

CÁLCULO DO VALOR DA UNIDADE ASTRONÔMICA: COMO O TRÂNSITO DE MERCÚRIO NOS INDICA A NOSSA DISTÂNCIA AO SOL

 *Alessandro Martins*¹
 *Thiago Oliveira Lima*²
 *Maurício José Alves Bolzan*³
 *Phablo de Araujo Sousa*⁴
 *Valdinei Bueno Lima Filho*⁵
 *Alexandre Pancotti*⁶
 *João Carlos de Moura Castro Neto*⁷

Resumo: Apresentamos uma proposta simplificada de determinação da Unidade Astronômica (UA) através de dados experimentais obtidos pelo registro do trânsito de Mercúrio em frente ao Sol, de fácil desenvolvimento junto a estudantes da última fase da educação básica. O registro do trânsito foi realizado durante uma sessão de observação astronômica realizada em uma escola brasileira e, também, em cooperação com uma instituição internacional. Esta atividade mostrou que, apesar da pouca distância entre os dois locais de observação, em relação ao planeta Terra, o registro do trânsito de Mercúrio de 2019 permitiu determinar o valor da UA com uma boa aproximação. Os trânsitos de planetas possuem importância didático-pedagógica, podendo ser utilizados por educadores na educação formal como elemento motivador. A atividade permite conhecer e aplicar dados experimentais, desenvolver conhecimentos como construções geométricas, trigonometria, razões e proporções, as Leis de Kepler do movimento planetário, coordenadas geográficas e geoposicionamento, demonstrando interdisciplinaridade junto aos estudantes.

Palavras-chave: Trânsito Planetário; Mercúrio; Unidade Astronômica, Sol; Ensino de Astronomia.

CÁLCULO DEL VALOR DE LA UNIDAD ASTRONÓMICA: CÓMO EL TRÂNSITO DE MERCURIO INDICA NUESTRA DISTANCIA AL SOL

Resumen: Presentamos una propuesta simplificada para determinar la Unidad Astronómica (UA), a través de datos experimentales obtenidos de una actividad astronómica de observación del tránsito de Mercurio, fácil de desarrollar con estudiantes del último ciclo de la educación básica. Los datos experimentales se obtuvieron mediante la actividad de observación realizada en una escuela brasileña y en cooperación con una institución internacional. A pesar de la corta distancia entre los dos sitios de observación en relación con el planeta Tierra, el registro de tránsito de Mercurio de 2019 permitió determinar el valor de la UA con una buena aproximación. Los tránsitos de planetas en órbita más cercanos al Sol tienen importancia didáctico-pedagógica. La actividad permite conocer y aplicar datos experimentales, desarrollando conocimientos como construcciones geométricas, trigonometría y proporciones, las leyes de Kepler del movimiento planetario, coordenadas geográficas y geolocalización, conceptos que demuestran que la actividad permite la interdisciplinariedad con los estudiantes.

Palabras clave: Tránsito Planetario; Mercurio; Unidad Astronómica; Sol; Enseñanza de Astronomía.

¹ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: alexm@ufg.br.

² Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: thiagojti@ufg.br.

³ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: mauricio_bolzam@ufg.br.

⁴ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: phablo.rms@gmail.com.

⁵ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: vbfhantaro@hotmail.com.

⁶ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: apancotti@gmail.com.

⁷ Universidade Federal de Jataí (UFJ), Jataí, Brasil. E-mail: jc.neto963@gmail.com.

CALCULATING THE VALUE OF THE ASTRONOMICAL UNIT: HOW THE TRANSIT OF MERCURY INDICATES OUR DISTANCE TO THE SUN

Abstract: We present a simplified proposal to determine the Astronomical Unit (AU) through the experimental data obtained from astronomical observation of the transit of Mercury. The data were obtained by the observation activity carried out in a Brazilian school and in cooperation with an international institution. This activity showed that despite the short distance between the two observation sites in relation to planet Earth, the 2019 Mercury transit record made it possible to determine the value of the AU with a good approximation. The transits of planets in orbit closer to the Sun have a certain didactic-pedagogical importance. The activity allows knowing and applying experimental data, developing knowledge such as geometric constructions, trigonometry, ratios and proportions, Kepler's laws, geographic coordinates and geolocation, concepts that demonstrate that the activity allows interdisciplinarity with students.

Keywords: Planetary Transits; Mercury Planet; Astronomical Unit; Sun; Learning of Astronomy.

1 Introdução

Nos últimos anos, tem se verificado o importante trabalho de educadores na atenção a projetos educacionais intimamente correlacionados ao processo de descobertas científicas, projetos esses que demonstram a importância da necessidade de colaboração entre escolas, universidades e institutos tecnológicos no Brasil e no mundo, com o objetivo de contribuir com a melhoria da formação científica, em especial da Astronomia (Lyra *et al.*, 2020). Como exemplo dessas atividades, temos o registro de fenômenos astronômicos, como o trânsito de planetas em órbita mais próxima do Sol (Mercúrio e Vênus), muito importante para a pesquisa científica e para a divulgação científica nas escolas. Essas atividades podem ser realizadas simultaneamente em diversos lugares no país, e no mundo, através da comparação e obtenção de resultados em função do posicionamento geográfico local. Isso contribui fortemente para o ensino de ciências junto aos estudantes de diferentes níveis educacionais. É necessário, porém, que estas atividades de observação sejam realizadas em conjunto com os professores das escolas, para que o conhecimento adquirido possa ser debatido e avaliado posteriormente (Costa Júnior *et al.*, 2018).

Vários assuntos de Astronomia podem ser explorados em uma atividade extraclasse, os quais contribuem para a solidificação de importantes conceitos. Um destes assuntos refere-se à determinação do valor da Unidade Astronômica (UA). Essa unidade de comprimento equivale, aproximadamente, a distância média Terra-Sol, a qual é utilizada como padrão de distância no nosso Sistema Solar (IAU 2020). Segundo estudos do astrônomo alemão Johannes Kepler, realizados no século XVII, as órbitas de todos os planetas são elípticas (circunferências levemente achatadas) e, por essa razão, utiliza-se distâncias médias entre o Sol e os planetas. A Unidade Astronômica é a referência básica para determinar o tamanho do nosso Sistema Solar e, portanto, a base do nosso conhecimento sobre o tamanho do Universo (Backhaus, 2019). A partir de 1976, a definição da UA teve como base a terceira lei do movimento planetário de Kepler e conceitos da gravitação newtoniana, sendo deduzida como o semieixo maior de uma órbita, em torno do Sol (massa M), de um corpo de massa ($m \ll M$) cujo período orbital é de 365.2568983 dias (conhecido como ano sideral) (Stix, 1991). Como esta definição possui certa limitação, como a dependência da massa do Sol, que está sempre diminuindo (conversão de massa em energia), e a ausência de efeitos previstos pela

Teoria Geral da Relatividade, a Unidade Astronômica tornou-se uma unidade variável no tempo (Brumfiel, 2020). Em 2012, a União Astronômica Internacional (IAU do inglês: International Astronomical Union) decidiu fixar o valor de *UA* como $1,495\,978\,707\,00 \times 10^{11}$ m (Luzum *et al.*, 2011).

Os fenômenos de trânsito planetário em frente ao Sol são de rara ocorrência. Para o planeta Mercúrio, por estar mais próximo ao Sol, a probabilidade de trânsito é maior. Os três corpos (Terra, Mercúrio e Sol) se alinham ~ 13 vezes por século. O último alinhamento Terra-Mercúrio-Sol ocorreu em 2019 e o próximo ocorrerá em 2032 (ver Figura 1). Para que um trânsito ocorra (como o de Mercúrio), o Sol, Mercúrio e a Terra precisam alinhar-se quase que perfeitamente. As órbitas dos planetas, porém, não estão todas no mesmo plano. No caso de Mercúrio, sua órbita é inclinada cerca de 7 graus em comparação com o plano de referência do planeta Terra. Existem, portanto, apenas dois pontos (nodos) onde os dois planetas poderiam se alinhar ao Sol (as posições onde Mercúrio atravessa o plano orbital da Terra, conforme demonstrado na Figura 1(a)). A Terra alinha-se com esses pontos de interseção em maio e em novembro de determinado ano (NASA, 2012). Se Mercúrio passar por uma conjunção inferior naquele momento, ocorrerá um trânsito. Durante os trânsitos em novembro, Mercúrio está próximo do periélio e, em maio, próximo do afélio. A probabilidade de um trânsito ocorrer em maio é menor devido ao movimento orbital mais lento (menor velocidade orbital) de Mercúrio no afélio (menor probabilidade de atravessar o nodo durante o período crítico da conjunção). Quanto aos ciclos do trânsito de Mercúrio, analisando a tabela na Figura 1(b), é possível identificar que:

- Após um trânsito em maio, o trânsito em novembro ocorre fielmente 3,5 anos depois (por exemplo: 9 de maio de 2016 e 11 de novembro de 2019);

- Trânsitos de Mercúrio ocorrem quase na mesma data em ciclos de 46 anos (por exemplo: 9 de maio de 1970 e 9 de maio de 2016);

- Os trânsitos em novembro, mais comuns do que em maio, ocorrem ocasionalmente em períodos de 7 anos e mais frequentemente em períodos de 13 e 33 anos;

- Trânsitos em maio ocorrem em períodos de 13 e 33 anos. O ciclo de 46 anos é uma combinação de 13 e 33 anos ($13 + 33 = 46$);

- Um fato interessante é que durante o trânsito de 11 de novembro de 2019 o planeta Mercúrio esteve no ponto de sua órbita mais próximo do Sol, algo que não ocorria desde o trânsito de 10 de novembro de 1973 e que ocorrerá, novamente, somente em 12 de novembro de 2190. Importante observar que são 46 anos entre 1973 e 2019, e 217 anos entre 1973 e 2190. Esse intervalo de 217 anos é composto por quatro períodos de 46 anos e um de 33 anos.

Estes conceitos são fundamentais para a educação científica de alunos de todos os níveis, contribuindo fortemente com a sua formação cidadã e responsável, conforme discutido por Costa Júnior *et al.* (2018). Segundo estes autores, atividades de registro de fenômenos astronômicos podem ocasionar reações adversas ao público em geral porque um dos motivos é o baixíssimo (ou nulo) conhecimento de ciências em geral. Um dos motivos é a ausência de realização de atividades ligadas à ciência durante o período de escolarização. Isso sugere a necessidade urgente de realização de atividades relacionadas a eventos astronômicos, em conjunto com escolas em todos os níveis na

formação de futuros adultos, com um mínimo conhecimento de seu mundo. Na literatura relacionada à Astronomia, alguns trabalhos exploraram a determinação da UA através de dados obtidos pela observação de trânsitos de planetas em órbita mais próxima ao Sol. Rizzuti *et al.* (2016) realizou atividades pedagógicas com a intenção de determinar a UA a partir de dados obtidos pela reprodução de trânsitos de Vênus, usando o *software* livre de Astronomia *Stellarium* (Rizzuti *et al.*, 2016). Neste trabalho, apresentamos uma proposta simples e didática da medida da UA a partir de dados obtidos pelo registro do trânsito do planeta Mercúrio, ocorrido na data de 11 de novembro de 2019. A metodologia aqui utilizada baseou-se no trabalho de Jiménez *et al.* (2019). A observação astronômica foi realizada pelo projeto acadêmico ‘Redescobrimo a Astronomia’, vinculado à Universidade Federal de Jataí (UFJ). A atividade de registro do fenômeno astronômico se desenvolveu com a participação da comunidade da Escola Estadual Washington Barros França, localizada no município de Jataí (estado de Goiás, Brasil), e também com a participação conjunta do Planetário de Medellín, Colômbia.

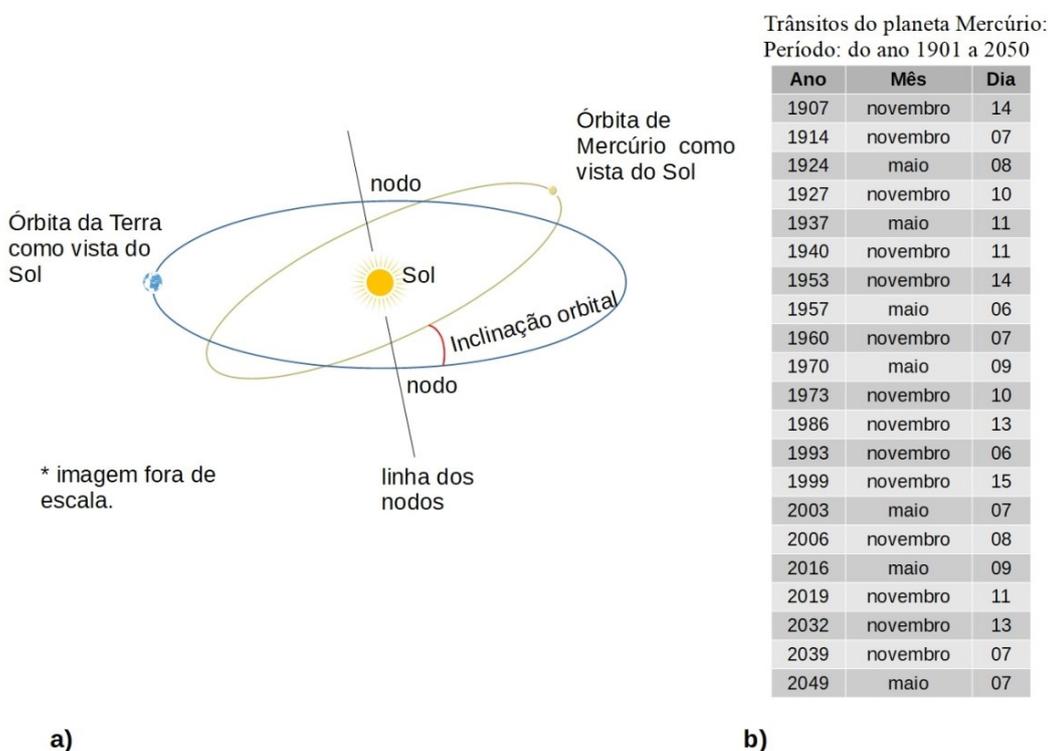


Figura 1 - (a) Representação dos planos das órbitas dos planetas Terra e Mercúrio, cujo ângulo entre os planos orbitais é igual a 7 graus. A linha-dos-nodos é definida na intersecção dos planos de duas órbitas. Registra-se um trânsito quando ambos os planetas passam simultaneamente pela chamada linha dos nodos. Como os planetas Terra, Mercúrio e o Sol não são pontos geométricos, mas corpos com uma certa extensão, o trânsito pode ocorrer mesmo que o planeta Mercúrio esteja um pouco fora da linha dos nodos, porém dentro de uma limitada margem de tolerância. (b) Tabela com a descrição temporal de alguns trânsitos do planeta Mercúrio (NASA, 2012).

2 Metodologia

O primeiro trânsito de Mercúrio foi observado em 1631, o qual foi previsto por Johannes Kepler, no século XVII. Em 1663, o matemático e astrônomo escocês James Gregory apresentou, na última parte do seu livro *Optica Promota* (Gregory, 1663), proposições sobre como determinar a distância entre o Sol e a Terra através do registro de trânsitos dos planetas Mercúrio e Vênus, medindo-se a paralaxe solar, ou seja, a diferença angular da posição aparente do Sol quando visto por observadores posicionados em diferentes locais na superfície terrestre (Matsuura, 2020). Em 1677, o jovem astrônomo Edmund Halley observou um trânsito do planeta Mercúrio (Bigas, 2019). Através dessa observação, foi possível realizar a expansão das Teorias de Gregory. Isso resultou na publicação de um método (Teets, 2003) para calcular o tamanho do Sistema Solar através de observações que poderiam ser realizadas em diferentes lugares no mundo, durante os trânsitos de Vênus, os quais ocorreriam no próximo século (Bigas, 2019). Os trânsitos do planeta Vênus seriam melhores de visualizar que os do planeta Mercúrio, pois o planeta Vênus é mais próximo do planeta Terra. Desse modo, isso permite uma determinação mais precisa. Durante décadas, Halley argumentou que observar esses trânsitos de diferentes pontos da superfície da Terra era o melhor método para determinar a distância Terra-Sol (Halley, 1716).

Suponha-se dois observadores, em locais diferentes sobre a superfície da Terra, visualizando um trânsito de Mercúrio, conforme Figura 2. O observador A, mais ao norte (acima) da esfera terrestre observa Mercúrio seguindo um caminho através do Sol. O observador B, mais ao Sul (abaixo da esfera terrestre), observa Mercúrio seguindo um caminho um pouco mais alto, mais ao norte no Sol, quando comparado com o observador A. Considerando o trânsito fotografado pelos dois observadores exatamente no mesmo instante, em um momento em específico, as duas imagens obtidas quando sobrepostas permitem encontrar uma separação angular β entre os centros da sombra de Mercúrio (Figura 2).

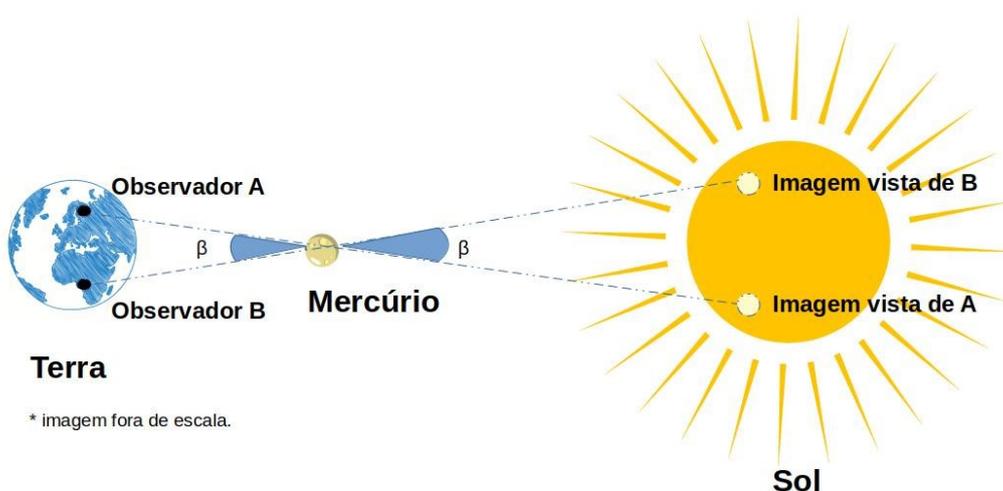


Figura 2 - Trânsito do planeta Mercúrio, observado por diferentes observadores sobre a superfície terrestre.



Figura 3 - Posição geográfica das cidades de Jataí (Brasil) e Medellín (Colômbia) em relação à América do Sul e parte do Caribe.

Baseado no conhecimento anteriormente mencionado, foi escolhido o Planetário de Medellín, Colômbia, para a construção da matemática e, posteriormente, o cálculo da Unidade Astronômica (UA). A cidade de Jataí está localizada na região centro-oeste do Brasil cujas coordenadas geográficas são as seguintes: latitude de $17^{\circ} 52' 33''$ Sul e longitude de $51^{\circ} 43' 17''$ Oeste. O Planetário de Medellín situa-se na Colômbia e possui as seguintes coordenadas: latitude de $6^{\circ} 15' 6''$ Norte e longitude de $75^{\circ} 33' 49''$ Oeste. Note que, embora ambas as cidades (Medellín e Jataí) estejam pouco distantes em relação ao planeta Terra, já é o suficiente para a obtenção da paralaxe, conforme é mostrado na Figura 3.

2.1 Teoria - Como Encontrar o Valor da Unidade Astronômica (UA)

Para o cálculo de UA, além da determinação do valor do ângulo β , precisamos também encontrar o valor da distância entre os dois observadores na Terra, nos pontos A e B (d_{AB}). A distância entre os dois pontos de observação A e B, ou seja, a distância d_{AB} , não é a distância na superfície da Terra, que, nesse caso, seria o comprimento do arco que une ambos observadores, mas a distância média linear entre elas, e perpendicular à linha Terra-Sol. Na Figura 4, R é o raio equatorial da Terra, D o comprimento do arco A-B, cujo valor de $D = (3752 \pm 17) \times 10^3$ m (metros) foi obtido

com o auxílio da plataforma *Google Earth* (Google, 2001). Estabelecendo proporções entre comprimentos e ângulos na circunferência, temos:

$$\frac{D}{2\pi R} = \frac{\alpha}{2\pi}, \text{ onde } \alpha = \frac{D}{R} \text{ (em radianos)}. \quad (1)$$

Aplicando a lei dos cossenos, podemos obter:

$$d_{AB}^2 = 2R^2 - 2R^2 \cos \alpha \text{ ou } d_{AB} = R \sqrt{2 - 2 \cos \frac{D}{R}}. \quad (2)$$

Na obtenção de dados e cálculos realizados, recorremos à Estatística para a obtenção do melhor valor possível. Os parâmetros estatísticos associados a um conjunto de N medidas obtidas da repetição de um mesmo mensurável permite determinar um valor médio de um conjunto dessas N medidas, bem como o desvio padrão que serve para indicar a incerteza da média. Para a determinação das incertezas nos cálculos, usamos as Regras de Propagação de Incertezas, ou propagação de erros (Vuolo, 1996).

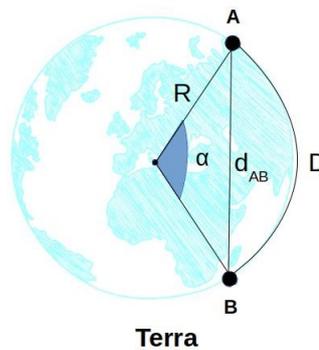


Figura 4 - Distância média d_{AB} entre dois observadores na superfície terrestre.

Pelos valores de $R = (6,378 \times 10^6 \pm 0,1)$ m, obtidos de Luzum *et al.* (2011), $D = (3752 \pm 17) \times 10^3$ m (Google, 2001), aplicados na equação (2) temos:

$$d_{AB} = (3719 \pm 1) \times 10^3 \text{ m.}$$

Neste trabalho, consideramos, por aproximação, a distância d_{AB} entre dois observadores posicionados em locais distintos na Terra como a projeção perpendicular à linha Terra-Sol. Analisando a Figura 5, encontramos que:

$$\tan \frac{1}{2} \beta = \frac{\frac{1}{2} d_{AB}}{d_{Terra-Mercúrio}} \quad (3)$$

em que, para ângulos muito pequenos, $\tan \frac{1}{2} \theta = \frac{1}{2} \tan \theta$. Assim:

$$d_{Terra-Mercúrio} = \frac{d_{AB}}{\tan \beta} \quad (4)$$

sendo que $d_{Terra-Mercúrio}$ representa a distância média entre os planetas Terra e Mercúrio.

A Terceira Lei de Kepler indica que o quadrado do período de revolução (T) de cada planeta é proporcional ao cubo do raio médio de sua órbita (d_r) (Sears *et al.*, 2008), ou seja:

$$\frac{T^2}{d_r^3} = \kappa \quad (5)$$

em que κ é uma constante, uma aproximação que depende da massa do Sol (M) e da massa do planeta (m), sendo que a aproximação $m \ll M$ é válida para sistemas planetários. Para os planetas do Sistema Solar, κ possui aproximadamente o mesmo valor, permitindo que se estabeleça a seguinte relação:

$$\frac{T_{\text{Mercúrio-Sol}}^2}{d_{\text{Mercúrio-Sol}}^3} = \frac{T_{\text{Terra-Sol}}^2}{d_{\text{Terra-Sol}}^3}. \quad (6)$$

Aplicando os valores de $T_{\text{Mercúrio-Sol}} = 88$ dias terrestres e $T_{\text{Terra-Sol}} = 365,2$ dias terrestres na equação (6), temos:

$$d_{\text{Mercúrio-Sol}} = 0,39 \times d_{\text{Terra-Sol}} \quad (7)$$

ou seja, a distância de Mercúrio-Sol é 0,39 vezes a distância Terra-Sol.

Para o sistema Terra, Mercúrio e Sol alinhados, temos que $d_{\text{Terra-Mercúrio}} = d_{\text{Terra-Sol}} - d_{\text{Mercúrio-Sol}}$ e, aplicando a equação (7), obtemos:

$$\begin{aligned} d_{\text{Terra-Mercúrio}} &= d_{\text{Terra-Sol}} - 0,39 \times d_{\text{Terra-Sol}} \\ d_{\text{Terra-Mercúrio}} &= 0,61 \times d_{\text{Terra-Sol}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Combinando as equações (4) e (8), temos:

$$1UA \cong d_{\text{Terra-Sol}} = \frac{d_{AB}}{0,61 \times \tan \beta}. \quad (9)$$

Assim, pela equação (9), podemos definir a Unidade Astronômica como aproximadamente o valor da distância média Terra-Sol (IAU, 2020).

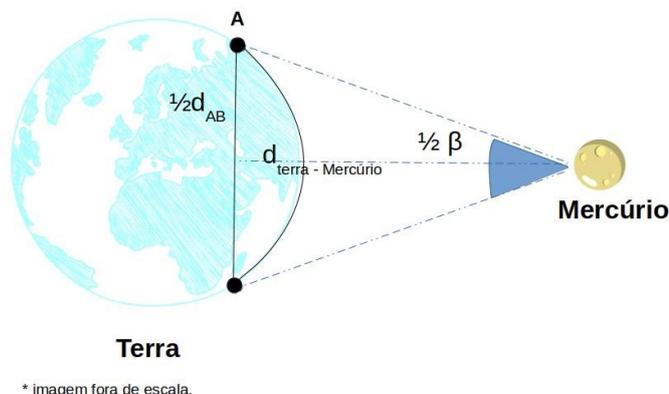


Figura 5 - Triângulo retângulo formado no alinhamento do sistema Terra-Mercúrio.

3 Resultados Experimentais

Um trabalho de colaboração entre pesquisadores brasileiros (Universidade Federal de Jataí) e colombianos (Planetário de Medellín) permitiu, coletivamente, registrar o evento do trânsito do planeta Mercúrio no ano de 2019, conforme mostrado na Figura 6. Esse registro ocorreu na cidade de Jataí, GO, Brasil. Este tipo de observação astronômica requer cuidados especiais, pois a observação direta do Sol, sem proteção, provoca lesões oftalmológicas graves, como, por exemplo, a cegueira. Desse modo, para realizar as observações com os telescópios, utiliza-se filtros específicos, os quais barram a parte nociva da luz solar incidente. Geralmente, esse filtro é instalado na abertura de entrada de luz, conforme montagem descrita na Figura 6a. A atividade de observação e registro do trânsito do planeta Mercúrio, realizada em Jataí (Brasil), foi desenvolvida conjuntamente com a comunidade da Escola Estadual Washington Barros. O objetivo dessa atividade foi realizar a divulgação científica, junto à comunidade escolar, bem como o fortalecimento da interação entre Universidade e escola, demonstrando o importante papel da universidade na socialização do conhecimento. Durante o evento, foram apresentadas palestras sobre a formação e estrutura do Sistema Solar, as características do planeta Mercúrio, além de pesquisas científicas sobre o que são e como são detectados os Exoplanetas.

A determinação do valor da UA foi alcançada pela equipe do projeto Redescobrimo a Astronomia (UFJ) após a extração dos dados experimentais obtidos, aplicando-se a teoria descrita neste trabalho. Salientamos que a comunidade escolar, no primeiro momento, apenas participou da atividade de observação do fenômeno do trânsito de Mercúrio.



Figura 6 - a) Montagem do filtro solar para permitir a segurança de observação. b) Atividade de observação astronômica (registro do trânsito do planeta Mercúrio, realizada em 11 de novembro de 2019), desenvolvida junto à comunidade escolar no município de Jataí, GO, Brasil.

A medida da paralaxe solar foi obtida com registros simultâneos na cidade de Jataí, Brasil e em Medellín, Colômbia. A Figura 6 mostra as imagens do trânsito do planeta Mercúrio em frente ao disco solar obtidas pelo Planetário de Medellín (Colômbia). Durante o trânsito, o planeta apenas tapa a luz solar na nossa direção, aparecendo como um pequeno disco negro em frente ao disco solar. Durante o trânsito planetário, o surgimento de nuvens pode prejudicar o registro fotográfico. Este fato mostra a dificuldade de realizar esta experiência em função das condições atmosféricas locais, daí a importância de que a mesma experiência seja realizada em pontos latitudinais distintos para que as falhas que ocorrem num determinado local possam ser compensadas em outro local distinto. Apesar disso, foi possível, em determinados momentos, o simultâneo registro fotográfico do trânsito de Mercúrio em Jataí e em Medellín, conforme Figura 7.

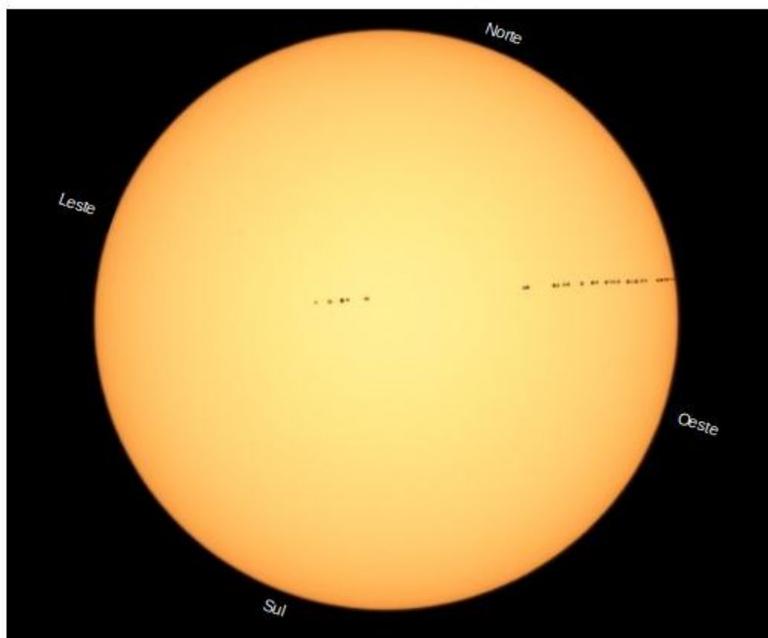


Figura 7 - Registro do trânsito de Mercúrio de novembro de 2019, sobreposição de imagens fotográficas obtidas durante o trânsito planetário.
Fonte: Enrique Torres, Planetário de Medellín.

3.1 Cálculo da paralaxe solar durante um trânsito de Mercúrio

Para a medida da paralaxe (valor do ângulo β), começamos com a análise de duas imagens obtidas no mesmo instante do Tempo Universal Coordenado (UTC, fuso horário de referência a partir do qual se calculam todas as outras zonas horárias do mundo), ou o mais próximo possível, em cada local de observação. O objetivo é a determinação da separação entre as sombras de Mercúrio. Com o uso de um *software* de edição e manipulação de imagens (*software* GIMP), alinhamos as duas imagens digitais (com ambas na mesma escala), medimos (em pixel), várias vezes para a obtenção de um valor médio, a separação $\delta\pi$ entre as sombras de Mercúrio e o diâmetro do disco solar na imagem (que chamamos de S) (Jiménez, 2012). Por definição, “pixel” é o menor componente de uma imagem digital. A Figura 7 apresenta uma sobreposição de imagens do registro do trânsito de Mercúrio (hora 17:00 UTC) do dia 11 de novembro de 2019,

dos locais de observação situados em Jataí (Brasil) e em Medellín (Colômbia). Considerando que o diâmetro aparente do Sol durante o trânsito em novembro é de 1937 segundo de arco² (NASA, 2011), o valor da paralaxe (β), em valor angular, é obtido usando uma simples "regra de três" conforme a equação (10):

$$\beta = \delta\pi(\text{pixel}) \times \left(\frac{1937(\text{arcseg})}{S(\text{pixel})} \right) =$$

$$(4,5 \pm 1,2) \times \left(\frac{1937}{(1043,5 \pm 1,4)} \right) \times \frac{1}{3600} = (2,3 \pm 0,6) \times 10^{-3} \text{ graus.} \quad (10)$$

Aplicando os resultados de d_{AB} e β na equação (9) encontramos o valor de UA:

$$1UA \cong d_{Terra-Sol} = (1,519 \pm 0,400) \times 10^{11} \text{ m}$$

Na Tabela 1 são apresentados, em síntese, os valores experimentais encontrados e o valor da Unidade Astronômica calculada neste trabalho. Considerando que a simplificação teórica apresentada neste trabalho permitiu determinar o valor da Unidade Astronômica com boa aproximação ao valor padrão definido pela União Astronômica Internacional (Luzum *et al.*, 2011), concluímos que um valor correspondente, considerando a margem de incerteza do valor calculado neste trabalho, poderá ser reproduzido por educadores junto a estudantes da última fase da educação básica.

Grandeza Física	Valor
D	$(3752 \pm 17) \times 10^3 \text{ m}$
R	$(6,378 \times 10^6 \pm 0,1) \text{ m}$
d_{AB}	$(3719 \pm 1) \times 10^3 \text{ m}$
β	$(2,3 \pm 0,6) \times 10^{-3} \text{ graus}$
1 UA	$(1,519 \pm 0,400) \times 10^{11} \text{ m}$

Tabela 1 - Dados Experimentais, medida de UA, obtidos através do trânsito de Mercúrio. O valor de $1,495\,978\,707\,00 \times 10^{11} \text{ m}$ é o valor padrão atualmente aceito (Luzum *et al.*, 2011).

² Segundo de arco é uma medida angular que corresponde a 1/3600 de um grau e usualmente é abreviado como arcseg.

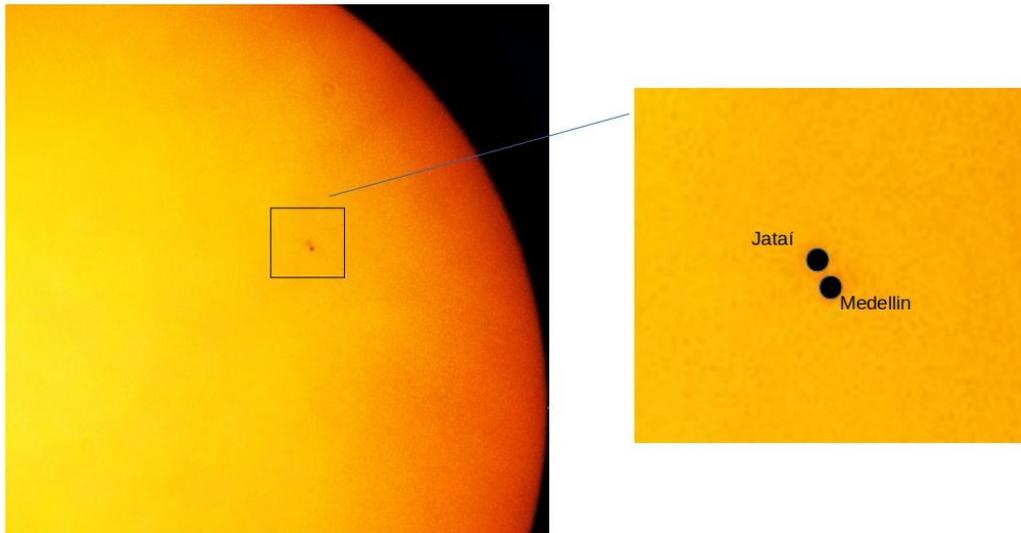


Figura 8 - O tamanho do efeito de paralaxe. Sobreposição de duas imagens do trânsito de Mercúrio tiradas exatamente no mesmo instante por observadores em Jataí (Brasil) e em Medellín (Colômbia).

4 Conclusões

O conhecimento de Astronomia é importante porque fornece outros conhecimentos subjacentes a este, tais como geolocalização, geografia, trigonometria, matemática e, também, história do desenvolvimento intelectual do mundo. Tais conhecimentos são importantes para a formação do indivíduo e seu papel na construção de uma sociedade preparada para enfrentar desafios e procurar resolvê-los. Estes conceitos são fundamentais para a educação científica de estudantes de todos os níveis, contribuindo com a sua formação responsável. Por isso, neste trabalho, foi apresentada uma atividade a ser desenvolvida na escola para a demonstração de conceitos físicos importantes para a formação de estudantes. A interação entre universidade e escola é fundamental para a construção de uma sociedade mais justa e preparada para desafios futuros e, por isso, este trabalho focou numa atividade que visa a demonstrar não somente o papel da Ciência na construção e formação do indivíduo, como, também, o papel que a universidade precisa ter para com a sociedade local, regional e nacional. Esta atividade realizada em cooperação com uma instituição internacional demonstrou que é possível realizar um experimento que permite obter uma grandeza importante, a Unidade Astronômica - UA com uma excelente precisão.

A atividade realizada, o registro do trânsito de Mercúrio de 2019, permitiu determinar o valor da Unidade Astronômica com uma boa aproximação, diferença de apenas 0,9% em relação ao valor padrão atualmente aceito. Os trânsitos de planetas em órbita mais próxima do Sol possuem certa importância didático-pedagógica, pois podem ser utilizados por educadores em todos os níveis de educação formal como elemento motivador, além da relevância histórica, uma vez que podemos lembrar os feitos de grandes astrônomos e seus esforços para desvendar os mistérios do nosso universo com os recursos limitados à época. A atividade permite conhecer e aplicar dados

experimentais, desenvolver conhecimentos, como construções geométricas, trigonometria, razões e proporções, as Leis de Kepler do movimento planetário, coordenadas geográficas e geoposicionamento, conceitos que demonstram que a atividade permite uma interdisciplinaridade junto aos estudantes.

Agradecimentos

Os nossos agradecimentos especiais à equipe de trabalho do Planetário de Medellín (Colômbia), em especial ao professor Enrique Torres, pela autorização do uso de imagens do registro do Trânsito de Mercúrio em Medellín, bem como à Direção da Escola Estadual Washington Barros França, pelo apoio na atividade de observação astronômica. Os autores deste trabalho agradecem às seguintes agências de fomento à pesquisa pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e bolsas de estudos à estudantes universitários: Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

Backhaus, U. (2019). The transit of Mercury: November 11, 2019. *American Journal of Physics*, (87), 773.

Bigas, P. P. (2019). *Tránsitos: la medida del Sistema Solar y de otros sistemas planetarios* (1a ed.). Madrid: Centro Nacional de Información Geográfica.

Brumfiel, G. (2012). Astronomical Unit, or Earth-Sun Distance, Gets an Overhaul. *Scientific American*. Recuperado em 25 nov. 2020, de www.scientificamerican.com/article/astronomical-unit-or-earth-sun-distance-gets-an-overhaul

Costa Júnior, E. et al. (2018). Divulgação e Ensino de Astronomia e Física por meio de abordagens informais, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(4), 1-8. Recuperado em 15 set. 2020, de <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0051>

Google (2001). *Google Earth*. Recuperado em 25 nov. 2020, de www.google.com/earth

Gregory, J. (1663). *Optica Promota, Seu Ábdita Radiorum Reflexorum & Refractorum Mystera, Geometrice Enucleata*. London: EEBO Editions.

Halley, E. (1716). Methodus Singularis Quâ Solis Parallaxis Sive Distantia à Terra, ope Veneris intra Solem Conspiciendoe, Tuto Determinari Poterit. *Philosophical Transactions*, (29), 454-464. Tradução do latim para o ingles: A new method of determining the parallax of the Sun, or his distance from the Earth. *Abridged Transactions of the Royal Society*, (6), 243-249, published in 1809. Recuperado em 25 nov. 2020, de <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/HalleyParallax.html>

International Astronomical Union. (2020). *Measuring the Universe: The IAU and astronomical units*. Recuperado em 15 set. 2020, de www.iau.org/public/themes/measuring/

Alessandro Martins, Thiago Oliveira Lima, Maurício José Alves Bolzan, Phablo de Araujo Sousa, Valdinei Bueno Lima Filho, Alexandre Pancotti e João Carlos de Moura Castro Neto

Jiménez, M. et al. (2012). *Calculating the Earth-Sun distance from images of the transit of Venus*. Recuperado em 10 dez. 2019, de <https://gloria-project.eu/wp-content/uploads/2014/10/venus-transit-A1-earth-sun-distance-FINAL.pdf>

Luzum, B. et al. (2011). The IAU 2009 system of astronomical constants: the report of the IAU working group on numerical standards for fundamental Astronomy. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 110(4), 293-304.

Lyra, W. et al. (2020). Ad Astra Academy: using space exploration to promote student learning and motivation in the City of God, Rio de Janeiro, Brazil. *Communicating Astronomy with the Public (CAP) Journal*, 27, 5-13.

Matsuura, O. (2020). *Trânsitos de Mercúrio e a Unidade Astronômica*. Recuperado em 15 set. 2020, de www.sbhc.org.br/conteudo/view?ID_CONTEUDO=922

National Aeronautics and Space Administration. (2011). *Century Catalog of Mercury Transits: 1601 ce to 2300 ce*. Recuperado em 10 jul. 2020, de <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/catalog/MercuryCatalog.html>

National Aeronautics and Space Administration. (2012). *Planetary Transits Across the Sun*. Recuperado em 10 jul. 2020, de <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/transit.html>

Rizzuti, B., & Silva, J. (2016). O antigo adapta-se ao moderno: verificação do valor da Unidade Astronômica a partir do trânsito de Vênus reproduzido com o software Stellarium. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(3), e3302.

Sears, F. et al. (2008). *Física* (Vol. 2, 12a ed.). São Paulo: Pearson Addison Wesley.

Stix, M. (1991). *The Sun, an introduction* (2a ed.). Berlim: Springer-Verlag.

Teets, D. A. (2003). Transits of Venus and the Astronomical Unit. *Mathematics Magazine*, 76(5), 335-348.

Vuolo, J. H. (1996). *Fundamentos da Teoria de Erros* (2a ed.). São Paulo: Edgard Blücher.

Artigo recebido em 01/05/2020.

Aceito em 23/10/2020.