

O avermelhamento da Lua e a poluição atmosférica: a escala de Danjon como ferramenta ambiental e análises experimentais como demonstração da óptica envolvida no fenômeno

Giovanna Moreira Canonici¹ & Lara Gomes Chieppe²
(orientador: Prof. Rausson Alessandro Barbosa)³

Resumo: Durante os eclipses lunares, percebe-se o fenômeno do avermelhamento da Lua, o qual é utilizado na Escala de Danjon para classificar os eclipses de acordo com a coloração e a luminosidade do satélite natural. Contudo, ao estudar as propriedades ópticas responsáveis pelo avermelhamento da Lua, entende-se que as partículas e os gases na atmosfera terrestre estão diretamente relacionados à coloração avermelhada adquirida pela Lua durante os eclipses, a qual é explicada pela dispersão de Rayleigh. Visto isso, a fim de compreender como a poluição atmosférica interfere no avermelhamento da Lua, empregou-se uma metodologia teórica, de caráter bibliográfico, e prática, por meio de um experimento. A demonstração experimental consistiu na incidência de um feixe de luz branco em diferentes concentrações de fumaça, comprovando a teoria do espalhamento Rayleigh, através da observação de um maior espalhamento das componentes luminosas de menor comprimento de onda. Por conclusão, o uso da escala de Danjon como ferramenta ambiental evidenciou que a poluição atmosférica, advinda principalmente de ações antrópicas, potencializa o avermelhamento da Lua, visto que ela aumenta a concentração de partículas espalhadoras da luz.

Palavras Chave: Avermelhamento da Lua. Poluição atmosférica. Dispersão de Rayleigh. Escala de Danjon. Eclipse lunar.

Abstract: During lunar eclipses, there is the perception of the Moon's reddening phenomena, which is used in the Danjon's Scale to classify eclipses according to the color and luminosity of the natural satellite. Nevertheless, while studying the optical properties responsible for the Moon's redness, the direct relationship between the particles and the gases on Earth's atmosphere is understood as connected to the red color acquired by the Moon during eclipses that depends on the Rayleigh scattering. Therefore, to comprehend how the atmospheric pollution interferes in the Moon's reddening phenomena, a theoretical methodology (with a bibliographical nature) and a practical focus (through the making of an experiment) were employed. The experimental demonstration consisted of the incidence of a white light beam on different concentrations of smoke, proving the theory of the Rayleigh scattering by observing a greater scatteration of the luminous components composed by smaller wavelengths. In conclusion, the use of the Danjon Scale as an environmental tool shows that atmospheric pollution, an effect that came mainly from anthropic actions, enhances the reddening of the Moon since it increases the concentration of particles capable of scattering light.

Keywords: Reddening of the Moon. Atmospheric pollution. Rayleigh scattering. Danjon scale. Lunar eclipse.

1. INTRODUÇÃO

A escala de Danjon é um instrumento teórico que mede como variações nas concentrações de partículas na atmosfera terrestre afetam a coloração da Lua vista por um observador na superfície da Terra. Partindo dessa ideia, conclui-se que o aumento da poluição atmosférica seria um fator influente no avermelhamento da Lua, visto que ele precisamente promove um acréscimo no número total de moléculas presentes na atmosfera. Daí a importância do estudo do principal fenômeno óptico responsável pelo avermelhamento da Lua: a dispersão de Rayleigh.

¹ Aluna do 3º ano do Ensino Médio do Colégio Olimpo (Uberlândia - MG) - gicanonici@gmail.com.

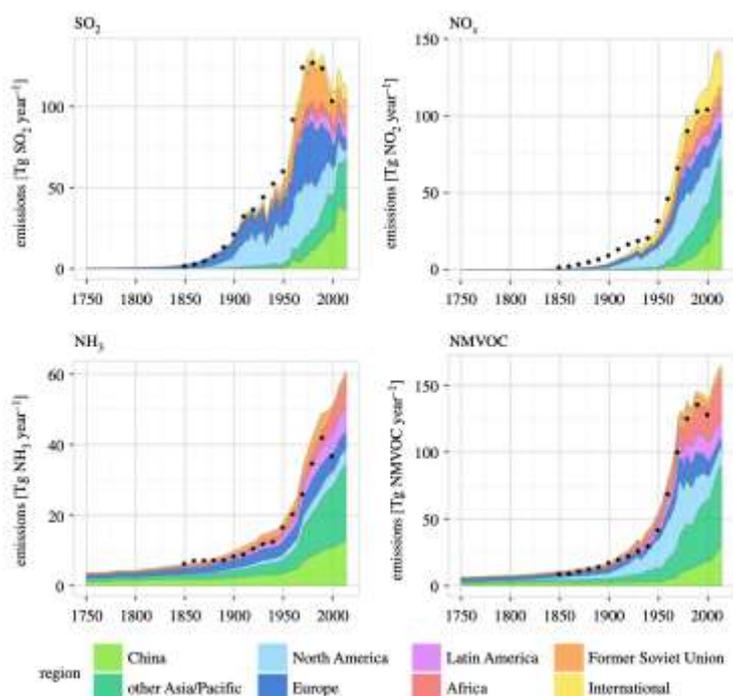
² Aluna do 2º ano do Ensino Médio do Johannes-Scharrer-Gymnasium (Nuremberg - Alemanha) - laragchieppe@gmail.com.

³ Professor de Física do Colégio Olimpo (Uberlândia - MG) - rausson.alessandro@grupoolimpo.com.br.

A partir de uma análise histórica do aumento exponencial da concentração de gases poluentes na atmosfera, torna-se possível reconhecer que há uma tendência a haver cada vez um maior avermelhamento na Lua na perspectiva de um observador na Terra. Esse problema iniciou-se bem antes da Revolução Industrial: já no Império Romano há registros de excesso de fumaça visível nas cidades.. Há também registros que evidenciam a necessidade, em 1200, de limpar as praias de Londres, que estavam cobertas por carvão. Além disso, foi comprovado o uso da técnica de amalgamação, conhecida por moer minério para transformá-lo em pó e pela sua insustentável prática de levantamento do minério ao ar livre, na Bolívia em 1572 e no Peru.

Já no século XVI, a invenção da máquina a vapor acelerou ainda mais o processo, visto que potencializou a poluição do ar em larga escala. Assim, os principais centros urbanos com extensas nuvens de fumaça deixaram de ser apenas 6 no mundo para se tornarem 43 entre 1800 e 1900. Como resposta a protestos sociais, leis foram promulgadas no Reino Unido, nos Estados Unidos e na Alemanha, mas elas não representaram grandes mudanças na prática, visto que líderes estavam pouco sensíveis a uma redução no desenvolvimento. Logo após, houve a democratização do automóvel, uma nova fonte de poluição atmosférica entre todas as demais. Já em 1940, havia mais de um milhão de carros em Los Angeles. Depois de várias reivindicações sociais em relação ao problema e diversos casos de morte por doenças respiratórias, efetivas legislações para regulamentar o impacto das indústrias no meio ambiente foram publicadas na década de 70, ainda apresentando, entretanto, certas limitações. Atualmente, a maioria dos centros urbanos no Ocidente encontra-se em condições melhores, mas é importante considerar que elas dependem da sua transição aos países em desenvolvimento que, atualmente, sofrem com as extremas consequências da poluição atmosférica. Tal contextualização é consolidada pelos gráficos da figura 1:

Fig. 1 - Emissões globais e regionais de SO₂, NO_x, NH₃ e NMVOC entre 1750 e 2010



Fonte: Hoesly *et al*, 2018 (adaptado).⁴

⁴ Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/11/369/2018/>. Acesso em 09-06-2021.

Este apresenta uma porção teórica e bibliográfica com o enfoque em construir uma base teórica nos tópicos físicos que permitem a ocorrência do eclipse lunar total com as suas padronizadas características. Outra parte tem um enfoque experimental que busca, a partir de uma reprodução dos fenômenos ópticos que ocorrem na atmosfera terrestre em proporções menores possíveis para análise da dispersão Rayleigh. Como esse espalhamento promove o avermelhamento da Lua? De que forma o aumento da concentração de partículas de gases poluentes poderia intensificar a dispersão da luz na atmosfera terrestre? Essa pesquisa foi principalmente motivada pela necessidade de responder tais perguntas com o intuito de reconhecer como a elevada liberação de gases poluentes na atmosfera pode, além de promover os efeitos já popularmente conhecidos, favorecer mudanças na óptica de eclipses lunares. Percebendo a escassez de uma análise dessa perspectiva na literatura da área pareceu-nos ainda mais interessante empreender esta pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Compreender as possíveis causas e identificar os potenciais intensificadores da coloração avermelhada da superfície da Lua durante eclipses lunares totais a partir de análises experimentais e teóricas dos processos ópticos envolvidos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Entender os mecanismos físicos que promovem o avermelhamento da Lua;
- b. Verificar experimentalmente o espalhamento Rayleigh;
- c. Analisar como os gases poluentes da atmosfera terrestre interferem na óptica dos eclipses lunares;
- d. Evidenciar a importância da escala de Danjon como instrumento ambiental.

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1. OS ECLIPSES LUNARES

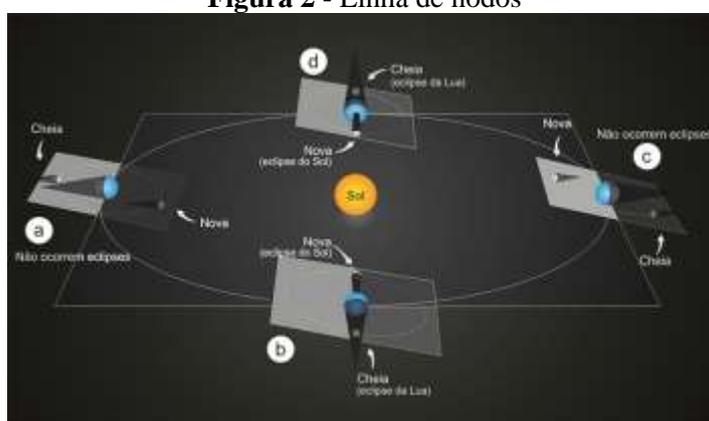
Eclipses lunares ocorrem como consequência do alinhamento Sol-Terra-Lua, de forma que haja um encontro entre os planos orbitais. São eventos com uma frequência mínima de 2 vezes ao ano, não ocorrendo na frequência mensal por conta da Lua se apresentar em um plano inclinado com relação à Terra, que tem seus movimentos de rotação e translação como fatores que variam sua localização, tornando o eclipse lunar possível. Esse fenômeno pode ocorrer de maneira que a Lua atravesse zonas que apresentam a sombra da Terra, consequência da impossibilidade da passagem dos raios solares ao outro lado da superfície terrestre. Essa área é dividida entre penumbra e umbra, de forma que um eclipse penumbral ocorre se apenas a penumbra fizer parte do trajeto; um eclipse parcial, se a Lua penetrar apenas parcialmente na umbra; e umbral (ou total), se a Lua se adentrar inteiramente na umbra.

Esse fenômeno apresenta como consequência a visibilidade - para um observador na Terra -, da superfície lunar com uma coloração mais obscura, no caso do eclipse penumbral e avermelhada, na ocorrência de um eclipse total. A primeira situação acontece como consequência do bloqueio da passagem dos raios solares para a Lua, enquanto a segunda é efeito da passagem dos raios solares pelas diversas e densas camadas da atmosfera terrestre até alcançar a superfície lunar. O vermelho é alcançado como efeito da dispersão Rayleigh, que é responsável por espalhar os comprimentos de onda menores, deixando apenas ondas de comprimento

correspondente à cor vermelha serem percebidas por observadores na superfície terrestre. Esse processo pode durar minutos ou horas e é visível apenas no lado terrestre que se encontra no período da noite.

O plano da órbita da Lua ao redor da Terra é diferente do plano orbital da Terra ao redor do Sol. A figura mostra a configuração Sol-Terra-Lua para as fases Nova e Cheia em quatro lunações diferentes, destacando os planos da eclíptica (retângulo maior) e órbita lunar (retângulos menores). Nas lunações (a) e (c), as fases Nova e Cheia ocorrem quando a Lua está um pouco acima ou um pouco abaixo da eclíptica, e não acontecem eclipses. Nas lunações (b) e (d), a Lua Nova e a Lua Cheia ocorrem quando a Lua está nos pontos orbitais onde cruza a eclíptica, então ocorre um eclipse solar na Lua Nova e um eclipse lunar na Lua Cheia. O plano orbital da Lua está inclinado em 5.2° do plano orbital da Terra. Portanto, os eclipses lunares ocorrerão somente quando a Lua estiver na fase de Lua Cheia e quando o Sol estiver acima da linha dos nodos. Esta é a linha de interseção entre o plano da órbita da Terra ao redor do Sol com o plano da órbita da Lua ao redor da Terra.

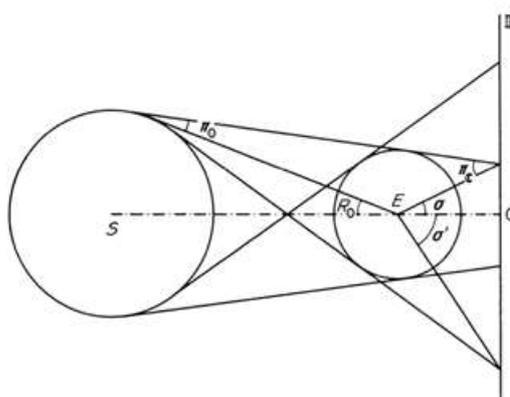
Figura 2 - Linha de nodos



Fonte: Kepler de Souza Oliveira Filho & Maria de Fátima Oliveira Saraiva, 2020.⁵

Do ponto de vista geométrico desse evento, ele é efetuado por conta da construção dos dois cones correspondentes à umbra e à penumbra, comuns às tangentes interior e exterior, para o Sol e para a Terra.

Figura 3 - Condições geométricas de eclipses lunares



Fonte: Link F., 1969.⁶

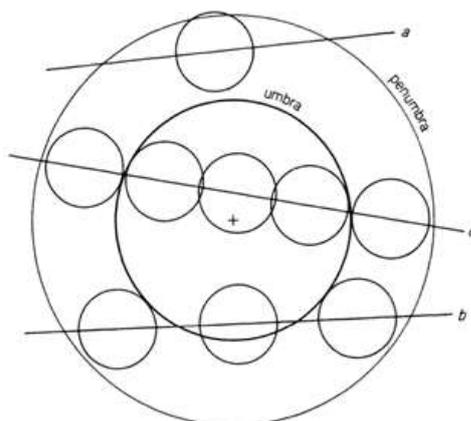
⁵ Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/eclipses/eclipse.htm>. Acesso em 17-09-2021.

Seus semi diâmetros, tendo como referencial o centro da Terra são:

- $\sigma = \pi_{\zeta}^7 + \pi_{\odot}^8 - R_{\odot}^9$ para a umbra
- $\sigma' = \pi_{\zeta} + \pi_{\odot} + R_{\odot}$ para a penumbra

Assim, quando a Lua passa próximo à linha SE, o eclipse ocorre, com variações visíveis na figura 4.

Figura 4 - Diferentes tipos de eclipses lunares. (a) Penumbral. (b) Parcial. (c) Total.



Fonte: Link F., 1969.¹⁰

Analisando esse comportamento, vale ressaltar que o eclipse penumbral não é perceptível a olho nu até metade do diâmetro lunar ser coberto, havendo, assim, certa aproximação à umbra. Isso ocorre, pois o contraste da parte ainda não afetada da Lua com a área na penumbra é suficiente para disfarçá-lo.

3.2. A ATMOSFERA TERRESTRE E A POLUIÇÃO AMBIENTAL

A atmosfera terrestre é dividida em 5 camadas: a troposfera, a estratosfera, a mesosfera, a termosfera e a exosfera. A troposfera é a camada de menor altitude, sendo o local de maior densidade na atmosfera e onde se concentra a poluição do ar. Ela é composta em 78% por nitrogênio, 21% por oxigênio e 1% por outros gases, apresentando 75% de todo o ar atmosférico. A próxima camada acima desta é a estratosfera, onde se encontra a camada de ozônio, local no qual há 19% dos gases da atmosfera e uma concentração de gás ozônio maior do que a de gás oxigênio. Nela, as moléculas de ozônio absorvem a luz ultravioleta, transformando-a em calor. Acima da estratosfera, encontra-se a mesosfera, camada mais fria entre todas as da atmosfera. Na parte superior, há a termosfera, camada mais extensa da atmosfera e com elevadas temperaturas por conta de haver a absorção de ondas de curtos comprimentos nesse local. Por fim, situa-se a exosfera, que antecede o espaço sideral e é formada, em

⁶ Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-86475-9_1. Acesso em 22-09-2021.

⁷ π_{\odot} é onde a paralaxe do Sol está.

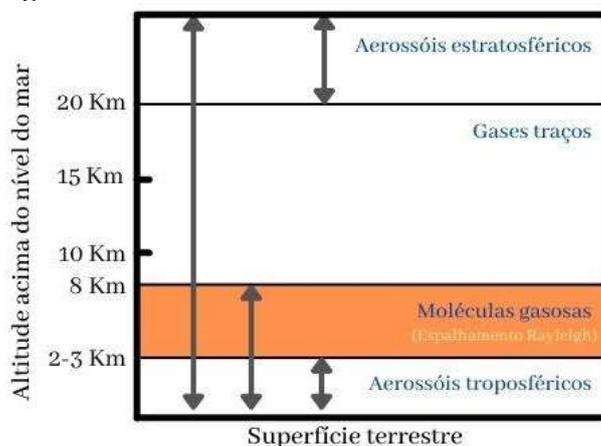
⁸ π_{ζ} é onde a paralaxe da Lua está.

⁹ R_{\odot} é o raio solar angular.

¹⁰ Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-86475-9_1. Acesso em 15-07-2021.

geral, por hidrogênio e hélio. A figura 5 apresenta um recorte principalmente da troposfera que aponta o intervalo onde ocorre o espalhamento Rayleigh, questão que evidencia ainda mais a necessidade de uma grande quantidade de partículas para que esse fenômeno aconteça.

Figura 5 - Camadas atmosféricas e seus constituintes



Fonte: autoria própria, 2021.

Portanto, reconhece-se que o aumento da concentração de gases poluentes na atmosfera terrestre apresenta a capacidade de definir o grau de avermelhamento presente na superfície lunar durante eclipses lunares. Isso foi especialmente consolidado no caso do eclipse lunar total de 15 de junho de 2011, quando foi perceptível, por astrônomos de diversas perspectivas no território terrestre, um comportamento esperado na porção oeste da Lua com relação à sua estrutura e a seu brilho relativo. Enquanto isso, a parte leste estava mais escura quando comparada ao seu lado oposto, evento que é explicado pela elevada atividade industrial na China, localizada exatamente no local por onde se prevê que os raios solares precisam percorrer para alcançar a superfície lunar. Assim, consolida-se que, quanto maior o número de moléculas presentes na atmosfera - como partículas provenientes do vulcanismo, aerossóis, poeira e gases poluentes -, maior a quantidade de obstáculos capazes de afetar os raios solares, de forma que sobre apenas comprimentos de onda na cor vermelha cada vez mais intensos e escuros.

Inicialmente, o processo sofrido pelos raios solares começa quando eles passam pela atmosfera, momento em que se dá a refração, fenômeno que leva a luz a ser propagada por uma área maior do que a ocupada anteriormente. Logo depois, ocorre a extinção, que pode ser dividida entre o espalhamento e a absorção dessas ondas. Neste artigo, há um foco no processo do espalhamento Rayleigh, que afeta partículas muito menores do que o comprimento de onda da luz, quadro em que se encaixa a maioria dos gases. Como instrumento para comprovar tal premissa, construiu-se um quadro composto pelos diâmetros cinéticos (calculados a partir da probabilidade da molécula colidir com outra para reconhecer o espaço que ocupa com sua estrutura e seu movimento) de alguns dos gases poluentes que apresentam crescente aumento de concentração na atmosfera terrestre nas últimas décadas. Veja o quadro 1 abaixo:

Quadro 1 - Diâmetros cinéticos de gases poluentes

Molécula		Diâmetro cinético (pm)
Metano	CH ₄	380
Monóxido de carbono	CO	376
Óxido nítrico	NO	317
Ácido sulfídrico	H ₂ S	360
Ácido clorídrico	HCl	320
Dióxido de carbono	CO ₂	330
Dióxido de enxofre	SO ₂	360

Fonte: autoria própria, 2021.

Considerando que, neste artigo, são analisadas as implicações das ondas emitidas pelos raios solares dentro do espectro visível (com comprimentos de onda variando entre 400 e 700 nm) e que $1\text{pm} = 10^{-3}\text{nm}$, comprova-se que os raios que impactam tais moléculas são afetados primordialmente pelo espalhamento Rayleigh. Isso é visível pela diferença entre os tamanhos de ambos os elementos presentes, pré-requisito desse tipo de espalhamento.

3.3. A FÍSICA DO AVERMELHAMENTO DA LUA

Quando a luz se propaga, ela pode se comportar de duas maneiras - uma como partícula e outra como onda. A primeira permite que a luz seja quantificada por meio de pacotes de energia (fótons) e a segunda permite o estudo de comprimento de onda, frequência, entre outros conceitos (Martins, 2006). Assim, o comportamento dual da luz é importante para compreender os fenômenos ópticos sofridos pela mesma.

Quando a luz solar incide nas moléculas dos gases atmosféricos, ela faz com que os elétrons dessas moléculas oscilem. Essas cargas elétricas oscilantes absorvem e, rapidamente, emitem a luz em todas as direções, o que é classificado como fenômeno de espalhamento da luz. Tal fenômeno depende, essencialmente, do comprimento de onda da luz incidente, do tamanho da partícula espalhadora e das propriedades ópticas da mesma.

A formulação mais simples de espalhamento evidencia a interação da radiação solar com as moléculas e foi desenvolvida por Lord Rayleigh - um físico britânico -, em 1871. Em seu modelo, Rayleigh considerou que as dimensões lineares das partículas espalhadoras são muito menores que o comprimento de onda da luz incidente (partículas com raio menor que 0.1λ), considerando-a exposta à radiação eletromagnética como um dipolo oscilante. Assim, nesse espalhamento, os fótons¹¹ interagem com as moléculas de raios bem menores que o comprimento de onda da luz incidente e são reemitidos igualmente em todas as direções, sem que haja alteração da energia (espalhamento elástico¹²), como o espalhamento da luz visível por moléculas de gases atmosféricos. Veja a representação do espalhamento Rayleigh na figura 6.

¹¹ Vale ressaltar que, apesar do uso do termo "fóton", a teoria de dispersão de Rayleigh foi desenvolvida antes do da mecânica quântica; portanto, não se baseia, essencialmente, na teoria moderna da interação da luz com a matéria.

¹² O espalhamento é elástico quando a luz espalhada possui a mesma frequência (energia) da luz incidente, como é o caso do espalhamento Rayleigh.

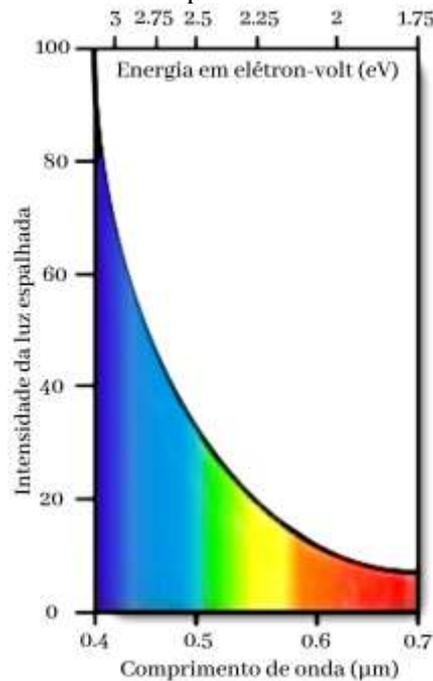
Figura 6 - O espalhamento Rayleigh quando a radiação solar interage com os aerossóis



Fonte: Riquelme, 2015 (adaptado).

Adicionalmente, a teoria de dispersão de Rayleigh envolve o comprimento de onda, de modo que a intensidade da luz espalhada pelos gases é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda da luz incidente ($E_{\lambda_s} \sim 1/\lambda^4$). Ou seja, o espalhamento Rayleigh acontece em todo o espectro visível (entre 390 nm a 780 nm), mas é mais intenso para os menores comprimentos de onda - próximos ao azul -, conforme o gráfico da figura 7.

Figura 7 - Intensidade da luz espalhada versus o comprimento de onda



Fonte: autoria própria, 2021.

Equacionando, tem-se que a intensidade I da luz dispersada por uma pequena partícula em um feixe de luz de comprimento de onda λ e intensidade I_0 é dada por:

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6$$

onde R é a distância à partícula, θ é o ângulo de dispersão, n é o índice de refração da partícula e d é o diâmetro da partícula.

O avermelhamento da Lua durante os eclipses lunares resulta do espalhamento da luz por moléculas da atmosfera terrestre, o que é explicado pelo espalhamento Rayleigh (ou molecular). Conforme mencionado anteriormente, a luz na extremidade azul do espectro visível é muito mais espalhada do que a luz na extremidade vermelha do espectro. Como $\lambda_{\text{azul}} = 1.8 \lambda_{\text{vermelho}}$, a componente azul do espectro solar é espalhada, aproximadamente, 10 vezes mais intensamente que a componente vermelha. Ao considerar a configuração de um eclipse lunar, sabe-se que a Lua não desaparece completamente na sombra da Terra - mesmo durante um eclipse total -, uma vez que a luz solar chega à superfície terrestre quase tangencialmente, fazendo com que a radiação solar seja refratada e espalhada na atmosfera e desvie apenas certos comprimentos de onda para a região da umbra, iluminando a Lua com um tom alaranjado ou avermelhado.

Tal fenômeno ocorre devido ao ângulo de incidência dos raios solares, que chegam à Terra quase tangencialmente, fazendo com que estes percorram uma distância mais longa (maior caminho óptico) através de partículas e gases em suspensão. Desse modo, como a luz atravessa uma espessura muito grande de ar, a componente azul é tão espalhada que sobram apenas as componentes de menor comprimento de onda (faixa do vermelho), propagando-se ao longo da mesma direção - rumo à umbra -, o que justifica a coloração avermelhada que a Lua adquire durante os eclipses.

O fenômeno do avermelhamento da Lua é especialmente visível quando se tem a presença de gases e partículas poluentes em suspensão na atmosfera terrestre, uma vez que estes intensificam a dispersão de Rayleigh. Logo, quanto mais poluição atmosférica, maior será a intensidade e o grau de avermelhamento do eclipse lunar, como será demonstrado na seção de *Resultados e Discussões*.

3.4. O TRABALHO DE ANDRÉ-LOUIS DANJON

Uma série de métodos já foram criados com o fim de auxiliar o ser humano a caracterizar o estudo de eclipses lunares. Entre eles, encontra-se o de André-Louis Danjon, publicado em 1921 e reconhecido por sua inovadora abordagem. Nela, Danjon apoia observações a olho nu da cor e do brilho que podem ser identificados como presentes na superfície da Lua por um observador na Terra. Ela é apenas empregada em eclipses totais, uma vez que eles apresentam o avermelhamento ideal para a análise sugerida, que se baseia na divisão da luminosidade (L) em 5 possibilidades que variam de acordo com as condições, por exemplo, de posicionamento do astro e, como é dado suporte neste artigo, na concentração de gases opticamente ativos na atmosfera terrestre. Essa separação é feita da seguinte forma:

- $L=0$: eclipses com esse nível de luminosidade são tipicamente muito escuros. É difícil identificar a Lua no céu, ela fica quase invisível, especialmente na metade total. A atmosfera terrestre contém alta concentração de partículas opticamente ativas pelo espalhamento Rayleigh, neste extremo da escala;
- $L=1$: eclipse escuro, mas a Lua pode surgir com bordas marrons ou cinzentas, bem escuras. Torna-se difícil identificar os traços marcantes da Lua, detalhes distinguíveis apenas com dificuldade;

- L=2: a Lua surge com tom de vermelho intenso, ou ferrugem. A umbra central é muito escura, enquanto a borda externa da umbra é relativamente brilhante e pode mostrar traços mais claros.
- L=3: esse nível de luminosidade caracteriza-se por uma Lua vermelho-tijolo, com um brilho perceptível, possivelmente amarelado, na borda da umbra.
- L=4: eclipses nesse extremo da escala exibem uma cor vermelho cobre ou alaranjada brilhante. As bordas umbrais são extremamente brilhantes, com um tom azulado. Os eclipses desse nível surgem em situações de baixa concentração de partículas opticamente ativas pelo espalhamento Rayleigh.

Figura 8 - O que é um eclipse de "Lua de Sangue"?



Fonte: Todo Diarios del Valle de Uco, 2021.¹³

4. METODOLOGIA

Esse artigo foi produzido durante o período da pandemia causado pelo vírus SARS-CoV-2. Tal fator é importante, pois esse evento impôs limitações, principalmente por impor o modo virtual a todo o processo de elaboração do artigo. Além deste estudo conter análises empíricas de fenômenos que promovem o avermelhamento da Lua durante eclipses lunares totais, ele também apresenta uma revisão bibliográfica com informações importantes para o entendimento da forma como certas atividades ópticas afetam a percepção humana sobre a natureza.

A classificação deste artigo pode ser feita sob diversos aspectos. Primeiramente, pode-se identificar que a pesquisa apresenta uma natureza aplicada, visto que ela traz para a realidade concreta conceitos ópticos a partir de uma análise empírica de um fenômeno natural recorrente. Além disso, a pesquisa inclui objetivos exploratórios e explicativos, uma vez que ela apresenta o caráter inovador de buscar uma união entre a variação na coloração dos eclipses lunares, a dispersão Rayleigh e a poluição atmosférica, de forma que tal conceito físico explique as variações visíveis na superfície lunar, impulsionadas pela mudança na taxa de liberação de gases poluentes pelos seres humanos na atmosfera. Quanto à abordagem do problema, apresenta um caráter qualitativo, tendo em vista que a efetuação de medições com alto nível de precisão não foram possíveis durante a pesquisa. Considerando os procedimentos técnicos utilizados, reconhece-se que a pesquisa feita é bibliográfica (teórica) e experimental.

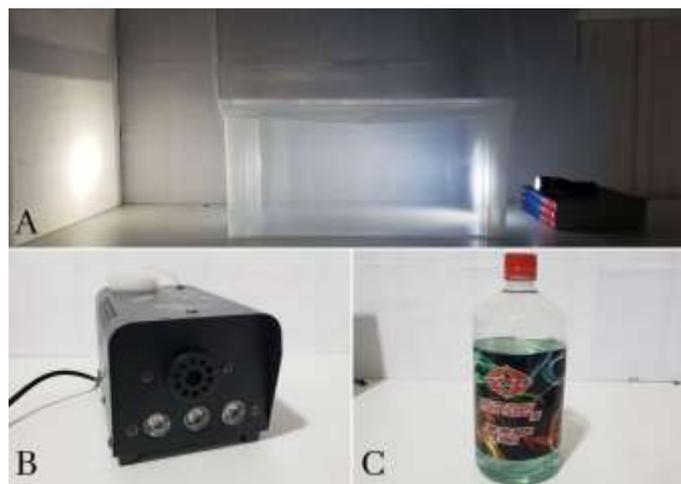
¹³ Disponível em <http://tdvalledeuco.com/629047>. Acesso em 20-08-2021.

4.1. PARTE EXPERIMENTAL

Nesta parte será apresentado o procedimento de montagem de um experimento óptico elaborado com o intuito de demonstrar o fenômeno de dispersão de Rayleigh, que produz o espalhamento da luz na atmosfera terrestre, envolvido no fenômeno do avermelhamento da Lua. Os materiais utilizados foram:

- Anteparo branco;
- Mesa ou bancada;
- Caixa retangular de plástico incolor de 65L;
- Lanterna branca de LED;
- Livros para suporte da lanterna na horizontal;
- Máquina de fumaça com potência de 600W;
- Fluido para máquina de fumaça composto por água desmineralizada, aromatizantes corantes e álcoois polifuncionais;
- Câmera de celular.

Figura 9 - Materiais. (a) Esquema de montagem. (b) Máquina de fumaça. (c) Fluido para máquina de fumaça.



Fonte: autoria própria, 2021.

O experimento foi realizado em um cômodo escuro, pois é necessário ter pouca luz para melhor visualização do efeito. Inicialmente, a máquina de fumaça foi preparada com o fluido específico e, em seguida, a lanterna foi posicionada à meia altura da caixa, com um suporte de livros. Um anteparo branco de madeira foi utilizado para a projeção da luz transmitida. Veja o esquema de montagem na Figura 9a.

Após o posicionamento adequado, foi observado o comportamento da luz apenas no ar, meio homogêneo e transparente, onde a luz praticamente não sofre espalhamento.

Em seguida, um pouco de fumaça foi liberado e vedado dentro da caixa. O mesmo procedimento foi repetido 2 vezes com um aumento progressivo das concentrações de fumaça para gerar um maior espalhamento (o que será analisado na seção de *Resultados e Discussões*), uma vez que as moléculas da fumaça representam as partículas da atmosfera responsáveis pela dispersão da luz.

Com a repetição do procedimento e o aumento da concentração de fumaça, novas imagens foram capturadas por uma câmera de celular. As capturas foram feitas perpendicularmente à direção de incidência do feixe da lanterna e foram utilizadas para método de análise comparativa do avermelhamento da luz projetada no anteparo - como consequência da dispersão de Rayleigh. Observou-se que quanto mais fumaça presente na caixa, maior o avermelhamento da luz projetada no anteparo, ou seja, maior a dispersão sofrida pela luz.

Nesse experimento, a caixa transparente preenchida apenas com ar representa a atmosfera terrestre sem ou com baixa poluição, a caixa com fumaça simula a atmosfera com poluentes em suspensão e a fonte de luz branca (lanterna), o Sol.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após feita a montagem do experimento, foi analisado o comportamento óptico da luz, ao atravessar apenas o ar (meio homogêneo e transparente), que representa a atmosfera terrestre em condições de nenhuma ou baixa poluição. Observou-se que, nesse caso, a luz praticamente não sofre espalhamento (figura 10a).

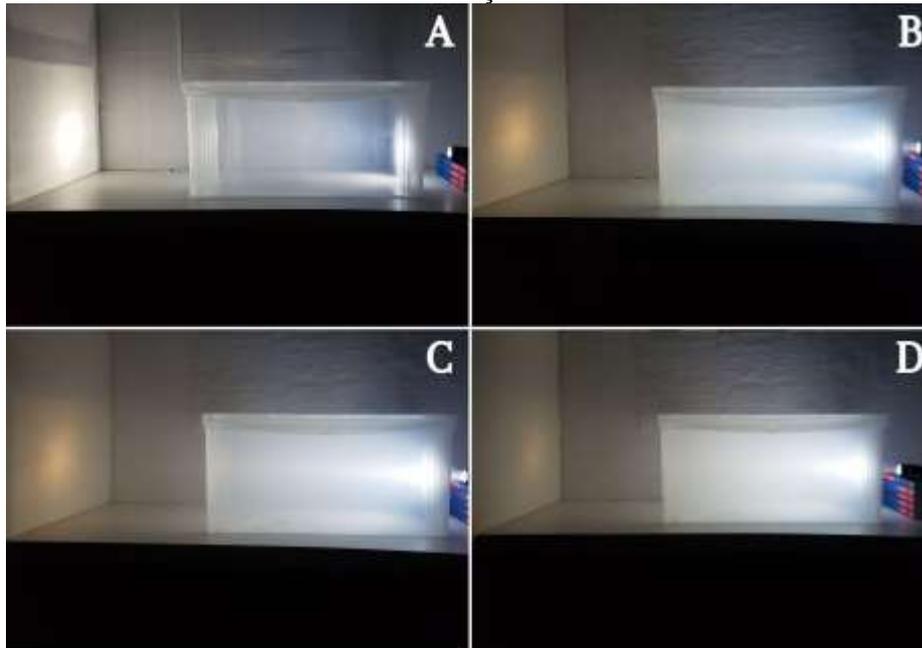
Para demonstrar a dispersão de Rayleigh, é colocado um pouco de fumaça dentro da caixa e, então, observa-se que a luz passa a ser espalhada. Verifica-se que a luz transmitida através da caixa e que incide no anteparo possui um tom alaranjado (figura 10b), o que significa que as componentes de menores comprimentos de onda (próximas ao violeta e ao azul) foram retiradas, o que prova a ocorrência do espalhamento de Rayleigh. Esse caso representa a atmosfera com a presença de gases poluentes.

Em seguida, mais um pouco de fumaça é liberado dentro do recipiente, o que faz com que a luz projetada no anteparo torne-se levemente mais alaranjada - como pode ser visto na figura 10c. Isso ocorre, pois a luz, depois de percorrer toda a cuba (uma camada grande de fumaça), já teve a luz azul toda espalhada, sobrando apenas a luz com o comprimento de onda maior - na faixa do vermelho. Nesse cenário, a atmosfera terrestre teria uma considerável quantidade de poluentes em suspensão.

Por fim, repetindo o processo anterior, é adicionada uma grande concentração de fumaça, que representa a atmosfera com uma alta quantidade de poluentes. Percebe-se agora uma maior intensidade no espalhamento da luz branca e uma luz mais avermelhada projetada no anteparo. Adicionalmente, observa-se que o raio da projeção da luz do anteparo diminui; isso ocorre, pois a concentração de fumaça já está tão elevada, que as partículas passam a absorver a luz cada vez mais. Tal cenário pode ser observado na figura 10c.

Portanto, ao adicionar mais fumaça (centros espalhadores) ao meio de análise (atmosfera), nota-se o avermelhamento da luz devido ao espalhamento dos comprimentos de onda menores (faixa do azul) pelas partículas da fumaça, de forma que sobram apenas os comprimentos de onda maiores (faixa do vermelho). Dessa forma, um cenário extremamente poluído resultaria na absorção da luz cada vez mais intensa.

Figura 10 - Dispersão Rayleigh observada em anteparo. (a) Ar. (b) Baixa concentração de fumaça. (c) Média concentração de fumaça. (d) Alta concentração de fumaça.



Fonte: autoria própria, 2021.

5.2. LIMITAÇÕES

Como dito, a presente pesquisa foi realizada em um contexto pandêmico, no ano de 2021. Por essa razão, uma das dificuldades enfrentadas foi a disponibilidade de recursos experimentais de forma geral, uma vez que a pandemia impossibilitou o acesso a laboratórios, o que levou à necessidade de fazer ciência em casa.

A ideia original de experimentação envolvia o uso de diferentes gases poluentes que seriam colocados em uma cuba hermética e iluminados por uma fonte de luz branca, para que fosse feita uma análise quantitativa - com o uso de um espectrômetro - a respeito das diferenças no espalhamento da luz que cada gás exerce e como suas concentrações influenciam no fenômeno.

Como o acesso a um ambiente laboratorial controlado e aos equipamentos necessários não foi possível, o experimento foi reformulado e adaptado para que pudesse ser realizado em casa. Desse modo, não houve a realização de uma análise quantitativa com dados estatísticos exatos. Entretanto, foi implementada uma análise qualitativa, com base nas observações imagéticas capturadas, o que foi capaz de gerar resultados satisfatórios a respeito do fenômeno óptico estudado (espalhamento Rayleigh).

Também não foi possível realizar um estudo específico de como diferentes gases e outros poluentes atuam no espalhamento da luz na atmosfera. Como contraponto, a improvisação do novo experimento - com o uso de fumaça - foi capaz de simular o cenário atmosférico discutido na pesquisa, provar a ocorrência da dispersão de Rayleigh no fenômeno do avermelhamento da Lua com métodos mais acessíveis e demonstrar, de maneira aplicada, como tal espalhamento ocorre.

6. CONCLUSÕES

Foi possível explicar o fenômeno físico responsável pelo avermelhamento da Lua durante os eclipses lunares e evidenciar a importância da escala de Danjon como ferramenta ambiental - uma vez que é possível inferir os níveis de poluição atmosférica em uma localidade, com base na classificação de coloração da Lua. A partir de um estudo teórico, provou-se que o avermelhamento da Lua durante os eclipses lunares ocorre devido ao ângulo de incidência dos raios solares - que chegam à Terra quase tangencialmente -, mas resulta também das condições da atmosfera terrestre.

A pesquisa gerou conclusões primariamente qualitativas, por falta de maior estofo experimental. Contudo, a observação experimental de como a poluição atmosférica interfere na coloração da Lua foi bem marcante. Constata-se isso, uma vez que os resultados obtidos estão bem de acordo com a teoria de dispersão de Rayleigh - a qual afirma que a intensidade da luz espalhada pelos gases é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda da luz incidente -, pois a componente azul, que possui menor comprimento de onda, foi mais espalhada do que a vermelha. Adicionalmente, o experimento sugeriu que a maior quantidade de gases poluentes na atmosfera terrestre resulta em uma maior concentração de partículas espalhadoras geradoras da dispersão de Rayleigh. Ou seja, a poluição atmosférica, causada especialmente pela ação antrópica, potencializa o avermelhamento da Lua, visto que mais moléculas em suspensão irão espalhar mais os comprimentos de onda menores (na faixa do azul), restando apenas as componentes de menor comprimento de onda (faixa do vermelho) em direção à umbra.

REFERÊNCIAS

- Hernitschek, N., Schmidt, E., & Vollmer, M. (2008, August 29). *Lunar Eclipse Photometry: Absolute Luminance measurements and modeling*. Applied Optics. Acessado em Outubro, 2021, <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-47-34-H62>.
- Ugolnikov, O. S., Maslov, I. A., & Korotkiy, S. A. (2011, October 16). *Lunar Eclipse of June, 15, 2011: Three-color umbra surface photometry*. arXiv.org. Acessado em Outubro, 2021, <https://arxiv.org/abs/1106.6178>.
- Costa, Santos, Guidini, & Catunda, T. (1970, January 1). *Demonstrações Investigativas sobre circuitos elétricos*. Física na Escola. Acessado em Outubro, 2021, http://www.dca.iag.usp.br/material/akemi/fisicaII/apostila_cap_05.pdf.
- Oliveira, D. C. F. dos S., & Montilla-Rosero, E. (2016). *Caracterização e classificação das propriedades ópticas de aerossóis na atmosfera de Natal, Brasil*. Acessado em Outubro, 2021, <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/37162/2/Caracterização%20e%20classificação%20Monografia.pdf>.
- Link F. (1969) Lunar Eclipses. In: Eclipse Phenomena in Astronomy. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-86475-9_1.

Magazine, S. (Janeiro, 2016). *Air pollution goes back way further than you think*. Smithsonian.com. Acessado em Outubro, 2021, <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/air-pollution-goes-back-way-further-you-think-180957716/>.

Stothers, Richard B. “Stratospheric Transparency Derived from Total Lunar Eclipse Colors, 1801–1881.” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 117, no. 838, [The University of Chicago Press, Astronomical Society of the Pacific], 2005, pp. 1445–50. Acessado em Outubro, 2021, <https://doi.org/10.1086/497016>.

Recebido para publicação em 10-10-21; aceito em 22-10-21