

Um estudo sobre a relação entre a coloração de eclipses lunares totais e o particulado em suspensão na atmosfera

A study on the relationship between the color of total lunar eclipses and suspended particulates in the atmosphere

Un estudio sobre la relación entre el color de los eclipses lunares totales y las partículas suspendidas en la atmosfera

Giovana Antoniosi Barbosa¹
Rodolfo Langhi²

Resumo: Este artigo apresenta um estudo sobre a condição atmosférica causada pelos dejetos expelidos na erupção vulcânica na Ilha de Tonga em janeiro de 2022 e sua relação com a coloração de eclipses lunares totais. Visamos responder à seguinte questão de pesquisa: qual é a influência do particulado vulcânico na coloração deste tipo de eclipse? A metodologia de análise envolveu a escala Danjon de eclipses que ocorreram antes e depois desta erupção, e os dados foram obtidos com o projeto realizado pelo IPMet UNESP, em parceria com a NASA, IPEN e LPC com o equipamento LIDAR, além dos registros de uma estação de patrulhamento de meteoros em parceria com o Observatório de Astronomia da UNESP. Os principais resultados desta pesquisa demonstram até que ponto os aerossóis vulcânicos agem como uma fonte natural de particulado atmosférico que afeta a coloração de eclipses lunares totais e dos crepúsculos matutinos e vespertinos.

Palavras-chave: Poluição atmosférica global. Aerossóis vulcânicos. Danjon. LIDAR. All-Sky.

Abstract: This paper presents a study on the atmospheric condition caused by waste expelled in the volcanic eruption on Tonga Island in January 2022 and its relationship with the color of total lunar eclipses. We aim to answer the following research question: what is the influence of volcanic particulates on the color of this type of eclipse? The analysis methodology involved the Danjon scale of eclipses that occurred before and after this eruption, and the data was obtained with the project carried out by IPMet UNESP, in partnership with NASA, IPEN and LPC with LIDAR equipment, in addition to records from a meteor patrolling station in partnership with the UNESP Astronomy Observatory. The main results of this research demonstrate the extent to which volcanic aerosols act as a natural source of atmospheric particulates that affect the color of total lunar eclipses and morning and afternoon twilights.

Keywords: Global air pollution. Volcanic aerosols. Danjon. LIDAR. All-Sky.

¹ Bacharelado em Meteorologia. UNESP. <https://orcid.org/0009-0009-1083-7529>. E-mail: giovana.antoniosi@unesp.br

² Doutorado em Educação para a Ciência. UNESP. <https://orcid.org/0000-0002-3291-5382>. E-mail: rodolfo.langhi@unesp.br

Resumen: Este artículo presenta un estudio sobre la condición atmosférica provocada por la erupción volcánica de la isla de Tonga en enero de 2022 y su relación con el color de los eclipses lunares totales. Nuestra pregunta fue: ¿cuál es la influencia de las partículas volcánicas en el color de este tipo de eclipse? La metodología de análisis involucró la escala de Danjon de los eclipses ocurridos antes y después de esta erupción, y los datos fueron obtenidos por el IPMet/Unesp, en alianza con la NASA, el IPEN y el LPC con equipos LIDAR, además de registros de una estación de patrullaje de meteoritos en alianza con el Observatorio de Astronomía de la Unesp. Los principales resultados de esta investigación demuestran hasta qué punto los aerosoles volcánicos actúan como fuente natural de partículas atmosféricas que afectan el color de los eclipses lunares totales y los crepúsculos matutinos y vespertinos.

Palabras-clave: Contaminación del aire mundial. Aerosoles volcánicos. Danjón. LIDAR. All-Sky.

Submetido 09/11/2024

Aceito 17/02/2025

Publicado 24/02/2025

Considerações iniciais

Os eclipses lunares totais, eventos astronômicos observados e estudados há milênios, oferecem uma janela única para investigar as condições atmosféricas terrestres. Em particular, a variação na coloração da Lua durante eclipses lunares totais, que pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a presença de particulados em suspensão na atmosfera, é de grande interesse para a comunidade científica. A relação entre cinzas vulcânicas e a coloração dos eclipses lunares tem sido objeto de numerosos estudos ao longo dos anos. Keen (1983) foi um dos primeiros a destacar a influência dos aerossóis vulcânicos na coloração dos eclipses lunares. Ele observou que, após grandes erupções vulcânicas, como a do Krakatoa em 1883, os eclipses lunares subsequentes tenderam a ser mais escuros e de coloração mais intensa. Este padrão foi confirmado por estudos posteriores, incluindo os de Di Giovanni (2018), que correlacionaram a luminosidade dos eclipses com a concentração de aerossóis na atmosfera.

Robock (2000) explorou as implicações climáticas das erupções vulcânicas, mostrando como os aerossóis sulfurosos podem causar resfriamento global temporário. Este resfriamento é acompanhado por uma diminuição na transparência atmosférica, o que afeta a coloração dos eclipses lunares. Stothers (2007) ampliou essa pesquisa, examinando registros históricos para identificar períodos de baixa transparência estratosférica, que coincidiram com grandes erupções vulcânicas. García Muñoz et al. (2011) forneceram evidências observacionais detalhadas sobre o impacto da erupção do Kasatochi em 2008 na coloração de um eclipse lunar subsequente. Eles demonstraram que a presença de aerossóis vulcânicos aumentou a absorção da luz solar, resultando em um eclipse mais escuro. Estudos mais recentes, como os de Guillet et al. (2023), utilizaram dados históricos e contemporâneos para entender como grandes erupções vulcânicas no passado, como a erupção do Samalas em 1257, afetaram os eclipses lunares, oferecendo dados sobre o impacto climático de tais eventos.

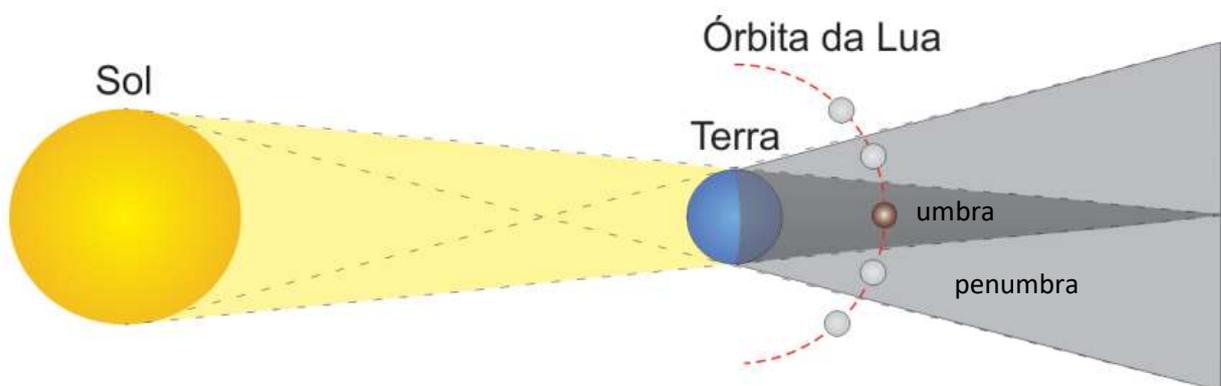
Este artigo foca na investigação da relação entre a quantidade de cinzas vulcânicas na atmosfera e a coloração observada dos eclipses lunares, utilizando a escala Danjon para quantificar a luminosidade e a cor do eclipse – em especial, com os detritos expelidos pela erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, localizado na Ilha de Tonga, ocorrido em 14 de janeiro de 2022. Os eclipses escolhidos para análise foram os que aconteceram antes e depois da erupção, sendo a sua coloração causada pelo espalhamento Mie, além de analisarmos também as diferentes colorações dos crepúsculos neste mesmo período. Os dados foram

coletados a partir de projetos em andamento no IPMet (Centro de Meteorologia da Unesp de Bauru) e na estação all-sky do Projeto Ícaro em parceria com o Observatório Didático de Astronomia da Unesp.

O mecanismo dos eclipses lunares totais

O eclipse lunar é um fenômeno astronômico que ocorre quando a sombra da Terra, produzida pela luz solar, recai sobre a Lua. Tal fenômeno ocorre sempre que há o alinhamento dos três astros: Sol, Terra e Lua respectivamente (portanto, um eclipse lunar sempre ocorrerá na fase Cheia). Como a Lua não possui fonte de emissão de luz, refletindo a luz proveniente do Sol, a sombra da Terra é projetada total ou parcialmente sobre ela durante este fenômeno, classificando os tipos de eclipse como: eclipse total, eclipse penumbral e eclipse parcial (Boczko, 1984; Mourão, 2001; Oliveira e Saraiva, 2004; Zeilik, 2003).

Figura 1 – Ilustração artística fora de escala da penumbra e umbra



Fonte: Oliveira e Saraiva (2004)

Como o Sol é considerado uma fonte extensa de luz, ao iluminar a Terra, forma-se a umbra direcionada ao espaço, que é a região não iluminada, ou sombra. Há também uma região de penumbra, onde não há total ausência de iluminação solar. No eclipse lunar total, a Lua fica totalmente imersa na sombra da Terra, mas sempre atravessa a penumbra (figura 1).

Popularmente, os eclipses lunares totais são chamados de “lua sangrenta” ou “lua de sangue”, porque costumam adquirir uma coloração alaranjada ou avermelhada. Isso acontece porque o Sol emite todos os comprimentos de onda da radiação visível (luz branca). Porém, as

radiações visíveis de comprimento de onda mais longo são direcionadas por refração atmosférica para o interior do cone de sombra da Terra. Sendo assim, as cores alaranjadas e avermelhadas são refletidas pelo nosso satélite natural (Boczko, 1984; Mourão, 2001; Oliveira e Saraiva, 2004; Zeilik, 2003).

Este efeito ocorre devido a um fenômeno atmosférico chamado de Espalhamento Mie, que refrata a luz solar na atmosfera terrestre. Quando a luz encontra grandes concentrados de poluentes atmosféricos (como aerossóis vulcânicos, por exemplo) ela espalha com maior intensidade os comprimentos de ondas mais curtos, sobrando as ondas de maiores comprimentos, ou seja, as cores mais vermelhas do espectro visível, causando tonalidades desta cor ao eclipse lunar total. Se a Terra não tivesse atmosfera, a Lua ficaria completamente escura e ocultada pela sombra terrestre e não seria visível um eclipse avermelhado, pois a luz solar não seria refratada nem dispersada.

Figura 2 – Escala de Danjon



Fonte: Sinnot (2018)

O eclipse lunar tem seu escurecimento e coloração determinado pela Escala de Danjon (1921), cujo nome deve-se ao astrônomo francês André-Louis Danjon (1890-1967), diretor do Observatório de Paris (1945) e ganhador do Prêmio Royal Astronomical Society (1958). Ele desenvolveu uma escala que atribui um coeficiente de luminosidade e coloração ao eclipse lunar total. A atribuição de valores é feita individualmente pelo observador a olho nu, sendo uma escala com cinco níveis, denominadas “L”, sendo L=0 para um eclipse extremamente escuro e quase invisível em seu instante máximo, até L=4 onde apresenta coloração alaranjada bem brilhante e com possíveis bordas azuladas, conforme figura 2 (Sinnot, 2018).

Influências vulcânicas na coloração dos eclipses

Um dos fatores responsáveis pela diferença de coloração dos eclipses lunares é a poluição atmosférica global, podendo ser ela antrópica ou natural. A erupção vulcânica é considerada um fator natural de poluição que expelle uma nuvem de gases e poeiras na atmosfera. Essa nuvem inicialmente é chamada de pluma vulcânica, sendo uma massa de gás e cinzas que se eleva verticalmente do topo do vulcão até uma certa altura da atmosfera.

Quando as erupções são muito fortes, o gás e as plumas vulcânicas podem atingir a estratosfera, onde o gás sulfúrico forma gotículas microscópicas de ácido sulfúrico dando origem a aerossóis sulfurosos (Keen et al. 2008). Conforme ela é transportada pelo vento, dispersa-se formando assim os aerossóis vulcânicos, que são pequenas partículas das cinzas e gases transportados por longas distâncias e que permanecem suspensos na atmosfera terrestre por muito tempo (por até vários anos).

Algumas erupções vulcânicas possuem a capacidade de perturbar a atmosfera de modo global. Por este motivo, de certo modo, é possível avaliar qualitativamente a “saúde” da atmosfera terrestre após essas erupções usando os eclipses lunares totais. Por isso, quando este fenômeno astronômico ocorre, é possível analisar a situação da atmosfera terrestre em relação à “poluição global” gerada, utilizando a escala de Danjon observada durante os eclipses lunares totais. A relação entre a coloração escura dos eclipses e a poluição atmosférica causada por aerossóis vulcânicos foi descoberta após a erupção do Vulcão Krakatoa nas Filipinas em 1883. No entanto, registros de eclipses escuros após grandes erupções remontam a 1600 (Keen, 1983).

Enquanto na troposfera se manifesta o clima que vivenciamos, é na estratosfera onde se encontra a camada de ozônio, responsável pela absorção da radiação ultravioleta emitida pelo Sol. Os aerossóis não permanecem muito tempo em suspensão na troposfera devido ao dinâmico sistema climático que nela acontece, porém, na estratosfera os aerossóis podem ficar em suspensão por meses ou anos, afetando diretamente o clima global (Keen; Henning; Lynch, 2018).

Assim, a pesquisa sobre a relação entre cinzas vulcânicas e eclipses lunares não se limita ao campo da astronomia, mas tem importantes implicações para a meteorologia e a climatologia, podendo fornecer informações sobre a transparência da atmosfera. Isso é particularmente relevante para a modelagem climática, pois períodos de alta atividade vulcânica

estão associados a mudanças temporárias no clima global, como resfriamentos superficiais (Robock, 2000).

A capacidade de usar eclipses lunares como uma ferramenta para monitorar a transparência atmosférica global histórica oferece uma maneira única de entender as mudanças climáticas ao longo do tempo. Stothers (2007) mostrou como os registros de eclipses podem ser utilizados para reconstruir a história da transparência estratosférica e, conseqüentemente, inferir sobre as condições climáticas passadas. Ele estudou três séculos de observações de transparência estratosférica, destacando a importância dos particulados em suspensão na modificação das propriedades ópticas da atmosfera. O estudo sugere que períodos de alta atividade vulcânica estão associados a reduções na transparência atmosférica, o que, por sua vez, afeta a coloração dos eclipses lunares.

De fato, estudos como os de Robock (2000) e Stothers (2007) demonstram que após grandes erupções, a quantidade de partículas na atmosfera aumenta significativamente, resultando em eclipses mais escuros e avermelhados. Estas cortinas, formadas por injeções de aerossóis vulcânicos na atmosfera, são capazes de refletir a luz solar incidente na Terra fazendo com que a temperatura média global diminua, como constatado após a erupção do vulcão Pinatubo nas Filipinas no ano de 1991, registrando-se um resfriamento de 0,4 a 0,6°C no ano seguinte à sua erupção (Keen et al, 2008).

Os aerossóis em suspensão na atmosfera atenuam a penetração da luz proveniente do Sol, ajudando em sua dispersão, a qual, por sua vez, depende diretamente do tamanho e da quantidade de aerossóis presentes na atmosfera (García Muñoz et al., 2011). As pesquisas mostram que quanto mais elevados em altitude estão os aerossóis, mais interferência eles causam, visto que estes permanecem em suspensão na estratosfera, causando maior atenuação do que os que estão na troposfera, pois estes últimos são de curta duração e não contribuem muito com o brilho do eclipse (Keen, 1983).

Por exemplo, Di Giovanni (2018) analisou a luminosidade de eclipses lunares em relação à presença de aerossóis atmosféricos e concluiu que eclipses mais escuros coincidem com períodos de intensa atividade vulcânica. Isso ocorre porque as cinzas vulcânicas em suspensão aumentam a dispersão da luz solar, reduzindo a quantidade de luz que atinge a superfície lunar durante o eclipse. Este efeito é particularmente notável em eclipses ocorridos logo após grandes erupções vulcânicas, como as de El Chichón em 1982 e Pinatubo em 1991,

que resultaram em eclipses visivelmente mais escuros e avermelhados (Keen, 1983; Robock, 2000).

A erupção do Kasatochi em 2008 também oferece um exemplo claro da relação entre atividade vulcânica e a coloração dos eclipses lunares. García Muñoz et al. (2011) investigaram como a erupção afetou a iluminação da Lua durante o eclipse lunar de agosto de 2008. Os autores encontraram uma correlação direta entre o aumento dos aerossóis vulcânicos e o escurecimento da Lua durante o eclipse.

Outro estudo relevante foi realizado por Guillet et al. (2023), que analisaram dados históricos de eclipses lunares para entender o impacto do vulcanismo medieval na observação desses eventos. A pesquisa utilizou registros de eclipses e dados climáticos para mostrar como grandes erupções, como a do Samalas em 1257, influenciaram a coloração dos eclipses subsequentes, resultando em uma Lua cheia eclipsada mais escura e avermelhada. Esses estudos históricos são fundamentais para entender as longas tendências de interação entre vulcanismo e eclipses lunares.

Observações contemporâneas de eclipses lunares continuam a fornecer dados valiosos sobre a interação entre partículas atmosféricas e a coloração lunar, como as feitas por Falcon, Falcon e Ortega (2023) e Cooper (2023), que analisaram os eclipses totais de 2000 a 2022 e encontraram variações na coloração correlacionadas com a quantidade de partículas atmosféricas. A maior parte da luz solar que penetra no cone de sombra terrestre e atinge a Lua Cheia durante o eclipse lunar total atravessa a estratosfera, onde se concentram os aerossóis vulcânicos que formam uma espécie de cortina de fumaça e névoa. García Muñoz et al (2011) mostram que em um eclipse lunar a maior parte da luz solar difusa perto de 600 nm se origina acima de 15 km.

Assim, a coloração de um eclipse lunar total é influenciada pela luz solar que passa pela atmosfera terrestre antes de ser refratada para a superfície lunar. Durante este processo, a luz é dispersa e filtrada, e partículas atmosféricas, como cinzas vulcânicas, desempenham um papel crucial. Partículas maiores e em maior quantidade resultam em maior absorção e dispersão da luz azul, permitindo que mais luz vermelha atinja a Lua, resultando em uma coloração avermelhada mais intensa e escura (Cooper, 2004; Cooper e Geysler, 2004; Keen, 1983).

Portanto, ao observarmos a famosa “Lua Sangrenta” – como são popularmente chamados os eclipses lunares totais bem brilhantes e com coloração que lembram o sangue –

significa que a atmosfera global (não local) está relativamente limpa e com poucos poluentes ou aerossóis em suspensão. Porém, se o eclipse lunar total possuir uma coloração com tom vermelho escuro significa que há uma quantidade expressiva de aerossóis em suspensão. Esta é uma metodologia observacional de análise qualitativa da atmosfera terrestre global que pode, inclusive, ser usada em atividades de Ciência Cidadã (Langhi, 2009).

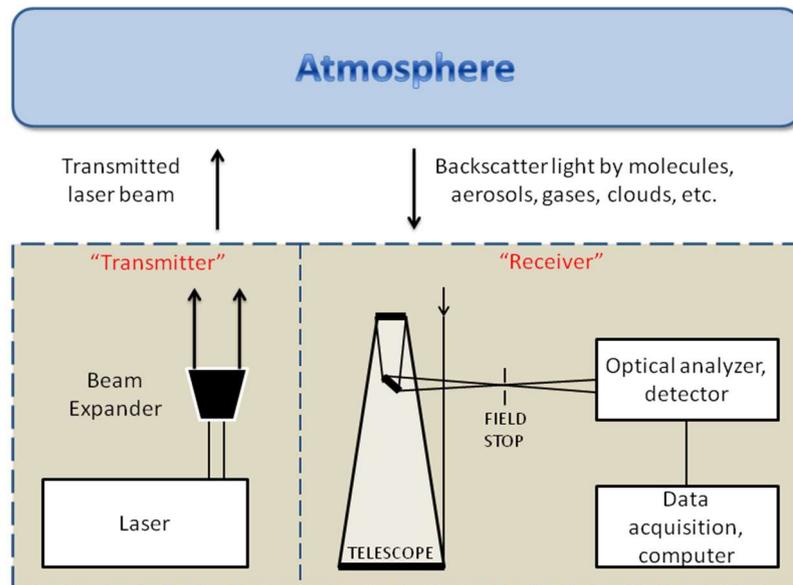
Metodologia

Esta pesquisa é de cunho exploratório de abordagem quantitativa que visa o levantamento e análise de dados numéricos e mensuráveis, tal como elucidada Flick (2013). Ainda, de acordo com Gil (2022), os procedimentos de uma pesquisa exploratória desta natureza precisam contemplar o planejamento da coleta de dados de uma maneira padronizada, e tem como objetivo a sua replicabilidade. Além disso, os instrumentos utilizados para coleta e análise dos dados desta investigação foram fundamentais para o estabelecimento de possíveis relações entre as variáveis, assim como estabelecem os princípios da metodologia e produção científica, conforme destacam Koller, Couto e Hohendorff (2014).

Assim, os encaminhamentos metodológicos desta pesquisa objetivaram os estudos dos dados por meio dos seguintes instrumentos: LIDAR (Light Detection and Ranging), escala de Danjon e uma estação de patrulhamento de meteoros, cujas características descrevemos a seguir.

Uma parte dos dados obtidos para este estudo se deu através do projeto realizado pelo IPMet Unesp (Centro de Meteorologia de Bauru), em parceria com a NASA (National Aeronautics and Space Administration), IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) e LPC (Laboratoire de Physique at de Chemie), para analisar o comportamento e composição dos aerossóis vulcânicos expelidos pelo Tonga (2022).

Figura 3 – LIDAR



Fonte: Wikipedia contributors (2024)

Tal projeto utiliza o LIDAR, um instrumento que emite feixes laser para o estudo dos aerossóis suspensos na atmosfera (figura 3). Uma fonte de laser, com um conjunto de espelhos e um expensor de feixe envia a luz colimada verticalmente para a atmosfera. Parte da radiação transmitida é espalhada por componentes atmosféricos (ou seja, gases, moléculas, aerossóis, nuvens). Ao retornar ao LIDAR, a luz refletida é coletada por um telescópio refletor e conduzida para um analisador óptico onde o sinal é separado espectralmente, amplificado e transformado em um sinal eletrônico para ser digitalizado e armazenado em um computador.

Os dados parciais deste estudo (gentilmente cedidos pelo IPEN) foram essenciais para identificar uma possível associação entre o particulado atmosférico do Tonga às colorações Danjon dos eclipses lunares totais que ocorreram antes (26 de maio de 2021) e depois (16 de maio de 2022 e 8 de novembro de 2022) da erupção.

Além destes dados, a pesquisa também contemplou um levantamento dos vídeos registrados da atmosfera a partir de um equipamento localizado no interior do estado do Paraná, em parceria com o Observatório Didático de Astronomia da Unesp. Este instrumento é uma estação de monitoramento de meteoros, composta por uma câmera CCD altamente sensível, equipada com uma lente grande angular especial, denominada all-sky, proporcionando uma cobertura eficaz de todo o céu. As imagens do céu são capturadas a cada 10 ou 20 segundos,

durante a noite. À luz do dia, o tempo de exposição é menor. O software encarrega-se de unir as imagens capturadas e cria um vídeo time-lapse. Esta estação all-sky está localizada nas coordenadas 23,1°S e 49,8°O em uma região distante de luzes urbanas e com baixa poluição luminosa, cujas imagens foram gentilmente cedidas pelos radioamadores Luciano Diniz (PY2OAL) e Demilson Quintão (PY2UEP), conforme Diniz e Quintão (2021).

As imagens desta estação, registradas durante os crepúsculos vespertino e matutino, dentro do período antes e depois da erupção do Tonga foram analisadas a fim de se verificar possíveis relações da coloração do céu pré e pós erupção. Estes resultados foram então comparados com os níveis Danjon dos eclipses citados.

Análise de Danjon dos eclipses de interesse

O eclipse lunar total de 26 de maio de 2021, foi o último eclipse total antes da grande erupção vulcânica do Tonga, que ocorreu em 14 de janeiro de 2022. Esse eclipse foi definido como um $L=2,6$ de índice de luminosidade na escala Danjon, conforme a média dos registros coletados publicados por Vital (2021). Foi considerado um eclipse avermelhado, com as bordas mais claras, indicando uma fase relativamente escura, porém ainda perceptível para observações (Amorim, 2021).

De acordo com Vital (2021), o eclipse total de 26 de maio de 2021 foi um eclipse rasante e “moderadamente escurecido pela presença de aerossóis vulcânicos estratosféricos que reduziram o brilho da Lua em cerca de 1,4 magnitudes no meio do eclipse”. Este autor conclui que a contribuição da atmosfera para a “sombra umbral da Terra permaneceu inferior à sua média histórica.”

Até dois anos antes deste eclipse de 26 de maio de 2021 nenhuma grande explosão vulcânica capaz de injetar grandes quantidades de aerossóis vulcânicos na estratosfera havia ocorrido (Vital, 2021). Este autor arrazoa que várias erupções menores lançaram quantidades significativas de detritos vulcânicos para o topo da troposfera em 2020 e 2021, de onde uma fração desse material poderia eventualmente ter alcançado a estratosfera. Ao analisar a história da atividade vulcânica durante os últimos meses, Vital (2021) identificou três vulcões em potencial por causar impactos individuais na magnitude aparente da Lua totalmente eclipsada: Sheveluch, Sinabung e Sabancaya. Estes vulcões sofreram uma série de erupções que causaram um leve escurecimento adicional na Lua durante o eclipse de 26 de maio de 2021.

Quanto ao primeiro eclipse lunar total após a erupção do Tonga, em 16 de maio de 2022, observado da América do Sul (Amorim, 2022), teve sua classificação média como um $L = 2,0$ na escala de Danjon, de acordo com as estimativas da equipe brasileira de observadores, o que indica consistentemente um eclipse relativamente escuro (Vital, 2022). De fato, este foi o mais escuro dos três eclipses lunares totais que analisamos neste trabalho.

Este eclipse foi incomumente escuro porque a Lua penetrou profundamente na umbra da Terra neste eclipse, diferente do anterior, que foi mais rasante. Devido ao fato da umbra interna ser mais escura, menos luz solar atingiu a Lua ali, segundo conclusões de Vital (2022a). Porém, além desta variável, houve um escurecimento adicional da Lua de 0,4 de magnitude, possivelmente atribuído aos aerossóis de Tonga (Vital, 2022a). Este mesmo autor afirma que Tony Mallama defende a hipótese de que Tonga escureceu ligeiramente o eclipse, considerando a enorme quantidade de material ainda remanescente na estratosfera e produzindo exibições de cores rosadas no crepúsculo em todo o mundo.

O último eclipse total analisado foi em 8 de novembro de 2022, com classificação Danjon média de $L = 2,4$. Conforme Vital (2022b), a aparência da Lua totalmente eclipsada exibiu principalmente uma tonalidade rosada, com seu hemisfério sul mais escuro. Este eclipse foi, de fato, levemente mais escuro ($L=2,4$) do que o de 26 de maio de 2021 ($L=2,6$) pois a Lua penetrou mais centralmente na umbra terrestre. Embora um pouco mais obscurecido, segundo as análises de Vital (2022b), definitivamente não houve influência alguma de aerossóis vulcânicos de Tonga neste eclipse, pois sua erupção injetou 50 milhões de toneladas de vapor de água na estratosfera, mas apenas 0,4 milhões de toneladas de SO_2 (são os aerossóis de sulfato remanescentes na estratosfera que escurecem a umbra). Como comparação, o vulcão Pinatubo injetou 20 vezes a mais que Tonga. Por isso, o efeito de escurecimento de Tonga foi pequeno em maio, desaparecendo em novembro.

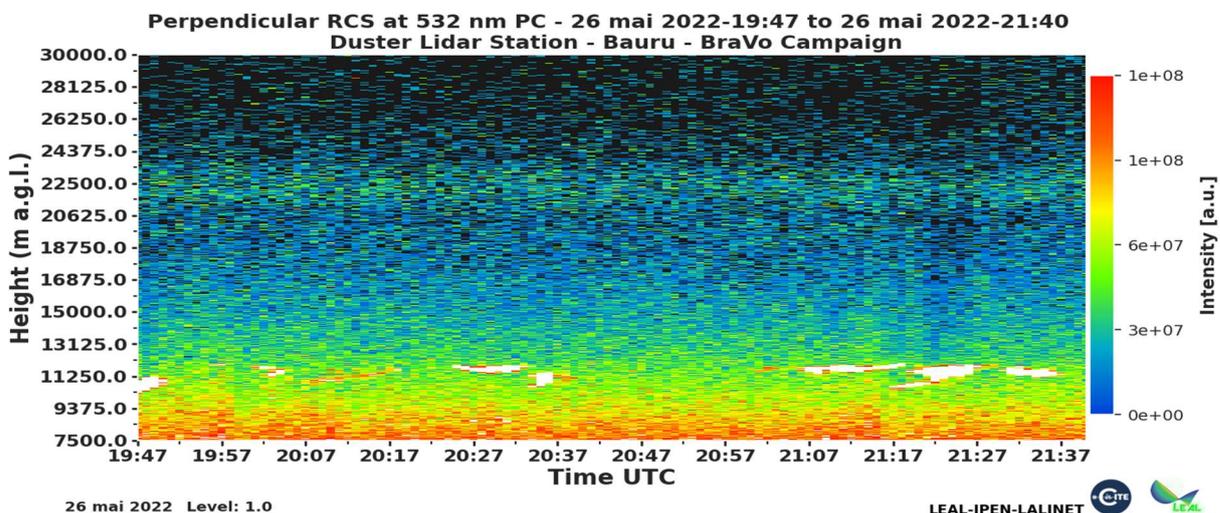
Contudo, Vital (2022b) adverte quanto ao erro de atribuir todos os eclipses escuros a aerossóis vulcânicos, pois o principal motivo do escurecimento dela é astronômico e depende da profundidade do caminho da Lua através da umbra, conforme Mallama (2021), Link (2012) e Sholomitskii (1970).

Análise dos dados do LIDAR

Foram coletados dados do equipamento LIDAR, instalado no IPMet - UNESP Bauru, para a análise dos aerossóis em suspensão na atmosfera. O equipamento foi instalado no dia 26 de maio de 2022, fornecendo dados apenas a partir desta data. No mês de novembro o equipamento realizou apenas uma medida, que é discutida neste estudo.

O primeiro conjunto de dados (figura 4) registrado pelo LIDAR a ser analisado foi obtido em 26 de maio de 2022, entre 19:47 e 21:37 UTC. No gráfico resultante, o eixo horizontal representa a escala de tempo, enquanto a altitude é representada pelo eixo vertical. A escala de cores expressa em unidades arbitrárias, reflete a intensidade do espalhamento causado pelos aerossóis em suspensão pela atmosfera neste determinado dia e horário. Esse tipo de gráfico leva o nome de Quicklook, também conhecido como “Gráfico de Cortina”. Observa-se que entre 20 a 24 km de altitude, identifica-se a presença de pluma vulcânica expelida pelo vulcão Tonga, indicada pelas diferentes intensidades de espalhamento.

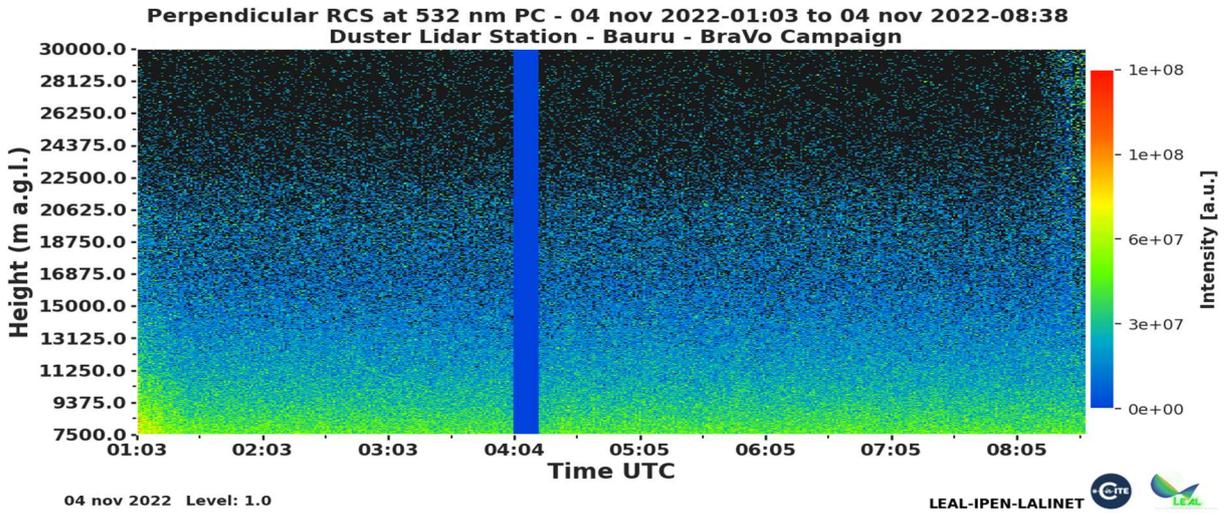
Figura 4 - Registro do dia 26/05/22



Fonte: autores (2024)

O gráfico da figura 5 representa as observações realizadas em 4 de novembro de 2022, no horário de 01:03 às 08:38 UTC, seis meses após a análise da figura 4, onde observa-se uma diferença notável em relação a ambas, sendo nesta a pluma imperceptível.

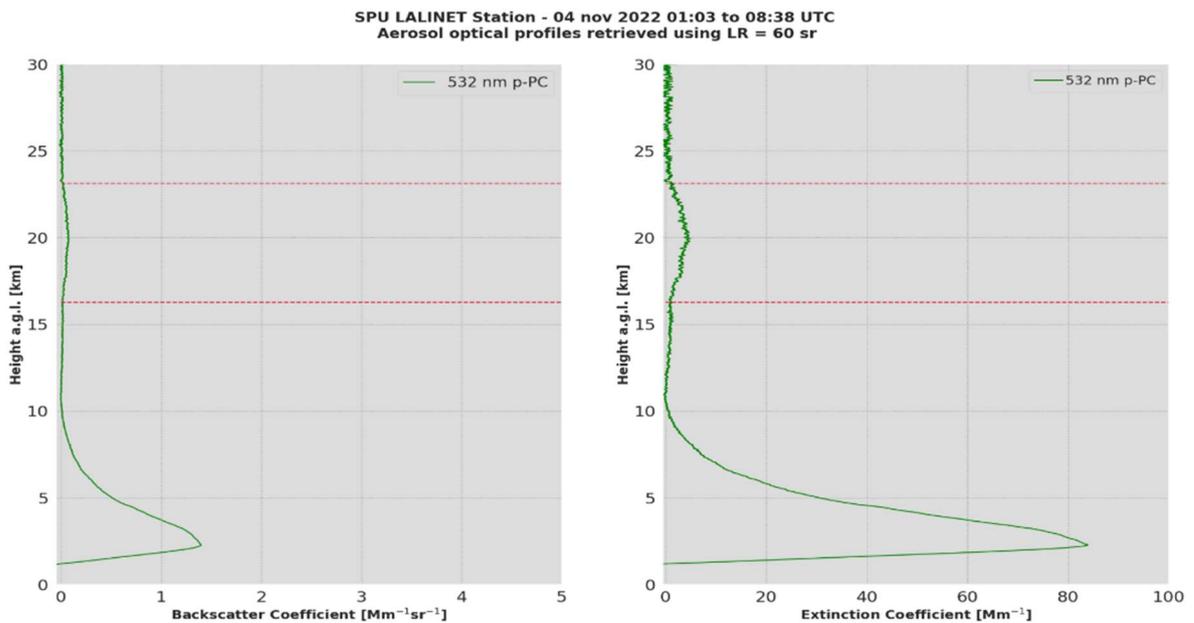
Figura 5 - Registro do dia 04/11/22



Fonte: autores (2024)

Porém, uma análise mais detalhada do sinal do LIDAR mostrada na figura 5 revela a persistência da pluma. No novo gráfico da figura 6 temos o coeficiente de espalhamento (esquerda) e o coeficiente de extinção (direita) da medida realizada em novembro.

Figura 6 - Coeficientes de extinção e espalhamento



Fonte: autores (2024)

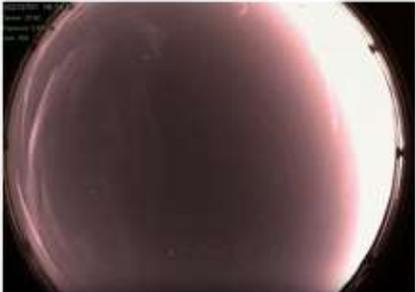
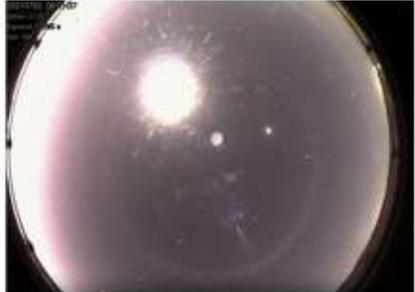
Observa-se a persistência da pluma na atmosfera entre 16 a 24 km de altitude. Embora tenha perdido intensidade, sua espessura aumentou, indicando assim uma presença contínua por mais de oito meses.

Dados da estação all-sky

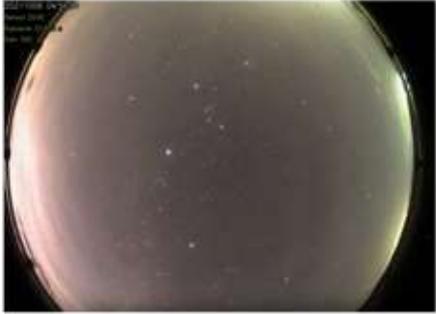
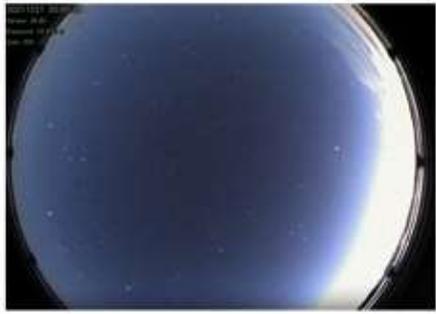
Uma camada de pluma assim considerável afetaria a coloração também da própria atmosfera, conforme visualizada da superfície do planeta? Para constatar a resposta a este questionamento, partimos para a análise das imagens da estação all-sky durante o período de maio de 2021 até dezembro de 2022, ou seja, desde a época do último eclipse lunar total antes da erupção do Tonga até um mês depois do segundo eclipse lunar total após a erupção. A captura das imagens apresentadas a seguir foram realizadas sempre durante o pôr do sol e ao nascer do sol (crepúsculos vespertino e matutino, respectivamente).

As datas das imagens foram escolhidas de acordo com a menor porcentagem de cobertura do céu e de modo que a amostragem fosse mais ou menos periódica, em média uma tomada de dados por mês. Os borrões esbranquiçados nas laterais dos dois círculos do céu all-sky em cada data são os crepúsculos do mesmo dia. Algumas fotos apresentam grandes círculos brancos no céu: trata-se da Lua. Outros apresentam pontos brilhantes com diferentes intensidades: são estrelas.

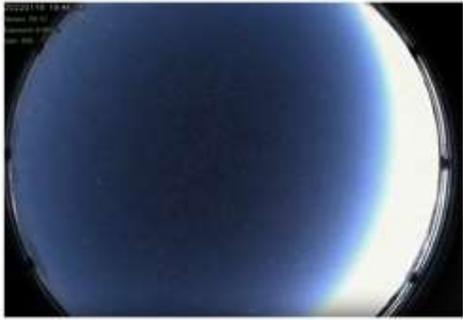
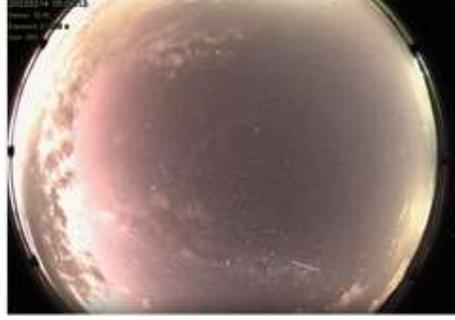
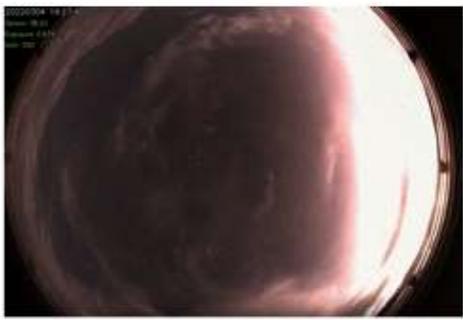
Figura 7 – Crepúsculos vespertinos e matutinos da estação all-sky

Data	Crepúsculo vespertino	Crepúsculo matutino
09/05/21		
26/05/21	Eclipse lunar total (L=2,6)	
13/06/21		
01/07/21		
23/08/21		

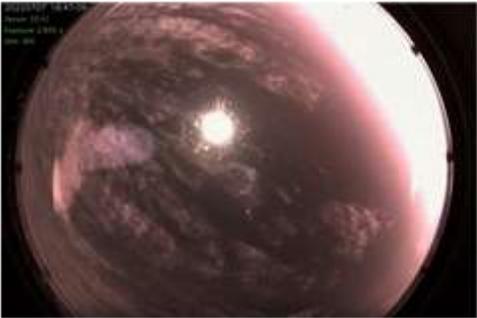
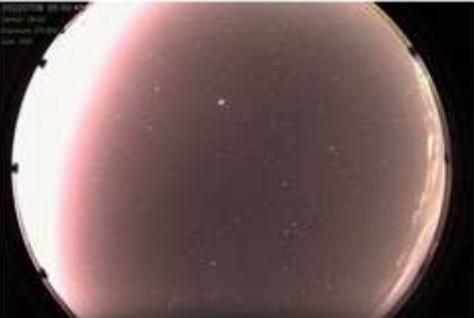
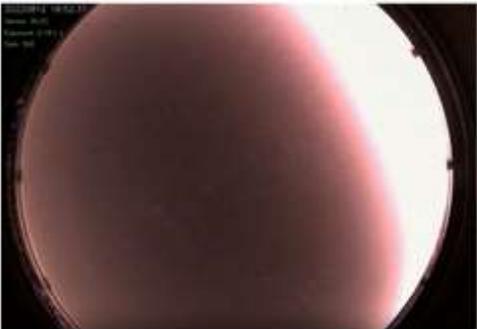
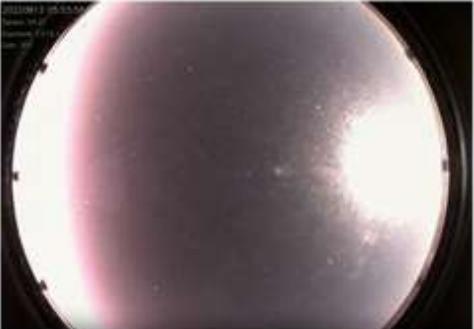


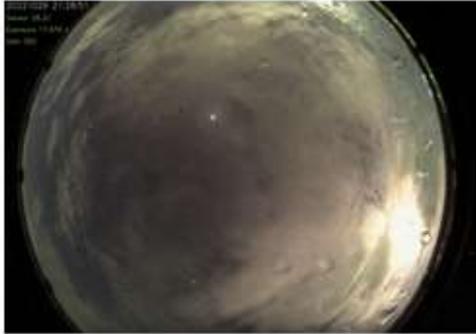
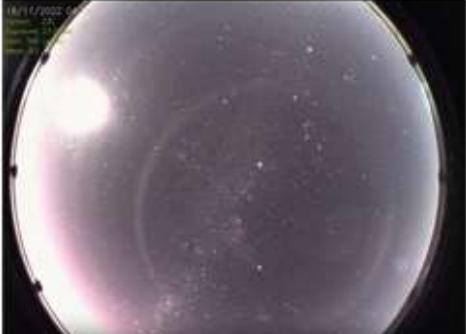
Data	Crepúsculo vespertino	Crepúsculo matutino
21/09/21		
05/10/21		
03/11/21		
21/12/21		
14/01/22	Erupção Tonga	



Data	Crepúsculo vespertino	Crepúsculo matutino
19/01/22		
		
03/04/22		
		



Data	Crepúsculo vespertino	Crepúsculo matutino
16/05/22	Eclipse lunar total (L=2,0)	
26/05/22	Dados LIDAR	
12/06/22		
07/07/22		
12/08/22		

Data	Crepúsculo vespertino	Crepúsculo matutino
29/10/22		
04/11/22	Dados LIDAR	
08/11/22	Eclipse lunar total (L=2,4)	
17/11/22		

Fonte: Diniz e Quintão (2021)

Ao observar as imagens da estação all-sky, podemos notar um padrão de cor típico para o pôr do sol e o nascer do sol ocorrendo de maio de 2021 até janeiro de 2022. Porém, a partir dessa data, nota-se um intenso avermelhamento nas imagens, padrão esse que se mantém até o mês de setembro de 2022. Estas análises da mudança na coloração estão de acordo com o período da chegada dos aerossóis vulcânicos expelidos pelo Tonga ao continente americano a partir do mês de janeiro de 2022. Em outubro de 2022 nota-se o retorno de tons menos avermelhados típicos para o amanhecer e anoitecer. Estes resultados nos levam a entender que

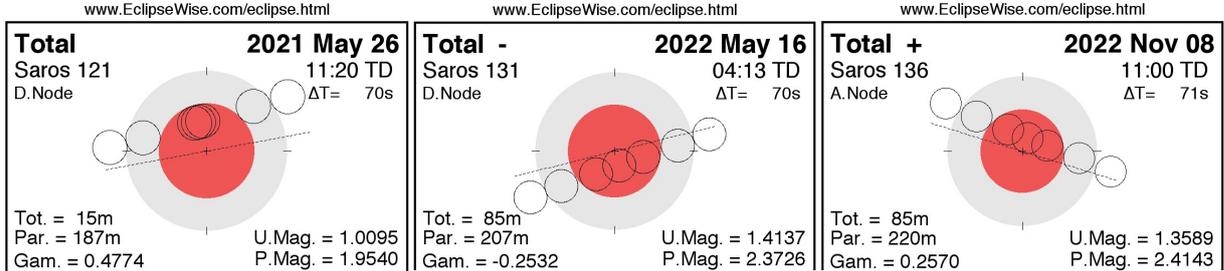
houve diminuição de aerossóis suspensos na atmosfera neste período (ou pelo menos uma diminuição de sua densidade), confirmado pelos registros do LIDAR em novembro e pela escala de Danjon medida no eclipse total lunar daquele mês.

Relação com a trajetória da Lua na umbra da Terra

Os eclipses lunares totais analisados ocorreram nas seguintes datas: a) 26 de maio de 2021, sendo esse o último antes da grande erupção do Tonga em 14 de janeiro de 2022, b) os eclipses de 16 de maio e 8 de novembro de 2022, sendo esses os dois eclipses totais após a erupção. O eclipse de 2021 teve seu coeficiente de luminosidade definido como $L = 2,6$ na escala de Danjon, o que indica cor pouco escura e avermelhada. O eclipse de 16 de maio de 2022, teve seu número Danjon definido como $L = 2,0$ – um pouco mais escuro que o anterior e o mais escuro dos três. Porém o último eclipse lunar total, ocorrido em novembro de 2022, obteve $L = 2,4$ na escala de Danjon, o que indica um eclipse relativamente escuro (porém levemente mais claro do que o anterior), cujo escurecimento não esteve relacionado com as cinzas vulcânicas em suspensão, mas sim devido ao fato de a Lua atravessar a umbra terrestre em uma trajetória mais profunda, assim como o eclipse de 16 de maio de 2022.

A figura 8 representa a trajetória da Lua pela penumbra (em cor cinza) e umbra (em cor vermelha), mostrando a passagem da Lua mais centralizada pela umbra durante os dois últimos eclipses, em condições bem semelhantes de obscurecimento, ao passo que durante o primeiro eclipse sua passagem se deu mais rasante à umbra. Desconsiderando-se os efeitos da pluma vulcânica, o primeiro eclipse apresentaria uma escala Danjon relativamente mais clara em relação aos dois últimos eclipses, enquanto estes teriam registros iguais de Danjon. No entanto, o Tonga parece ter contribuído, embora minimamente, para que o eclipse 16 de maio de 2022 se apresentasse sutilmente mais obscurecido do que o de 22 de novembro de 2022, o que pode ser confirmado com os dados do LIDAR e das colorações dos crepúsculos registrados pela estação all-sky.

Figura 8 - Trajetórias da Lua na umbra e penumbra terrestre



Fonte: Spenak (2021)

Em resumo, antes da erupção do Tonga, tivemos o eclipse de 26/05/21 com $L=2,6$ (o menos escuro dos três) com a Lua rasante na umbra; o eclipse logo após a erupção, em 16/05/22 com $L=2,0$ (o mais escuro) com a Lua mais profunda na umbra somado aos efeitos da pluma; e o eclipse de 08/11/22 com $L=2,4$ (pouco mais claro do que o anterior) também com passagem mais profunda da Lua na umbra, mas sem os efeitos da pluma.

Considerações finais

O propósito desta pesquisa foi estudar a poluição atmosférica natural por meio de eventos astronômicos. Foi realizada uma análise dos impactos atmosféricos causados pela erupção do vulcão Tonga em 14 de janeiro de 2022 nas Filipinas, usando observações de eclipses lunares totais que ocorrem nos anos de 2021 e 2022. Para chegarmos a uma conclusão, realizou-se três métodos de análises diferentes que contribuíram para o resultado deste trabalho.

Um desses métodos foi a análise de dados do LIDAR, localizado na cidade de Bauru-SP. A primeira observação ocorreu no dia 26 de maio de 2022, quando os dados sugerem que os aerossóis expelidos pelo Tonga estavam em suspensão na estratosfera entre 20 e 24 km de altitude. Na observação realizada em novembro, temos a pluma quase imperceptível no gráfico de cortina. Com a análise mais detalhada da medição de novembro identifica-se a cortina de aerossóis com menor densidade e maior espessura, por estar mais espalhada pela estratosfera entre 16 a 24 km de altitude, indicando a queda lenta das partículas por gravidade.

Outra análise realizada foi com os vídeos all-sky da estação localizada no Paraná. Pode-se notar claramente a variação da coloração atmosférica evidenciada ao amanhecer e anoitecer no decorrer dos meses. Os registros iniciais de maio de 2021 revelaram-se menos avermelhados,

dentro do comumente observado em crepúsculos normais. A partir de fevereiro, podemos observar nitidamente a coloração mais intensa em decorrência do espalhamento Mie em função da maior quantidade de aerossóis em suspensão na estratosfera, mantendo tal coloração até setembro de 2022. Em outubro e novembro de 2022 nota-se a atmosfera voltando ao seu padrão de coloração crepuscular.

Por fim, podemos chegar à conclusão de que os aerossóis vulcânicos são poluentes naturais capazes de interferir na coloração da atmosfera devido ao espalhamento da luz solar difusa. Observamos esse fato através da análise dos dados obtidos pelo LIDAR, a olho nu com os vídeos all-sky da estação e os índices de luminosidade dos eclipses, indicando valores diferentes para cada data, em concordância com a pluma lançada pelo Tonga.

A relação entre a quantidade de cinzas vulcânicas em suspensão na atmosfera e a coloração dos eclipses lunares totais é um campo de estudo que oferece dados valiosos tanto para a astronomia quanto para a climatologia. Os eclipses lunares servem como indicadores naturais da transparência atmosférica global, permitindo a reconstrução de eventos vulcânicos passados e suas consequências climáticas. A aplicação da escala Danjon e a análise detalhada de estudos de casos específicos, como a do vulcão Tonga, analisado nesta pesquisa, demonstram claramente a influência dos particulados atmosféricos na coloração dos eclipses.

Esta pesquisa contribui para o entendimento de como eventos vulcânicos influenciam a atmosfera terrestre e, por extensão, o clima global. A metodologia adotada, que combina observações astronômicas, dados climáticos e modelagem atmosférica, proporciona uma abordagem abrangente para estudar esses fenômenos. Continuar a monitorar e analisar eclipses lunares, em conjunto com dados de erupções vulcânicas, permitirá avanços significativos na previsão e compreensão das interações entre a atividade vulcânica e as mudanças climáticas.

Agradecimentos: ao CNPq pela bolsa concedida (processo: 406216/2022-3); à equipe do IPEN, pelo fornecimento de dados da LIDAR; ao Projeto Ícaro, representado por Luciano Diniz e Demilson Quintão; ao Observatório Didático de Astronomia da UNESP; ao IPMet UNESP; ao Prof. Dr. Demerval Soares Moreira (Depto. de Física e Meteorologia da Unesp) pelas orientações e revisões.

Referências

AMORIM, A. Eclipse lunar em 26 de maio de 2021. **Boletim Observe! Informativo do NEOA-JBS**, Florianópolis, Ano XII, n. 7 julho 2021.

AMORIM, A. Eclipse Total da Lua. **Boletim Observe! Informativo do NEOA-JBS**, Florianópolis, Ano XIII, n. 6 junho 2022.

BOCZKO, R. **Conceitos de astronomia**. São Paulo: Blucher, 1984.

COOPER, T. The darkness and colour of the umbra during a lunar eclipse. **MNASSA: Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa**, Johannesburg, v. 63, n. 3, p. 60-64, 2004.

COOPER, T. Darkness and colour of the Total Lunar Eclipses of 2022. **MNASSA: Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa**, Johannesburg, v. 82, n. 1, p. 18-32, 2023.

COOPER, T. & GEYSER, M. Size and shape of the umbra during a lunar eclipse. **MNASSA: Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa**, Johannesburg, v. 63, n. 1, p. 12-19, 2004.

DI GIOVANNI, G. Lunar eclipse brightness and the terrestrial atmosphere. **Journal of the British Astronomical Association**, Nottingham, v. 128, n. 1, 2018.

DINIZ, L. M.; QUINTÃO, D. A. **Projeto Ícaro - AllSky**. Jacarezinho, 2021. Disponível em: <<https://projetoicaro.qsl.br/allsky/>>. Acesso em: jan. 2021.

FALCON, N., FALCON, O., ORTEGA, A. The Chromaticity of Total Lunar Eclipses and the Modified Danjon Scale as an Indirect Measure of Stratospheric Aerosols. **AJ Planetary Space Sci**, Bentonville, v. 2, n. 1, p. 107. 2023.

FLICK, U. **Introdução à metodologia de pesquisa**. Porto Alegre: Penso, 2013.

GARCÍA MUÑOZ, A. et al. The impact of the Kasatochi eruption on the Moon's illumination during the August 2008 lunar eclipse. **Geophysical research letters**, Columbia, v. 38, n. 14, 2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GUILLET, S. et al. Lunar eclipses illuminate timing and climate impact of medieval volcanism. **Nature**, Londres, v. 616, n. 7955, p. 90-95, 2023.

KEEN, R. A. Volcanic aerosols and lunar eclipses. **Science**, Washington, v. 222, n. 4627, p. 1011-1013, 1983.

KEEN, R. A. et al. Volcanoes and Climate Change since 1980: a view from the Moon.

Climate, University of Colorado, Boulder, 2008. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/16954099/>. Acesso em: 29 mar. 2024.

KEEN, R. A.; HENNING, J.; LYNCH, H. **Volcanoes and Eclipses**. Bureau of Economic Geology, Austin, [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.earthdate.org/episodes/volcanoes-and-eclipses>. Acesso em: 4 abr. 2024.

KOLLER, S. H.; COUTO, M. C. P.; HOHENDORFF, J. V. **Manual de produção científica**. Porto Alegre: Penso, 2014.

LANGHI, R. Educação em astronomia e formação continuada de professores: a interdisciplinaridade durante um eclipse lunar total. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, São Carlos, n. 7, p. 15-30, 2009.

LINK, F. **Eclipse phenomena in astronomy**. Springer Science & Business Media, 2012.

MALLAMA, A. Lunar Eclipse Phenomena: Modeled and Explained. **arXiv preprint arXiv:2112.08966**, 2021.

MOURÃO, R.R.F. **Manual do Astrônomo**, 5.ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Fundamentos de Astronomia e Astrofísica**, Livraria de Física: São Paulo, 2004.

ROBOCK, A. Volcanic eruptions and climate. **Reviews of geophysics**, Washington, v. 38, n. 2, p. 191-219, 2000.

SHOLOMITSKII, G. B. F. Eclipse Phenomena in Astronomy. **Soviet Astronomy**, Vol. 14, p. 543, v. 14, p. 543, 1970.

SINNOTT, R. Useful projects for a lunar eclipse. Astronomy news. **Sky and Telescope magazine web site**. Disponível em: <https://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/useful-projects-for-a-lunar-eclipse> . 2018.

SPENAK, F. Lunar **Eclipses**. Disponível em: <https://www.eclipsewise.com/lunar/> . 2021.

STOTHERS, R. B. Three centuries of observation of stratospheric transparency. **Climatic change**, New York, v. 83, n. 4, p. 515-521, 2007.

VITAL, H. C. **Preliminary Analysis of the Total Lunar Eclipse on May 26, 2021**. Disponível em: <https://www.geocities.ws/lunissolar2003/LE202105H.htm> . 2021.

VITAL, H. C. **Eclipse Lunar Total de 15 a 16 de maio de 2022:** descobertas preliminares das observações. Disponível em: <https://www.geocities.ws/lunissolar2003/A202205F.htm> . 2022.

VITAL, H. C. **Danjon Number and Visual Magnitude Estimates of the 2022 May 15-16 Total Lunar Eclipse made by the Brazilian Lunar Eclipse Watchers.** Disponível em: https://www.geocities.ws/lunissolar2003/Danjon_Mag_Fot.htm . 2022a.

VITAL, H. C. **Total Lunar Eclipse on November 8, 2022:** Preliminary Conclusions from Analyses of Photos and Videos. Disponível em: <https://www.geocities.ws/lunissolar2003/Nov08.htm>. 2022b.

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. **Atmospheric LIDAR.** Wikipedia, The Free Encyclopedia. 25 August 2024. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Atmospheric_lidar&oldid=1242195559 .

ZEILIK, M. **Astronomy: the evolving universe.** 9.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.