

MONITORANDO EXPLOSÕES VULCÂNICAS NA TELA LUNAR

Helio de Carvalho Vital - REA/Rio de Janeiro

RESUMO

Durante eclipses lunares totais, a Lua se transforma numa tela muito sensível que reflete parte da reduzida fração de fótons solares que conseguem atravessar a atmosfera da Terra em trajetórias quase rasantes e são desviados para o interior do cone de sombra. Quanto mais profundamente o disco lunar mergulha na umbra, mais fracamente iluminado ele se torna.

Esse fato levou o autor a buscar uma correlação entre a magnitude umbral de um eclipse e a magnitude visual da Lua, como ferramenta para investigação de um segundo fenômeno, ainda mais interessante: grandes explosões vulcânicas podem lançar enormes quantidades de aerossóis vulcânicos na estratosfera e reduzir significativamente a luminosidade de um eclipse lunar total.

Aplicado às estimativas de magnitude da Lua nos dez eclipses lunares totais observados pela Rede de Astronomia Observacional (REA), o método revelou que os eclipses de dezembro de 1992, novembro de 1993 e maio de 2003 mostraram-se significativamente mais escuros que o previsto. Os eventos vulcânicos responsáveis por esses efeitos foram identificados, destacando-se dentre eles: a violenta explosão do Monte Pinatubo em Junho de 1991 e a erupção do Monte Reventador em Novembro de 2002.

I – VULCÕES E ECLIPSES LUNARES

No início de um eclipse lunar, um hipotético observador situado na Lua veria o disco solar gradualmente achatar-se e esconder-se atrás da Terra, sob a ação de severa refração. Com a aproximação da fase umbral, a predominância de tons azulados e brilhantes, produzida pela filtragem preferencial da luz vermelha na ionosfera, daria lugar a cores intermediárias do espectro visível. Posteriormente, com a entrada na umbra, a luz residual teria se reduzido a um fino e pálido segmento de arco vermelho escuro, formado pelos raros fótons desviados para o interior do cone de sombra após cruzarem a atmosfera terrestre de forma quase rasante.¹

Algumas vezes, quantidades anormais de aerossóis de origem vulcânica, ozônio e nuvens, presentes na troposfera e na estratosfera podem causar uma redução adicional na débil iluminação que banha a

Lua totalmente eclipsada. Sabe-se, por exemplo, que no meio de eclipses totais precedidos de grandes erupções vulcânicas, a Lua pode se apresentar com brilho muito aquém do esperado.²

A idéia de usar eclipses lunares totais como sensores remotos dos níveis globais de aerossóis estratosféricos de origem vulcânica foi proposta por Keen e tem sido usada por ele com sucesso há décadas para monitoração da espessura óptica da atmosfera.

Segundo Keen, as erupções vulcânicas mais violentas são capazes de injetar na estratosfera grandes quantidades de cinzas e gases vulcânicos que podem permanecer suspensos durante vários meses. Ele observou que as camadas da atmosfera da Terra situadas entre 5 e 25 km de altitudes são as que mais influenciam o brilho da Lua no meio dos eclipses e que o caminho livre médio dos fótons que atingem a Lua é aproximadamente igual a 40 vezes a espessura da camada atmosférica vertical mais representativa (até altitudes de 15-20 km).³⁻⁵

II – CORRELAÇÃO MAG (LUNAR x UMBRAL)

Modelos estatísticos que simulam as interações dos fótons solares na atmosfera terrestre têm sido usados para prever o brilho da Lua em eclipses lunares totais. No entanto, tais simulações mostram-se bastante complexas e ainda sujeitas a correções empíricas.

Como opção simplificada, o autor buscou uma correlação que permitisse prever a magnitude (**m**) da Lua no meio de um eclipse lunar total, conhecendo-se apenas a magnitude umbral (U_{mag}).⁶ Para isso, estimativas da magnitude^{3,7,8} da Lua em 24 eclipses observados de 1956 até 2001, e sabidamente não afetados por eventos vulcânicos, foram usadas na determinação de uma regressão linear estatisticamente significativa ($r^2=0,88$) (**Eq.1**) pelo método dos mínimos quadrados:

$$m = -7,3 + 4,3 U_{mag} \quad (1)$$

Em seguida, foi adicionado à **Eq. 1** um termo para correção da magnitude aparente da Lua (até $\pm 0,12$) em função de sua distância geocêntrica, obtendo-se a **Eq. 2**.

$$m \text{ P\% } -1,4 + 4,3 U_{\text{mag}} - 5 \log (\text{SD}) \quad (2)$$

Onde **SD** é o semi-diâmetro aparente do disco lunar, expresso em minutos de arco.

III – DETECÇÃO DE EFEITOS VULCÂNICOS

A **Tab.1** compara as magnitudes previstas com as observadas para os dez eclipses lunares totais, monitorados pela REA desde 1989. Algumas efemérides dos eventos estão listadas nas colunas: 1 (data), 2 (magnitude umbral) e 3 (semi-diâmetro da Lua em minutos de arco). A magnitude visual da Lua, calculada pela **Eq. 2 (mag teor.)** está listada na coluna 4, ao lado da observada (**mag obs.**), na coluna seguinte, cuja diferença **”mag** está na última coluna.

Ecl. Date	U_{mag}	SD(°)	magteor.	magobs.	”mag
2004 Out 28	1,313	15,3	-1,7	-2,2	-0,5
2004 Mai 04	1,309	16,5	-1,9	-2,3	-0,5
2003 Nov 09	1,022	14,7	-2,8	-3,3	-0,5
2003 Mai 16	1,134	16,7	-2,6	-2,2	+0,4
2000 Jan 21	1,330	16,6	-1,8	-1,8	0,0
1996 Set 27	1,245	16,3	-2,1	-2,2	-0,1
1996 Abr 04	1,385	15,6	-1,4	-1,7	-0,3
1993 Nov 29	1,092	15,1	-2,6	-1,0	+1,6
1992 Dez 09	1,276	15,9	-1,9	+3,0	+4,9
1989 Ago 17	1,604	16,3	-0,6	-0,6	0,0

Tabela 1: Efemérides dos eclipses lunares totais observados pela REA, incluindo as magnitudes da Lua (prevista e observada).

As estimativas da magnitude da Lua durante os eclipses de 2003 e 2004 foram realizadas usando-se uma versão aperfeiçoada do método do binóculo invertido⁹⁻¹¹ (correção da perda em magnitude obtida empiricamente) e apresentam erro de $\pm 0,2$ (1Å), enquanto a versão original desse mesmo método (com correção teórica) foi usada na maioria das estimativas feitas nos eventos anteriores (com erro médio estimado em $\pm 0,3$). O valor médio do Número de Danjon estimado para o eclipse de agosto de 1989 foi convertido em magnitude com o uso de uma correlação⁶ desenvolvida pelo autor, tendo em vista que não havia estimativas de magnitude disponíveis para esse evento (erro médio de $\pm 0,4$).

A possível influência de cinzas vulcânicas deve ser considerada quando o brilho da Lua apresenta-se significativamente mais débil que o previsto para o eclipse. O gráfico da **Fig. 1** mostra claramente que isso ocorreu em dois períodos distintos, nos quais 3 eventos foram observados: 9 de dezembro de 1992, 29 de novembro de 1993 e 16 de maio de 2003.

Uma consulta aos registros de atividade vulcânica permitiu identificar os eventos responsáveis pela elevação do nível global de aerossóis vulcânicos

nesses dois períodos, considerando-se que somente erupções com Índice de Explosividade Vulcânica (**VEI**) igual ou superior a 4 são capazes de lançar à estratosfera quantidades consideráveis de aerossóis vulcânicos.¹²

O primeiro pico observado na **Fig 1** corresponde aos severos efeitos causados pelas violentas explosões do Monte Pinatubo (**VEI = 6**, em 15 de Junho de 1991 nas Filipinas); do Monte Hudson (**VEI = 5+**, em 12 de agosto de 1991 no Chile) e, em escala bem menor, pela erupção do vulcão Spurr (**VEI = 4**, em 27 de Junho de 1992 no Alasca).¹²

Durante esse período, que se estendeu por cerca de 3 anos, vários observadores da REA relataram a ocorrência freqüente de crepúsculos muito avermelhados e uma redução de alguns décimos na magnitude limite no zênite. Durante o eclipse de 09 de dezembro de 1992, por exemplo, a Lua, quase 100 vezes menos brilhante do que o previsto, por pouco não desapareceu no céu, diante dos olhos surpresos do autor.

O segundo pico, com amplitude pouco superior aos erros estatísticos associados às observações, provavelmente resultou dos efeitos combinados das erupções do Monte Reventador (**VEI = 4**, em 3 de novembro de 2002 no México) e do Monte Ruang (**VEI = 4 ?**, em 25 de setembro de 2002).¹²

Embora, uma redução de quase uma vez e meia tenha sido observada no brilho da Lua durante o eclipse de 16 de maio de 2003, nenhum efeito vulcânico residual foi observado nos eclipses de novembro de 2003 e maio e outubro de 2004. Pelo contrário, todos esses 3

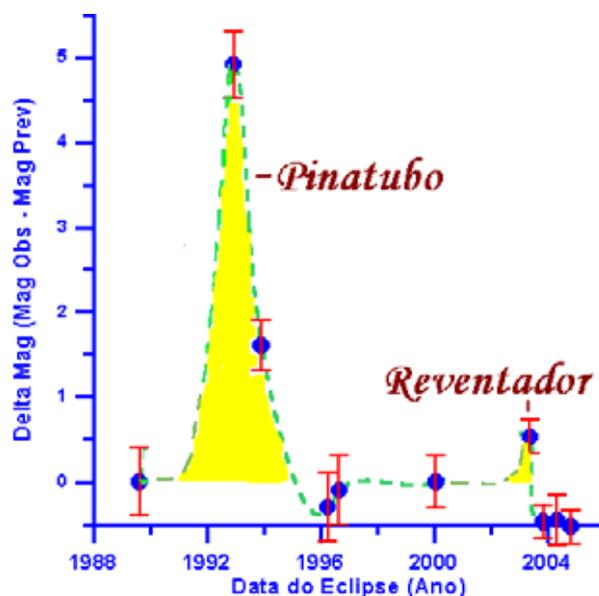


Figura 1: Diferenças entre as magnitudes observadas e previstas para a Lua no meio dos dez eclipses lunares totais observados pela REA.

eclipses indicaram consistentemente um nível de aerossóis estratosféricos abaixo do nível zero previsto pela correlação. Esse fato sugere a existência de flutuações causadas por outros fatores secundários, provavelmente não aleatórios.

IV – CONCLUSÕES

A técnica desenvolvida pelo autor permitiu identificar conclusivamente reduções adicionais no brilho da Lua durante os eventos de 09 de dezembro de 1992; 29 de novembro de 1993 e 16 de maio de 2003 (em 4,9; 1,6 e 0,4 magnitudes, respectivamente).

O escurecimento desses eclipses foi atribuído à presença de aerossóis estratosféricos oriundos das explosões do Monte Pinatubo (junho de 1991) e Reventador (novembro de 2002), tendo sido este último achado reconhecido em um periódico internacional.¹³

Observou-se também que o nível de referência correspondente à ausência de quantidades significativas de aerossóis vulcânicos parece variar de forma não aleatória com o tempo, sugerindo a ação de outros mecanismos secundários, possivelmente periódicos.

V – AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos os colegas que comunicaram¹⁴ suas observações à Seção de Eclipses da REA¹⁵, contribuindo de forma fundamental para a pesquisa que deu origem a este trabalho.

VI – REFERÊNCIAS

[1] Link, F. *Eclipse Phenomena in Astronomy*. New York: Springer-Verlag, 1996.

[2] Karkoschka, E. *Earth's Swollen Shadow*. Sky and Telescope, v. 92, n. 3, p. 98-100, set. 1996.

[3] Keen, R. A. *Volcanic Aerosols and Lunar Eclipses*. Science, v. 222, p. 1011-1013, dez. 1983.

[4] Keen, R. A. *Volcanic Aerosol Optical Thicknesses since 1960*, Bulletin of the Global Volcanism Network, v. 22, n. 11, Nov. 1997.

[5] Keen, R. A. *Volcanic Aerosol Optical Thicknesses Derived from Lunar Eclipse Observations*. Bulletin of the Global Volcanism Network, v. 26, n. 5, May, 2001.

[6] Vital, H. C. *A Luminosidade do Eclipse Lunar Total de 15-16 de maio de 2003*, Reporte 11 da REA, dez. 2003. Disponível na Internet em: <http://reabrasil.astrodatabase.net/reportes11-artigo03.pdf>

[7] Westall, J. E. *Thirty Years of Lunar Eclipse Umbrae: 1956 – 1985*. The Strolling Astronomer: Journal of the A.L.P.O., v. 33, n. 7-9, pp. 112-117, Jul. 1989.

[8] Ashbrook, J.; Sinnott R. W. Análises de observações de eclipses lunares totais publicados na Sky and Telescope a partir de 1956.

[9] Sinnott, R. W. *November's Lunar Eclipse*. Sky and Telescope, v. 106, n. 5, p.101-103, nov. 2003. Disponível na Internet em: http://skyandtelescope.com/observing/objects/eclipses/article_1072_1.asp

[10] Sinnott, R. W. *The Moon Goes Dark*. Sky and Telescope, v. 107, n. 5, p.80, maio 2004.

Disponível na Internet em: http://skyandtelescope.com/observing/objects/eclipses/article_1219_1.asp

[11] MacRobert, A. *October's Ideal Lunar Eclipse*. Sky and Telescope, v. 108, n. 4, p. 72-75, out. 2004. Disponível na Internet em: http://skyandtelescope.com/observing/objects/eclipses/article_1340_1.asp

[12] Global Volcanism Network. *Large Holocene Eruptions*. <http://www.volcano.si.edu/world/largeeruptions.cfm>

[13] Flanders, A. Artigo sobre a observação dos eclipses lunares mais recentes. Sky and Telescope, mar. 2004.

[14] Lista eletrônica da REA: reanet@yahoogrupos.com.br

[15] Páginas eletrônicas da Seção de Eclipses da REA: <http://www.geocities.com/unissolar2003/>

RESUMO

Determinou-se empiricamente uma correlação entre a magnitude umbral e a magnitude visual da Lua, a qual permitiu identificar reduções excessivas no brilho da Lua durante três dos dez eclipses lunares totais observados pela REA desde 1989. Os eventos vulcânicos responsáveis por esses efeitos foram identificados, destacando-se dentre eles: a violenta explosão do Monte Pinatubo em Junho de 1991 e a erupção do Monte Reventador em Novembro de 2002.