

INFLUENCIA DE LA EXCITACION HIDROLOGICA EN LA VARIACION ANUAL AL MOVIMIENTO DEL POLO

Laura I. Fernández y Claudia A. Brunini

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Univ. Nac. de La Plata. (FCAGLP-UNLP).

Paseo del Bosque s/n, B1900FWA, La Plata, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

lauraf@fcaglp.unlp.edu.ar, claudio@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Es sabido que los cambios de la redistribución de masas en la Tierra provocan variaciones en el tensor de inercia terrestre, causano al mismo tiempo fluctuaciones en su campo gravitatorio. Además, la dinámica de los procesos geofísicos internos que redistribuyen masa globalmente es también responsable del cambio en la orientación de nuestro planeta en el espacio. Un gran número de procesos geofísicos a escala global causan variaciones a la rotación de la Tierra evidenciadas a través de los cambios en los parámetros de la rotación terrestre (Earth Rotation Parameters, ERP). Según el mecanismo de excitación involucrado, estos procesos suelen distinguirse como efectos (o términos) de movimiento (vientos y corrientes oceánicas) y efectos de masa (diferencias en los valores de presión sobre el lecho de los océanos o cambios en la presión atmosférica). Este trabajo se enfoca en la redistribución global de aguas subterráneas y en sus consecuencias como efecto excitatriz de las variaciones observadas del movimiento del polo.

Los resultados de esta investigación se dividen en tres partes: Primero se evaluaron las funciones de excitación hidrológicas al movimiento del polo usyo el modelo LaD. A continuación, se comparó la respuesta anual de este modelo con respecto a varias contribuciones anteriores. Luego, se analizó y comparó la efectividad de tres modelos hidrológicos (NCEP, LDAS, LaD) en el cierre del balance al movimiento del polo para el periodo anual y para ambas componentes, prógrada y retrógrada, respectivamente. Para ello se consideraron la contribuciones atmosférica y oceánica teniendo en cuenta los modelos y series de datos recomendados por el Global Geophysical Fluids Center (GGFC) dependiente del International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

Palabras clave: parámetros de la rotación terrestre-variaciones a la rotación terrestre-excitación hidrológica.

ABSTRACT

It is known that the Earth mass redistribution changes provoke variations in the terrestrial inertia tensor, causing thus fluctuations in its gravitational field. In addition, the dynamics of the geophysical internal processes that redistribute mass globally is also responsible for the change in the orientation of our planet in the space. A great number of geophysical global processes cause variations to the rotation of the Earth showed as changes in the Earth Rotation Parameters (ERP). According to the mechanism of excitation involved, these processes are known as motion terms (winds y oceanic currents) y mass terms (differences in pressure values at the ocean bottom or atmospheric pressure changes). In this work we focus in the global continental water redistribution y in its consequences as excitation of observed polar motion. The results of this investigation were divided in three parts: First, we evaluated the hydrological excitation functions of polar motion by using the Ly Dynamic Model (LaD). Second, we compared the annual response of this model with respect to several previous contributions. Then, we analyzed y compared the efficiency of three hydrological models (NCEP, LDAS, LaD) in closing the polar motion budget for the annual period y for both components: prograde y retrograde, respectively.

It was taken into account the annual atmospheric and oceanic contributions but considering the models and data series recommended by the Global Geophysical Fluids Center (GGFC) dependent on the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

Keywords: Earth rotation parameters (ERP)-Earth rotation variations-hydrological excitation.

INTRODUCCION

La rotación de la Tierra sólida no es estable sino por el contrario, exhibe cambios tanto en la velocidad angular, o lo que es lo mismo: cambios en la longitud del día, así como en la orientación del eje de rotación dentro de la Tierra sólida, dando origen al efecto conocido como movimiento del polo. Estos cambios afectan la rotación del planeta en una amplia escala de frecuencias y están generados principalmente por redistribuciones globales de masas y corrientes; tanto atmosféricas como oceánicas inducidas por mareas (Eubanks, 1993).

Quizás, la interpretación de las variaciones rotacionales sea la más interdisciplinaria de las Ciencias de la Tierra. Como ya hemos visto, su estudio se vincula con la dinámica del sistema Tierra-Luna; pero también con procesos dinámicos en el núcleo líquido, la corteza, el manto, la atmósfera, la hidrosfera y los océanos.

El objetivo del presente trabajo consiste en el testeado de la influencia de la excitación hidrológica según el modelo Land Dynamic Model (LaD) (Milly y Shmakin, 2002) sobre las variaciones temporales del movimiento del polo. En particular los cambios en las componentes ecuatoriales de la excitación hidrológica anual según el modelo LaD durante el periodo enero 1980 a mayo 2004.

DINAMICA DE LA ROTACION TERRESTRE: FUNCION DE EXCITACION HIDROLOGICA

Los estudios de las fluctuaciones en la rotación terrestre se basan en la aplicación matemática de las ecuaciones dinámicas de Euler a la respuesta de la Tierra como un sólido

ligeramente deformable frente a una gran variedad de procesos internos y superficiales. Planteando la conservación del momento angular total con respecto a un sistema inercial de referencia materializado por las estrellas lejanas y considerando que el observador en la superficie terrestre se halla en un sistema rotante, se obtienen las ecuaciones linealizadas de Euler-Liouville (Munk y McDonald, 1960; Lambeck, 1980).

Luego separamos las contribuciones debidas a los diferentes procesos geofísicos que modifican la rotación terrestre, en términos de movimiento, que afectan los momentos angulares relativos y términos de masa, que modifican el tensor de inercia terrestre. En particular, dado que sólo estamos interesados en las funciones de excitación por términos de masa al movimiento del polo, las componentes no axiales de las funciones de excitación ($\Psi = \Psi_x + i\Psi_y$) en función de los coeficientes de Stokes de segundo orden ($C_{21}(t)$, $S_{21}(t)$) del campo gravítico terrestre en notación compleja serán como se indica en la ecuación (1) (Wahr *et al.*, 1998), donde el vector momento angular relativo $\vec{h}(t)$ se asume nulo, $\Omega_0 = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ es la velocidad angular media de rotación terrestre, C y A son los momentos principales de inercia de la Tierra, M y R refieren a masa y radio medio de la Tierra respectivamente.

La solución de esta ecuación a través de su expresión en función de las componentes variables del tensor de inercia para cualquier término de masa ha sido revistada extensivamente por Fernández *et al.* (2005, 2006). En particular, calculamos las fluctuaciones en las capas de hielo y el almacenamiento de aguas continentales tal como lo describe el modelo LaD World (LaD) versión Danubio (Milly y Shmakin, 2002).

Los datos de distribución de densidad de aguas subterráneas han sido generados en una grilla global de 1° x 1° por el Continental Water, Climate, and Earth-System Dynamics Project (P.C. Milly, comunicación personal; 2004). Los datos están disponibles en intervalos mensuales para el período enero de 1980 a mayo de 2004. Los valores numéricos se refieren al primer día de cada mes. Los datos representan la masa del agua por cada celda de grilla dada en unidades de [Kg/m²]. Las celdas congeladas se asumen como permanentes y se consideran los efectos de fusión global de hielo y sublimación.

El almacenamiento de agua dentro de una celda no helada (W) esta compuesto por: nieve (w_s), agua líquida almacenada en la zona raíz (w_r), y aguas subterráneas almacenadas (w_g). Las celdas heladas consisten en un paquete compacto de nieve y el almacenamiento de hielo glaciar (w_l). Así, en general vale la ecuación (2), donde por lo menos una de estas contribuciones puede ser siempre nula.

Según Wahr *et al.* (1998), las series temporales de variaciones a los coeficientes de Stokes (ΔC_{21} y ΔS_{21}) debidas a las redistribuciones en el almacenamiento de aguas continentales en función de la co-latitud (ϕ') serán como se indica en la ecuación (3), donde $\phi' = 90^\circ - \phi$, siendo ϕ la latitud, λ es la longitud, $k_2' = -0.301$ es el número de Love de cargas de grado 2 y $\Delta W(\phi', \lambda)$ representa las variaciones en el almacenamiento de aguas continentales en unidades de [Kg/m²].

Esta integral fue evaluada numéricamente. En cada cómputo consideramos un bloque de la grilla de 4°x4° y realizamos una interpolación bidimensional tanto en latitud como en longitud, cuyo polinomio es de grado 3.

Es importante aclarar que las integrales fueron resueltas para toda la grilla (latitudes desde 90° S hasta 90° N), aún cuyo los efectos de las cargas por hielo en las zonas de Groenlandia y la Antártida no han sido correctamente resueltas por el modelo LaD (P.C. Milly, comunicación personal; 2005). Una vez obtenidas las series temporales de los parámetros de Stokes, las reemplazamos en la ecuación (1) obteniéndose así las series temporales para las componentes ecuatoriales de las funciones de excitación hidrológica.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Analizaremos los efectos en las variaciones anuales al movimiento del polo a partir de varios modelos hidrológicos y los compararemos con las contribuciones calculadas para el modelo LaD.

Las excitaciones estacionales al movimiento del polo pueden caracterizarse como un juego de 12 funciones sinusoidales con frecuencias de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 ciclos por año (cycles per year, cpy). De todas ellas, solo consideraremos la excitación anual como una senoide pura, esto es, una línea discreta en el espectro de las frecuencias.

$$(\Psi_x(t) + i\Psi_y(t))^{masa} = \frac{1.61}{(C-A)} \sqrt{\frac{5}{3}} MR^2 (C_{21}(t) + iS_{21}(t)) \quad (1)$$

$$W = w_s + w_r + w_g + w_l \quad (2)$$

$$\left. \begin{matrix} \Delta C_{21} \\ \Delta S_{21} \end{matrix} \right\} = \sqrt{\frac{3}{5}} \frac{R^2 (1+k_2')}{M} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \Delta W(\phi', \lambda) \cos \phi' \sin^2 \phi' \begin{Bmatrix} \cos \lambda \\ \sin \lambda \end{Bmatrix} d\phi' d\lambda \quad (3)$$

$$\Psi = \Psi^+ e^{i(\nu t + \lambda^+)} + \Psi^- e^{-i(\nu t + \lambda^-)} \quad (4)$$

Gráficamente, la excitación anual es como una elipse que el polo instantáneo de rotación describe en torno al polo norte convencional. Lo anterior admite ser escrito matemáticamente como la suma de dos componentes circulares: prógrada (ψ^+ , oeste a este) y retrógrada (ψ^-) cómo se ve en la ecuación (4), donde ν es la frecuencia de 1 cpy para la componente anual, t es el tiempo y λ refiere al corrimiento de fases.

Estimamos la contribución hidrológica anual al movimiento del polo según el modelo LaD efectuando un ajuste de cuadrados mínimos. La Tabla 1 nos muestra los resultados obtenidos con respecto a las componentes anuales de las funciones de excitación hidrológica al movimiento del polo, según otros modelos previamente publicados.

En particular, tomamos para la comparación los modelos de Chao y O'Connor (1988) [CHOC], Hinnov y Wilson (1987) [HW], Kuehne y Wilson (1991) [KW] y Jochmann (1999) [J]. Entre los modelos mas recientes, destacamos los valores del Nacional Center for Environmental Prediction (NCEP) y los resultados del modelo Land Data Assimilation System (LDAS) descriptas en Chen y Wilson (2005).

Chao y O'Connor (1988) modelaron el ciclo anual en el almacenamiento de aguas

continentales usando un juego de datos globales de lluvia y nieve y restringiendo el modelo por evapotranspiración. Luego reemplazaron los datos medidos de nieve por datos deducidos a partir del LAsER GEODynamics Satellite (LAGEOS).

Kuehne y Wilson (1991) compararon datos de movimiento del polo para el periodo 1900 a 1985 usando valores meteorológicos e hidrológicos globales. Su objetivo era determinar que proporción del movimiento del polo observado podía explicarse con la combinación de los términos de movimiento por causas atmosféricas (redistribución global de vientos) y la variación temporal en el almacenamiento de aguas continentales. Aunque los resultados obtenidos son bastante diferentes a los del trabajo previo de Hinnov y Wilson (1987), los autores concluyeron que estas dos fuentes de excitación eran insuficientes o bien, estaban incorrectamente estimados como para explicar las variaciones observadas al movimiento del polo.

Jochmann (1999) asume que la excitación anual del movimiento del polo corregida por su respectiva excitación atmosférica, representa las variaciones a las aguas almacenadas. Cabe aclarar que por aguas almacenadas el autor interpretó al balance entre precipitación y evapotranspiración mas desbordes.

Los datos de excitación hidrológica del NCEP provienen de re-análisis de valores de agua almacenada y nieve. La cantidad de agua acumulada en fracción volumétrica se calcula como la suma de agua mas nieve según un modelo de dos capas que abarca desde la superficie hasta los 2 metros de profundidad (Kalnay *et al.*, 1996). Las estimaciones mensuales sobre una grilla global se realizan sin observaciones in situ, por lo cual se prevén sistematismos en determinadas regiones (por ejemplo, la Antártida adonde se asume el espesor de nieve como una constante. Chen *et al.*, 2000).

Tabla 1. Excitación anual al movimiento del polo debido al almacenamiento de aguas continentales. Las unidades para las amplitudes son milésimos de segundo de arco [mas] y grados para las fases. La fecha de referencia para las fases es 1° de Enero a 0hs. de TU en el inicio de cada serie temporal.

		Prógrado	Retrógrado
Chao et al.; snow	CH	(4.9, -109°)	(4.8, -28°)
Chao & O'Connor	CHOC	(1.9, -74°)	(3.3, 29°)
Hinnov & Wilson	HW	(7.27, 55°)	(6.33, 85°)
Kuehne & Wilson	KW	(1.79, -22°)	(6.84, 175°)
Jochmann	J	(11.2, -1°)	(12.4, 156°)
NCEP/NCAR*	NCEP	(12.6, -115°)	(8.72, -30°)
LDAS*	LDAS	(5.11, -9°)	(7.39, 166°)
LaD	LaD	(2.98, -8°)	(7.46, -45°)

* valores de Chen y Wilson (2005)

El LDAS es un modelo global de promedios mensuales que brinda datos de agua almacenada sobre una grilla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y fue desarrollado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center (CPC). Este modelo está restringido por datos de precipitación, vientos, humedad, presión atmosférica y de radiación solar. Los valores de salida son temperatura y humedad del suelo en 4 capas desde la superficie e incluyen las cargas por acumulación de nieve (Chen y Wilson, 2005).

Todos los autores descriptos en la Tabla 1, consideran la nieve acumulada en cada celda de la grilla junto con el contenido de agua líquida, con excepción de Chao *et al.*, (1987) [CH]. Este último trabajo sólo estudia el efecto de la acumulación de nieve en la variación del potencial terrestre y en el movimiento del polo.

La Figura 1 nos muestra el diagrama vectorial de las componentes anuales prógrada y retrógrada, deducidas a partir de los diferentes modelos descriptos en párrafos anteriores y resumidos en la Tabla 1. Nótese que las amplitudes son muy diferentes dependiendo del modelo para la componente prógrada, aunque los valores de fase se ubican mayormente en el cuarto cuadrante. Enfocándonos en las estima-

ciones más recientes, LaD aparece muy próxima a la estimación LDAS tanto en amplitud como en fase. Mientras que NCEP probablemente sobreestime la componente prógrada anual. En contraste, las estimaciones interanuales NCEP se caracterizan por amplitudes muy pequeñas en comparación con las observaciones (Chen y Wilson, 2005; Fernández *et al.*, 2006).

En el caso de la componente anual retrógrada el panorama es completamente heterogéneo. Claramente puede observarse una gran dispersión para las distintas estimaciones de las fases aunque el valor de las amplitudes es similar para varias de ellas. En particular LaD esta próxima en amplitud y fase a la estimación NCEP.

Finalmente, nos enfocaremos en los tres modelos más recientes (LaD, NCEP y LDAS) para analizar la influencia hidrológica en el “cierre” del movimiento del polo usando diagramas fasoriales. Con este fin consideramos diferentes series temporales de datos para el periodo enero 1980 a mayo 2004.

En primer lugar se consideraron las series temporales del movimiento del polo a partir de los datos ERP IERS C04. Esta es una serie combinada multi-técnica a valores diarios provista por el EOP-PC (Earth Orientation Para-

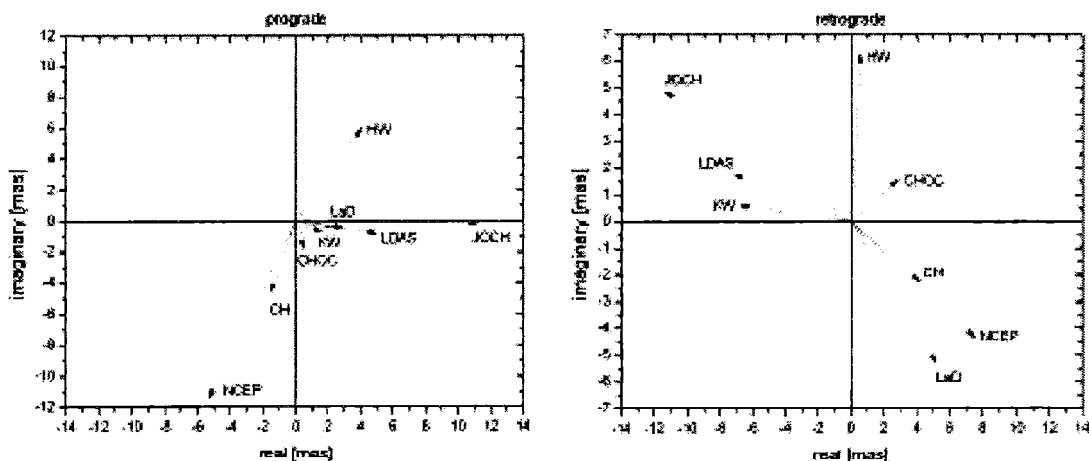


Figura 1. Diagramas fasoriales para la comparación de las componentes anuales, a la excitación hidrológica al movimiento del polo según diferentes modelos en la Tabla 1.

meters - Product Center) con sede en el Observatorio de Paris, dependiente del IERS (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>). No se aplicó ningún tipo de filtrado sobre los datos, sin embargo se ajustó una regresión lineal con el objetivo de eliminar variaciones seculares o de muy largo periodo. Luego tomamos las dos series temporales de momento angular atmosférico (AAM, atmospheric angular momentum) y oceánico (OAM, oceanic angular momentum). Estos datos son provistos por el Global Geophysical Fluids Center (GGFC) coordinado por varias instituciones científicas internacionales y dependiente del IERS (<http://www.ecgs.lu/ggfc/>).

La serie AAM consiste en la integración de datos grillados de vientos y presión atmosférica superficial discriminados según contribuciones para el hemisferio norte y sur respectivamente (Salstein *et al.*, 1993). Los datos se proveen cada 6 horas y la extensión de las series temporales abarca enero de 1980 hasta mayo 2004. En el caso del OAM, la serie temporal elegida para este estudio fue calculada desde una integración no restringida al modelo de circulación oceánica global ECCO (Estimating the Circulation and the Climate of the Ocean) (Gross *et al.*, 2003).

Los datos son provistos diariamente y la extensión temporal es consistente con las demás series temporales (AAM, movimiento del polo, hidrológicas).

Una vez obtenidas todas las series de datos necesarias para nuestro cálculo, procedimos al ajuste por cuadrados mínimos de una función similar a la descrita en la ecuación 3. En los ajustes realizados no sólo se tuvo en cuenta la contribución anual, sino que también se ajustaron los términos semi-anales (2 cpy) y ter-anales (3 cpy) en sus componentes prógradas y retrógradas, respectivamente. Para el caso de los datos geodésicos (movimiento del polo) también fue necesario ajustar la oscilación de Chandler. Para ello se consideró un periodo de 433 días y un factor Q de 175.

Finalmente se propagaron los errores de los respectivos ajustes. Los resultados se presentan en la Tabla 2 sólo para los términos anuales.

La Figura 2a nos muestra los diagramas fasoriales para las componentes prógrada (izquierda) y retrógrada (derecha) de las funciones de excitación anuales al movimiento del polo (geod), atmósfera (atm), océanos (ocn) y nuestra estimación hidrológica en base al modelo LaD (hyd). La Figura 2b presenta los

Tabla 2. Balance de la excitación anual al movimiento del polo debido a redistribuciones globales de masa. Las unidades para las amplitudes son milésimos de segundo de arco [mas] y grados para las fases. La fecha de referencia para las fases es 1° de Enero de 1990 0hs. TUC.

	Prógrado (mas; grados)	Retrógrado (mas; grados)
Series Geodésicas (IERS04)[†]	(22.12 ± 4.90; -76.49° ± 3.80°)	(6.19 ± 0.13; -142.92° ± 1.10°)
Presión Atmosférica	(15.31 ± 0.29; -103.66° ± 2.11°)	(14.86 ± 0.53; 104.12° ± 2.18°)
Vientos Atmosféricos	(3.24 ± 0.10; -47.39° ± 6.00°)	(1.82 ± 0.25; 39.22° ± 10.60°)
Atmósfera total (AAM)	(20.10 ± 2.93; -90.28° ± 2.41°)	(16.6 ± 2.47; 98.83° ± 2.92°)
Presión lecho oceánico	(3.45 ± 0.11; 63.18° ± 1.87°)	(3.42 ± 0.11; 110.24° ± 1.89°)
Corrientes oceánicas	(2.31 ± 0.09; 39.72° ± 2.13°)	(2.11 ± 0.09; 50.70° ± 2.33°)
Océano total (OAM)[‡]	(5.64 ± 0.16; 53.81° ± 1.61°)	(4.84 ± 0.16; 88.22° ± 1.87°)
Agua Continental almacenada LaD	(2.98 ± 1.40; -8.21° ± 2.62°)	(7.46 ± 1.40; -45.47° ± 1.04°)
Agua Continental almacenada NCEP[‡]	(12.60; -115.00°)	(8.72; -30.00°)
Agua Continental almacenada LDAS[‡]	(5.11; -9.00°)	(7.39; 116.00°)

† Componente Chyler calculada (29.24 ± 4.49; -150.15° ± 2.04°)
‡ valores de Gross et al., (2003)
? Valores de Chen y Wilson, (2005)

respectivos diagramas fasoriales para las resultantes de las sumas vectoriales de las funciones de excitación atmosférica y oceánica (AO) mas los diferentes modelos hidrológicos a testear (LaD, NCEP y LDAS). Con el objeto de realizar las comparaciones, en el mismo grafico se presenta la excitación geodésica observada para cada caso. Como antes, se graficaron las componentes anuales prógradas a la izquierda y las retrógradas a la derecha. Los ajustes se realizan sólo para los términos de masa. Las unidades empleadas son las milésimas de segundo de arco. La fecha de referencia para las fases es 1° de Enero de 1990 a 0 horas de Tiempo Universal Coordinado (TUC).

De la Figura 2 puede verse que la contribución prógrada anual según el modelo LaD es muy próxima en fases a la respectiva estimación LDAS. Además, los vectores resultantes de la suma entre la excitación atmosférica, oceánica e hidrológica estimada por el modelo LaD aproximan mejor en magnitud a las variaciones observadas del movimiento del polo (geod) para ambas componentes.

CONCLUSIONES

Desde el presente trabajo podemos arribar puntualmente a las siguientes conclusiones: Cuando comparamos LaD con otros modelos hidrológicos previos y sólo para las componentes anuales, LaD parece sobreestimar las componentes retrógradas. Si en cambio, evaluamos la bondad del modelo LaD en el cierre del balance al movimiento del polo para las componentes anuales y comparando su performance respecto de los modelos NCEP y LDAS, LaD resulta próximo a los valores de fase LDAS para la componente prógrada. Además, la contribución LaD aproxima mejor a las observaciones de movimiento del polo en magnitud aunque en general, las diferencias de fase entre las observaciones y la resultante

de la suma total de las funciones de excitación siguen siendo importantes.

Agradecimientos: Agradecemos al USGS Continental Water, Climate, and Earth-System Dynamics project por los datos del modelo LaDWorld-Danube. L. Fernández agradece al Advisory Board of the Descartes Prize “Pinpoint positioning in a wobbly world” por la beca post-doctoral que le permitió investigar estos temas en el Institute of Geodesy and Geophysics (IGG) de la Universidad Tecnológica de Viena. (TU Wien).

REFERENCIAS

- Chao B.F., W.P. O’Connor, A.T.C. Chang, D.K.Hall and J.L.Foster. 1987. Snow load effect on the Earth’s rotation and gravitational field, 1979-1985. *J. Geophys. Res.* 92 B9, 9415-9422.
- Chao B.F. and W.P. O’Connor. 1988. Global surface-water-induced seasonal variations in the Earth’s rotation and gravitational field. *Geophysical Journal* 94, 263-270.
- Chen, M.K., C.R. Wilson, B.F. Chao, C.K. Shum and Tapley B.D. 2000. Hydrological and oceanic excitations to polar motions and length-of-day variation. *Geophys. J. Int.* 141, 149-156.
- Chen, M.K. and C.R. Wilson. 2005. Hydrological excitations of polar motion, 1993-2002. *Geophys. J. Int.* 160, 833-839.
- Eubanks, T.M. 1993. Variations in the orientation of the Earth Contributions of Space Geodesy to Geodynamics. In: Smith, D., Turcotte, D. (Eds), Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics. Geodynamics Series A.G.U. (24), 1-54.
- The Earth Orientation Center at Paris Observatory, (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>).
- Fernández L., H. Schuh y C. Brunini. 2005. Obtención de series temporales de los parámetros de Stokes a partir de modelos geofísicos globales y su relación con las variaciones en los ERP. *Geoacta*, 30, 93-102.
- Fernández L.I., H. Schuh, M. Schmidt and Seitz F. 2006. Effects of inter-annual water storage variations on polar motion. Aceptado en *Geophysical Journal Internacional* (en prensa).

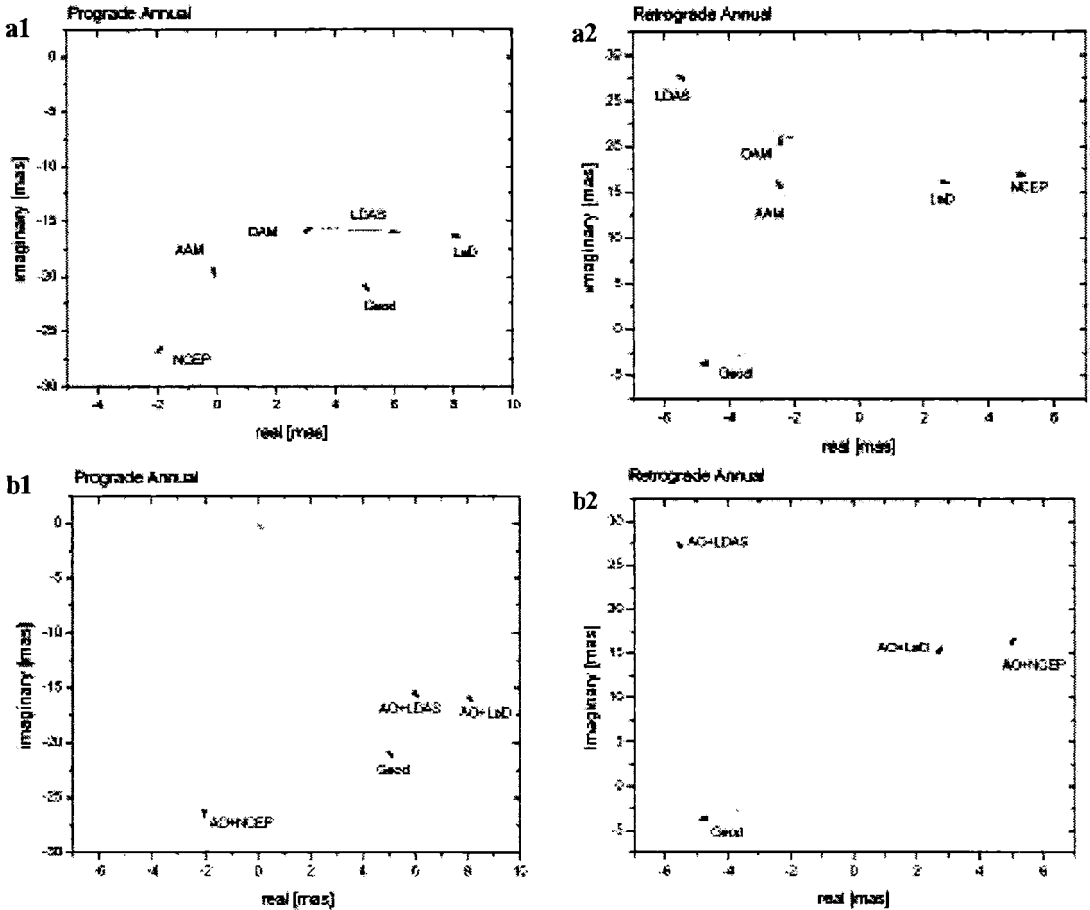


Figura 2. a) Diagramas fasoriales para las componentes prógrada (izquierda) y retrógrada (derecha) de las funciones de excitación anuales al movimiento del polo (geod), atmósfera (atm), océanos (ocn) y nuestra estimación hidrológica en base al modelo LaD (hyd). **b)** Diagramas fasoriales para las componentes anuales prógrada (izquierda) y retrógrada (derecha), respectivamente. Aquí se presentan las sumas vectoriales de las funciones de excitación atmosférica y oceánica (AO) + los diferentes modelos hidrológicos en comparación con la excitación geodésica observada. Los ajustes se realizan solo para los términos de masa. Las unidades son milésimas de segundo de arco. La fecha de referencia para las fases es 1° de Enero de 1990 a 0 horas de Tiempo Universal Coordinado (TUC).

The Global Geophysical Fluids Center, GGFC (<http://www.ecgs.lu/ggfc/>).

Gross R.S., I. Fukumori and D. Menemenlis D. 2003. Atmospheric and Oceanic Excitation of the Earth's Wobbles During 1980-2000. *J. Geophys. Res.*, 108 (B8), doi: 10.1029/2002JB002143, 20031992.

Hinnov, L. y Wilson C.R. 1987 An estimate of the water storage contribution to the excitation polar motion. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 88, 437-459.

Jochmann, H. 1999. The influence of continental water storage on the annual wobble of polar motion estimated by inverse solution. *Journal of Geodyn.* 27, 147-160.

Kuehne J. and C.R. Wilson. 1991 Terrestrial Water Storage y Polar Motion. *J. Geophys. Res.*, 96, B3, 4337-4345.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C.

Influencia de la excitación hidrológica en la variación anual al movimiento del polo.

- Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Lambeck K. 1980 *The Earth's variable rotation: geophysical causes and consequences*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Milly P.C.D. and A.B. Shmakin. 2002. Global Modeling of Land Water and Energy Balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) Model. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 3, 283-299.
- Munk, W.H. and G.J.F. MacDonald. 1960. *The rotation of the Earth: a geophysical discussion*. Cambridge University Press. England.
- Salstein D.A., D.M. Kann, J.A. Miller and R.D. Rosen. 1993. The Sub-Bureau for Atmospheric Angular Momentum of the International Earth Rotation Service: A meteorological data center with geodetic applications. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 67-80.
- Wahr, J.M., M. Molenaar and F. Bryan. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophys. Res.* V 103 (B12), 30205-30229