

A influência da Atmosfera nas variações da rotação da Terra

José M Castanheira¹, Machiel Bos²

¹ CESAM & Departamento de Física da Universidade de Aveiro
jcast@ua.pt

² IDL & Universidade da Beira Interior
msbos@ubi.pt

Resumo

A qualidade dos sistemas de previsão meteorológica melhorou acentuadamente nas últimas décadas, alargando a utilidade das previsões a áreas muitas vezes insuspeitas, como é o caso dos sistemas de navegação espacial. A previsão da circulação atmosférica global permite determinar com melhor precisão as coordenadas das estações de recepção e das órbitas dos satélites, ou de sondas interplanetárias. De facto, a precisão da geodesia espacial também progrediu muito nas últimas décadas, tornando as previsões do momento angular da atmosfera úteis para reduzir o erro nas previsões dos parâmetros de orientação da Terra. Neste artigo analisamos com mais detalhe o efeito das variações do momento angular da atmosfera na velocidade de rotação da Terra ou, equivalentemente, nas variações da duração do dia.

O momento angular da atmosfera e a duração do dia

O momento angular de um sistema é uma grandeza tridimensional, que se conserva quando o momento resultante das forças externas aplicadas ao sistema é nulo. Descontando pequenos efeitos do atrito das marés, que reduzem o momento angular de rotação da Terra e aumentam o momento angular orbital da Lua (Morrison e Stephenson, 2001), o momento angular do Sistema Terra, incluindo a atmosfera, oceanos, criosfera, camadas sólidas (manto e crosta) e o núcleo, deve permanecer constante ao longo do tempo. Assim, qualquer alteração de momento angular de uma componente do Sistema Terra deve ser compensada por uma variação de sinal contrário nas outras componentes do Sistema (Peixoto e Oort, 1992).

As variações do momento angular da atmosfera são mais facilmente descritas utilizando um referencial que rode solidariamente com o globo e com um eixo alinhado com o eixo de rotação. Considerando o referencial representado na Figura 1, o momento angular, \vec{L} , de uma dada componente do Sistema Terra é dado por

$$\vec{L}(t) = \int_V \rho(\vec{r}, t) \vec{r} \times [\vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{v}(\vec{r}, t)] dV,$$

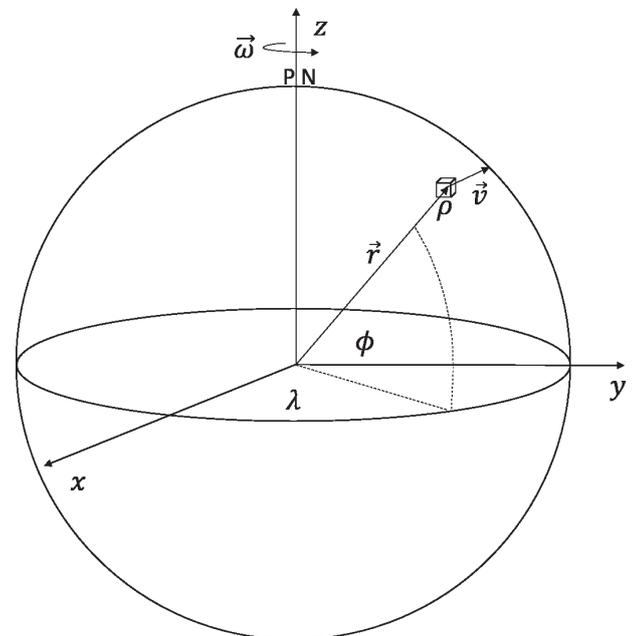


Figura 1 - Sistema de coordenadas geocêntricas fixo ao globo terrestre.

onde V é volume ocupado pela componente, ρ é a massa volúmica na posição \vec{r} e no instante t ; o vector $\vec{\omega}$ é a velocidade angular de rotação da Terra em relação a um referencial inercial, e \vec{v} é a velocidade relativa ao referencial que roda solidariamente com a Terra. Na realidade, a rotação de um referencial fixo ao globo terrestre não é uniforme, sofrendo pequenas variações como veremos. No entanto, para a derivação das expressões para o cálculo do momento angular das componentes do Sistema Terra, podemos assumir que o referencial roda com velocidade angular uniforme, $\vec{\omega}$, em torno do eixo z : $\vec{\omega} = \omega \hat{e}_z$.

Variações das projecções do momento angular no plano equatorial, i.e., variações das compo-

nentes L_x e L_y estão associadas com pequenas variações da orientação do eixo de rotação, ou, dito de outra forma, da posição dos pólos. As variações da componente axial, L_z , estão associadas com variações da intensidade da velocidade angular, $\vec{\omega}$, de rotação da Terra.

A componente axial do momento angular da atmosfera é dada por

$$L_z(t) = \int_V \rho(\vec{r}, t) [\omega r^2 \cos^2(\phi) + u(\vec{r}, t) r \cos \phi] dV,$$

onde u representa a componente Oeste-Este da velocidade do vento. Assim, o momento angular axial da atmosfera é composto por dois termos: um constante, L_ω , dado pela integração do primeiro termo entre parêntesis rectos na equação acima, e que representa a rotação da atmosfera solidária com a do globo; e um segundo termo, L_r , devido ao movimento relativo da atmosfera em relação ao globo.

Apesar de o momento angular relativo da atmosfera, L_r , corresponder apenas a cerca de 1 % do momento angular total (Peixoto e Oort, 1992), as suas flutuações explicam grande parte das variações da velocidade de rotação da Terra ou, equivalentemente, das variações da duração do dia, em intervalos de tempo inferiores à dezena de anos. A Figura 2 mostra as variações da duração do dia (*length of day*, L_{OD} , na língua Inglesa) e do momento angular relativo da atmosfera, L_r , no período de 2006 a 2020. A variação sazonal do L_{OD} é explicada quase completamente pela variação sazonal do momento angular da atmosfera (Schindelegger et al., 2013), com uma variação de $\approx 0,8 \times 10^{-3}$ s entre Janeiro e Julho (Peixoto e Oort, 1992). Na Figura, também se observam flutuações da duração do dia (L_{OD}) na ordem de $0,1 \times 10^{-3}$ s, coerentes com variações de L_r e que ocorrem em intervalos de alguns dias a várias dezenas de dias. Variações que ocorrem em intervalos de vários anos podem ser explicadas pela ocorrência de eventos de El Niño. Embora não sejam mostrados directamente na Figura 2, os valores máximos das médias de Inverno de ΔL_{OD} e de ΔL_r observaram-se no Inverno de 2015/2016, quando ocorreu o evento de El Niño mais intenso dos últimos 20 anos.

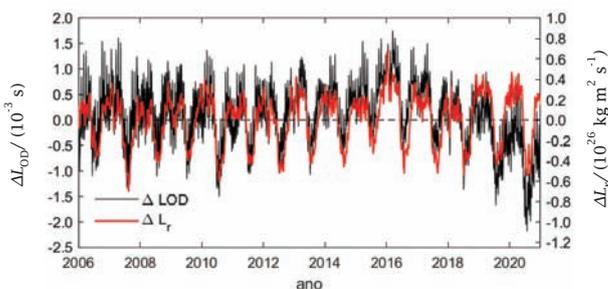


Figura 2 - Séries temporais das variações da componente axial do momento angular relativo, ΔL_r , da atmosfera e da duração do dia ΔL_{OD} . A cada série foi subtraída a respectiva média no período de 2000 a 2020. Os dados foram obtidos a partir do website do Serviço Internacional de Sistemas de Referência e Rotação da Terra (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) (<https://www.iers.org>).

Implicações para a geodesia espacial e a monitorização do Sistema Climático

Uma variação de $0,1 \times 10^{-3}$ s na duração do dia produz uma diferença de vários centímetros entre a posição real e a posição esperada de um ponto na superfície de uma Terra com rotação uniforme. As variações da velocidade de rotação também modificam a força centrífuga, que é responsável por a forma da Terra não ser perfeitamente esférica. Assim, a superfície da Terra sofre deslocamentos verticais de cerca de 10 mm a 20 mm ao longo de um ano. Os deslocamentos horizontais são inferiores a 7 mm a 8 mm. Os dispositivos GPS incorporados em carros e telefones celulares têm uma precisão de vários metros e, portanto, não serão sensíveis a essas variações. No entanto, essas variações são importantes para os receptores geodésicos de GPS, instalados em pilares estáveis e que possuem precisão da ordem do mm. Além do GPS, existem outras constelações de satélites que fornecem a geolocalização, como os sistemas GLONASS, operado pela Rússia, Galileo (Europa) e Beidou (China), referidos, conjuntamente, como Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS). A inter-operabilidade destes sistemas requer um Sistema de Referência comum (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) definido com grande precisão (Malys et al., 2021).

A relação entre a geodesia e a meteorologia e clima vai muito além das perturbações nos parâmetros orbitais da Terra. Por exemplo, para determinar se o nível do mar está a subir um a dois milímetros por ano ou se a costa está a descer, há estações GNSS permanentes instaladas perto de marégrafos. As estações GNSS permanentes, instaladas ao longo das costas da Gronelândia e da Antártida, podem fornecer mais informações sobre o clima. O derretimento do gelo, associado a variabilidade climática e/ou a mudanças climáticas, diminui a pressão sobre a superfície terrestre subjacente, que se eleva vários milímetros por ano. Essa elevação é observada pelo GNSS e fornece estimativas das quantidades de gelo derretido em cada ano. Um outro exemplo é a utilização dos dados da missão GRACE (<https://www.gfz-potsdam.de/en/grace/>) cujo principal objectivo é medir o campo gravítico terrestre com alta precisão e observar a sua variabilidade. A determinação precisa das órbitas dos satélites permite utilizar essas observações para estimar a humidade do solo (<https://nasagrace.unl.edu/>). Os dados de GNSS são também utilizados, em modo operacional, para determinar o estado inicial dos modelos de previsão meteorológicas (Bauer et al., 2014).

Estas utilizações dos dados de GNSS e de observações de satélite requerem correcções dos efeitos da atmosfera nas variações da velocidade de rotação da Terra. Devido à importância dessas correcções para estas e outras aplicações geodésicas, o Serviço Internacional de Rotação da Terra (International Earth Rotation Service (IERS), <https://www.iers.org>) fornece séries diárias quer da orientação do eixo de rotação quer das variações na duração do dia. O cálculo das correcções para vários propósitos operacionais, incluindo o controlo de sondas espaciais, orientação de instrumentos astronómicos ou a geolocalização, requer a utilização de previsões dos parâmetros de orientação da Terra (Dill et al., 2019; Kalarus et al., 2010). Os erros das previsões da velocidade

angular da Terra são reduzidos consideravelmente, se for tido em conta o momento angular da atmosfera previsto por modelos de circulação global, tal como é feito operacionalmente no Centro de Previsão do IERS (*Dick e Richter, 2009; Dobslaw e Dill, 2018*).

Notas finais

A conservação do momento angular de um sistema isolado é uma lei básica da Física. Por isso, em termos teóricos, não é surpresa alguma que variações do momento angular da atmosfera impliquem variações da velocidade de rotação do globo terrestre. O que poderá ser menos esperado é a importância dessas variações em aplicações tecnológicas como o GNSS. De facto, as previsões meteorológicas são indispensáveis à operação e gestão deste e outros sectores baseados em tecnologia de ponta, como a produção de energia e o funcionamento de redes eléctricas, ou a aviação. O valor e aplicação das previsões meteorológicas crescerá à medida que a qualidade das previsões e a capacidade de as utilizar forem aumentando.

As previsões meteorológicas são um problema físico, matemático e computacional complexo, cuja melhoria poderá beneficiar muito com a atracção de estudantes e graduados com boa formação em física fundamental. A Física do Clima desempenha um papel central na compreensão e modelação das alterações climáticas. A este respeito, é importante referir um artigo publicado na revista *Nature* (*Schiermeier, 2015*), que chama a atenção para a necessidade de atrair físicos talentosos para as Ciências do Clima. No entanto, as Licenciaturas e Mestrados em Física não parecem contribuir para essa atractividade. De facto, se consultarmos os planos curriculares dos cursos de Física, a nível internacional, veremos que a grande maioria não contempla a Física do Clima. Portugal não é excepção, e a formação introdutória à Física do Clima não faz parte dos planos curriculares das Licenciaturas e Mestrados em Física. Os alunos com interesse em estudar Meteorologia, Oceanografia e Física do Clima podem escolher as Licenciaturas em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, leccionadas na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e no Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Referências

- [1] Bauer, P., G. Radnóti, S. Healy, e C. Cardinali, 2014: GNSS radio occultation constellation observing system experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 555-572, doi:10.1175/MWR-D-13-00130.1.
- [2] Dick, W. R., e B. Richter, 2009: IERS annual report, 2007, pp 61-67, International Earth Rotation and Reference Systems Service. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt am Main. ISBN 978-3-89888-917-9.
- [3] Dill, R., H. Dobslaw, e M. Thomas, 2019: Improved 90-day earth orientation predictions from angular momentum forecasts of atmosphere, ocean, and terrestrial hydrosphere. *J. Geodesy*, 93, 287-295, doi:10.1007/s00190-018-1158-7.
- [4] Dobslaw, H., e R. Dill, 2018: Predicting earth orientation changes from global forecasts of atmosphere-hydrosphere dynamics. *Adv. Space Res.*, 61, 1047-1054, doi:10.1016/j.asr.2017.11.044.

- [5] Kalarus, M., e Co-autores, 2010: Achievements of the earth orientation parameters prediction comparison campaign. *J. Geodesy*, 84, 587-596, doi:10.1007/s00190-010-0387-1.
- [5] Kalarus, M., e Co-autores, 2010: Achievements of the earth orientation parameters prediction comparison campaign. *J. Geodesy*, 84, 587-596, doi:10.1007/s00190-010-0387-1.
- [6] Malys, S., R. Solomon, J. Drotar, T. Kawakami, e T. Johnson, 2021: Compatibility of terrestrial reference frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019. *Adv. Space Res.*, 67, 834-844, doi:10.1016/j.asr.2020.11.029.
- [7] Morrison, L. V., e F. R. Stephenson, 2001: Historical eclipses and the variability of the earth's rotation. *J. Geodynamics*, 32, 247-265.
- [8] Peixoto, J. P., e A. H. Oort, 1992: *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York, NY, 520 pp. ISBN 0-88318-712-4.
- [9] Schiermeier, Q., 2015: Physicists, your planet needs you. *Nature*, 520, 140-141, doi:10.1038/520140a.
- [10] Schindelegger, M., S. Böhm, J. Böhm, e H. Schuh, 2013: Atmospheric Effects on Earth Rotation. In: *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Edited by J. Böhm and H. Schuh. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-36931-5.



José M Castanheira, é licenciado em Física pela Fac. de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e doutorado em Física (área da atmosfera) pela Universidade de Aveiro. É professor auxiliar da Universidade de Aveiro, regente de várias unidades curriculares nas áreas da Física da Atmosfera e do Clima, e Director de Curso de Mestrado em Ciências do Mar e da Atmosfera. É investigador do CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar. Os principais temas de investigação a que se tem dedicado são a dinâmica subjacente aos padrões de variabilidade da circulação atmosférica de larga escala, e a dinâmica do clima.



Machiel Bos, é licenciado em Engenharia Aeroespacial pela Universidade de Tecnologia de Delft, Países Baixos, e doutorado em Oceanografia pela Universidade de Liverpool, Inglaterra. É investigador do Instituto Dom Luiz e recebeu apoio da FCT através dos projetos ATLAS (PTDC/CTA-GEF/31272/2017) e UIDB/50019/2021-IDL. O seu interesse científico é a Geodesia e a sua especialidade é a análise das séries temporais GNSS da deformação da Terra pela pressão da maré oceânica.