posición del Sol en el cielo para medir intervalos de tiempo aún cuando los astrónomos ya sabían que medir tiempos a partir del movimiento diario del Sol no resultaría en una escala de tiempo uniforme (McCarthy y Seidelman, 2018, p. 10).

Una evidencia empírica de la rotación terrestre fue aportada por el péndulo de Foucault en el Observatorio de París en 1851. Pero fue Newcomb en 1878 el primero en considerar la posibilidad de una Tierra rotando irregularmente como respuesta y explicación a sus inconsistencias observacionales. Efectivamente, la falla continua en las teorías de la Luna intentando representar sus observaciones, lo llevaron a pensar que la rotación de la Tierra no era uniforme.

En el próximo capítulo veremos que las escalas de tiempo denominadas *rotacionales*⁹ están afectadas por irregularidades de la rotación terrestre, no sólo por el cambio en la velocidad de rotación sino también por el cambio en la posición del meridiano instantáneo de lugar debido al movimiento del polo.

El Tiempo Universal (TU) fue adoptado por la IAU en 1935 para designar tiempo medio¹⁰ desde el meridiano de Greenwich. Desde esa fecha hasta hoy evolucionó tanto su definición como la forma de determinarlo debido a las mejoras en el conocimiento y en la precisión instrumental (McCarthy y Seidelman, 2018, p. 15). TU puede vincularse matemáticamente al Tiempo Sidéreo Local. Por lo tanto las observaciones locales del ángulo de rotación terrestre a partir de la determinación del instante de tránsito de las estrellas por el meridiano de lugar, como ya hemos visto, serán afectadas por el movimiento del polo. La escala de TU así

⁹ Tiempo solar y tiempo sidéreo

¹⁰ Movimiento medio diurno del Sol

determinada se denomina TU0. Pero el Movimiento del Polo puede corregirse aplicando la ecuación (8.21) y al hacerlo, obtenemos TU1.

Así, TU1 representa una escala de tiempo derivada de las observaciones directas del ángulo de rotación de la Tierra en el espacio y por lo tanto seguirá afectada por las variaciones en la tasa de rotación, i.e. es una escala de tiempo *no uniforme*. Hoy día TU1 se determina principalmente a partir observaciones de VLBI.

La velocidad angular real de rotación diurna de la Tierra admite ser expresada como la adición de una tasa de rotación que varía uniformemente con TAI + correcciones que indican la falta de uniformidad de la rotación terrestre. Estas correcciones pueden escribirse como la diferencia entre una escala de tiempo rotacional y una escala de tiempo uniforme. En particular, están dadas por (TU1-TUC) o (TU1-TAI)¹¹.

La diferencia entre la duración del día determinada astronómicamente y 86400 segundos en una escala de tiempo uniforme (TAI) se denomina *exceso a la duración del día* (LOD¹²). La relación entre la velocidad angular de rotación de la Tierra (ω , en radianes por segundo) y LOD, medido en segundos, es

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{LOD}{86400} \right) \quad (8.22)$$

donde $\omega_0 = 72921151,467064 \times 10^{-12}$ *radianes/segundo* es tasa de rotación nominal o, lo que es lo mismo, la velocidad angular de rotación media del planeta convencionalmente fijada en la época 1820 (Bizouard, septiembre 2021). Nótese que los 86400 segundos de TAI corresponden a la duración del día solar medio.

Tanto TU1 como LOD sufren distintas variaciones debidas a mareas zonales, mareas oceánicas, circulación atmosférica, intercambio de momento angular entre el núcleo y el manto terrestre, entre otras causas geofísicas que producen cambios en la redistribución de masas de la Tierra o provocan contribuciones a la componente axial del momento angular relativo¹³ del planeta. También ocurren variaciones debidas a la transferencia de momento angular al movimiento orbital de la Luna. Algunas de estas variaciones son rápidas (p. ej. 50 días, estacionales) y otras lentas (p. ej. decenales, seculares) según su naturaleza (Gross, 2007, p. 278-283).

Si denominamos ΔLOD a los cambios en la longitud del día expresados en segundos (Gross, 2007 p. 17),

¹¹ Ver capítulo 9

¹² Length-Of-Day

¹³ Debidos a movimientos relativos al marco de referencia rotante

$$\Delta LOD(t) = \frac{-d(TU - TUC)}{dt} 86400 \quad (8.23)$$

El análisis de las series temporales de ΔLOD constituye una valiosa fuente de datos para trabajos interdisciplinarios. Efectivamente, permite elaborar modelos, comparar sus predicciones con los datos observados y desarrollar estudios del comportamiento de las distintas causas físicas de excitación dentro de la Tierra entendida como un sistema dinámico único.

Referencias

- 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, 604-608.
- Belda, S., Ferrándiz, J. M., Heinkelmann, R., Schuh, H. (2018). A new method to improve the prediction of the celestial pole offsets. *Scientific reports*, 8(1), 1-10. Doi:10.1038/s41598-018-32082-1
- Bizouard, C., Lambert, S., Gattano, C., Becker, O., Richard, J. Y. (2019). The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014. *Journal of Geodesy*, 93(5), 621-633. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1186-3>
- Bizouard, C. (acceso septiembre 2021) Universal Time – Length of Day. Recuperado de <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
- Capitaine, N., Wallace, P. T., Chapront, J., (2003), Expressions for IAU 2000 precession quantities, *Astronomy and Astrophysics*, 412, 567–586.
- Capitaine, N., Wallace, P. T., Chapront, J. (2005), Improvement of the IAU 2000 precession model, *Astronomy and Astrophysics*, 432, 355–367
- Charlot, P., Sovers, O., Williams, J., & Newhall, X. (1994). Precession and nutation from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging observations, *Astrophys. J.* 109, 418
- Explanatory Supplement of the Astronomical Almanac (ESAA, 1992) *A revision to the Explanatory Supplement of the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac*. P.K. Seidelmann (ed.). University Science Books
- Goldstein H. (1994). *Mecánica Clásica*. Editorial Reverté.
- Gross, R. S. (2007). Earth rotation variations-long period. En *Treatise on geophysics*, 3, 239-294.

- IERS (1996). IERS Conventions 1996. McCarthy, D. D. (ed.). *IERS Technical Note*, 21, 1-95.
- IERS TN36. (2010) *IERS Conventions 2010*. G. Petit and B Luzum (eds.). ISSN: 1019-4568 (print version)
- Kaplan G. H. (2005) The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales, and Earth Rotation Models Explanation and Implementation. *United States Naval Observatory circular N°. 179*. Washington: USNO. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0602086.pdf>
- Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, W., Morando, B. (1977). Expressions for the precession quantities based upon the IAU 1976 system of astronomical constants. *Astronomy and Astrophysics*, 58, 1-16.
- Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T., Fey, A. L., Gontier, A. M., Jacobs, C. S., ... & Charlot, P. (1998). The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *The Astronomical Journal*, 116(1), 516.
- Mathews, P. M., Herring, T. A., Buffett, B. A. (2002) Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior. *J. Geophys. Res.* 107(B4), 2068 .
- McCarthy D.D, Seidelmann P.K. (2018) *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics*. Cambridge University Press
- Seidelmann, P. K. (1982). 1980 IAU theory of nutation: The final report of the IAU working group on nutation. *Celestial mechanics*, 27(1), 79-106.
- Smylie D.E. (2013). *Earth Dynamics: Deformation and oscillation of the rotating Earth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Souchay, J., Feissel, M., Bizouard, C., Capitaine, N., Bougeard, M. (1995). Precession and nutation for a non-rigid Earth: comparison between theory and VLBI observations. *Astronomy and Astrophysics*, 299, 277.
- Woolard, E. C., Clemence, G. (1966). *Spherical Astronomy*. New York, London: Academic Press.
- Zerhouni, W., Capitaine, N. (2009). Celestial pole offsets from lunar laser ranging and comparison with VLBI. *Astronomy & Astrophysics*, 507(3), 1687-1695.