

Simulação da trajetória e magnitude de meteoroides de pequena massa

Simulation of the trajectory and magnitude of small-mass meteoroids

Simulación de la trayectoria y magnitud de meteoroides de pequeña masa

Recebido: 27/07/2022 | Revisado: 06/08/2022 | Aceito: 07/08/2022 | Publicado: 09/08/2022

Christian Andrade Bruziguês

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9547-0173>
Universidade Federal de Alfenas, Brasil
E-mail: christian.bruziguês@sou.unifal-mg.edu.br

Samuel Bueno Soltau

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7211-2533>
Universidade Federal de Alfenas, Brasil
E-mail: samuel.soltau@unifal-mg.edu.br

Resumo

Através de simulações computacionais estuda-se o comportamento de meteoroides ao adentrar a atmosfera terrestre. Dados os parâmetros massa e velocidade iniciais aplica-se o método numérico de Integração de Euler Modificado para resolver as equações que descrevem a o comportamento de meteoroides em queda. Os resultados numéricos obtidos através de valores arbitrários inseridos na simulação mostraram boa concordância quando comparados com os observáveis selecionados da base de dados da *International Astronomical Union* (IAU), porém evidenciam que aperfeiçoamentos na precisão podem ser realizados em versões futuras do algoritmo.

Palavras-chave: Física; Simulação computacional; Meteoroides; Magnitude aparente.

Abstract

By computer simulations, the behavior of meteoroids when entering the Earth's atmosphere is studied. Given the initial mass and velocity parameters, the Modified Euler Integration numerical method is applied to solve the equations that describe the behavior of falling meteoroids. The numerical results obtained through arbitrary values inserted in the simulation showed good agreement when compared with the observables selected from the International Astronomical Union (IAU) database, but they show that improvements in accuracy can be made in future versions of the algorithm.

Keywords: Physics; Computer simulation; Meteoroids; Apparent magnitude.

Resumen

Mediante simulaciones por ordenador se estudia el comportamiento de los meteoroides al entrar en la atmósfera terrestre. Dados los parámetros iniciales de masa y velocidad, se aplica el método numérico de Integración de Euler Modificada para resolver las ecuaciones que describen el comportamiento de la caída de meteoroides. Los resultados numéricos obtenidos a través de valores arbitrarios insertados en la simulación mostraron una buena concordancia cuando se compararon con los observables seleccionados de la base de datos de la International Astronomical Union (IAU), pero muestran que se pueden realizar mejoras en la precisión en futuras versiones del algoritmo.

Palabras clave: Física; Simulación por ordenador; Meteoroides; Magnitud aparente.

1. Introdução

Fenômenos tais como a chuva de meteoros e a queda de meteoritos são observados ao longo de toda a história da humanidade. Por praticamente não existir minério de ferro puro na superfície terrestre e antes de termos os domínios dos processos de transformação e fundição de metais os meteoritos foram usados como fonte de ferro para a fabricação de armas, utensílios e amuletos na antiguidade (Zucolotto et al., 2013). Somente com o avanço científico e tecnológico é que os meteoroides começaram a ser estudados de forma sistemática.

Meteoros são responsáveis por desencadear algumas dinâmicas geológicas e biológicas terrestres, como, por exemplo, o meteoro que caiu onde hoje está localizado o México e criou a cratera de Chicxulub, a cerca de 66 milhões de anos atrás, e foi o responsável pelo cataclismo que deu início ao processo de extinção dos dinossauros. Também as crateras que observamos na Lua são o resultado de inúmeros impactos de meteoros sobre a superfície do satélite (Wegener & Celâl Şengör, 1975).

Eventos como os que ocorreram no século 20 na região de Tunguska, na Sibéria, em 1908 (Ol'khovtov, 2021; Sekanina, 1983; Turco et al., 1982) e, o caso análogo que ocorreu na região amazônica brasileira, em 1930 (Cordero & Poveda, 2011), e que ficou conhecido como o evento do Rio Curuçá devastaram áreas de milhares de quilômetros. Atualmente, eventos envolvendo meteoroides podem ser monitorados e observados mais facilmente com o uso da tecnologia contemporânea. Câmeras situadas no território brasileiro registram casos como, por exemplo, em 2020, de um meteoro que foi avistado em diversas cidades do norte do Estado de São Paulo e no sul do Estado de Minas Gerais. Segundo relatos de moradores locais, o fenômeno provocou barulho de explosões, indicando a possível queda. Análises posteriores comprovaram se tratar, de fato, de um meteorito que recebeu o nome de Tiros, em homenagem ao município onde foi encontrado (Zurita, 2020).

O monitoramento sistemático de quedas de meteoritos no Brasil pode ser considerado relativamente recente. Neste âmbito vale destacar a atuação de iniciativas como o projeto EXOSS *Citizen Science Project*, que é uma organização colaborativa *citizen science*, voltada para o estudo de meteoros e bólidos, suas origens, naturezas e caracterização de suas órbitas, unindo profissionais e amadores¹, e da Rede Brasileira de Monitoramento de Meteoros (BRAMON) mantém constante observação do céu e registro de ocorrências de eventos envolvendo meteoroides². Já o Museu Nacional³ possui em seu acervo uma coleção de 78 meteoritos com exposições periódicas abertas para o público em geral. Segundo (Krot et al., 2007) e (Zucolotto et al., 2013), os meteoritos se classificam em dois tipos: queda e achado. Meteoritos que entram na classificação de queda são aqueles que foram observados ou monitorados enquanto caíam, já o achado corresponde àqueles encontrados em algum sítio e confirmado tratar-se de meteorito.

Beech e Steel (1995) e Rubin e Grossman (2010) definem os termos meteoróide, meteoro e meteorito. Meteoróide é objeto sólido em movimento no espaço com um tamanho inferior a 10m, mas maior que 100µm. Quando o meteoróide penetra na atmosfera terrestre, o atrito gerado entre o material do qual é composto e a atmosfera terrestre resulta em uma combustão que tem como resultado a luz que observamos durante sua queda. Nesse estágio o meteoróide passa a ser chamado de meteoro. Se o meteoro não consumir toda a sua massa durante o processo de combustão devido a sua queda e chegar ao solo com alguma massa intacta, passa a ser denominado como meteorito.

O estudo de meteoritos contribui para aprendermos a respeito da composição de outros planetas e da origem do sistema solar. O sistema solar e os planetas que o constitui, formaram-se da mesma matéria que os meteoritos que, através de sucessivas colisões foram se aglomerando para formar os corpos maiores, como os conhecemos hoje. Dentre as teorias que tentam explicar a origem da água no planeta Terra e da matéria orgânica que geraram as condições iniciais para a evolução da vida terrestre tenham vindo através de meteoritos do tipo carbonáceos que se chocaram contra o planeta em formação (Pepin, 1991).

O estudo dos meteoros visa também o monitoramento orbital para tentar prever colisões de corpos celestes que estão próximos à Terra e que podem apresentar alguma ameaça. Estes objetos, denominados *Near Earth Object (NEO)*, são catalogados e ficam sob monitoramento constante. Um dos principais centros de monitoramento é o *The Spaceguard Centre*⁴, localizado no Reino Unido, que é um observatório dedicado a identificar e monitorar NEOs. Já o *Center for NEO Studies*⁵ (CNEOS), da NASA, dedica-se a calcular as órbitas de asteroides e cometas e a estimar suas chances de colisão com a Terra com o uso de simulações computacionais nos seus estudos. Também é relevante mencionar o *The Minor Planet Center (MPC)* que opera vinculado ao *Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)*, da *International Astronomical Union (IAU)*⁶. No Brasil temos o projeto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON) que implantou o

¹ <https://press.exoss.org/>. Acesso em 06 ago. 2022.

² <http://www.bramonmeteor.org/bramon/>. Acesso em 26 jun. 2022.

³ <http://www.meteoritos.museunacional.ufrj.br/>. Acesso em 11 fev.2022

⁴ <https://spaceguardcentre.com/>. Acesso em 26 jun.2022.

⁵ <https://cneos.jpl.nasa.gov/>. Acesso em 26 jun.2022.

⁶ <https://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>. Acesso em 06 ago. 2022.

Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), no distrito de Itacuruba, no estado de Pernambuco, operado pelo Observatório Nacional (ON-Brasil) e dedicado exclusivamente à observação de pequenos corpos do sistema solar (Rondón et al, 2020). Há também estudos que visam determinar com maior precisão o radiante que consiste no ponto de onde todos os meteoros parecem surgir durante uma chuva de meteoros (Amaral et al., 2020).

Segundo Ryabova (2020) a simulação da formação e evolução dos fluxos de meteoroides passou por etapas, que foram determinadas principalmente pela capacidade computacional. Nas primeiras abordagens, por exemplo, o foco das modelagens era concentrado em como a chuva de meteoros se originava e os cálculos das perturbações planetárias eram feitos à mão o que demandava muito tempo e esforço. Um exemplo desse período é a previsão da grande chuva de meteoros (*Andromedids*) em 1872, feita por E. Weiss em 1868, que teve um papel fundamental para a aceitação de que cometas e meteoros têm relação entre si (Williams, 2011).

Conforme os métodos matemáticos foram ficando mais refinados e com a disponibilidade de computadores, outras abordagens para o estudo da dinâmica dos fluxos de meteoros começaram a surgir e o foco passou a ser o estudo das órbitas dos meteoroides como, por exemplo Williams, Murray & Hughes (1979), que modelaram o fluxo de meteoros *Quadrantid* através do método numérico de *Runge-Kutta*, uma extensão do método de Euler, com uma melhor precisão (Butcher, 2016). Depois com mais um avanço computacional e integração de computadores em larga escala se tornando possível, surgiram trabalhos que buscaram modelar os fluxos de meteoroides mais conhecidos, como por exemplo, a modelagem dos fluxos de meteoroides do Cometa Halley (McIntosh & Jones, 1988), do fluxo Geminid (Ryabova, 1989), do fluxo *Perseid* (Brown & Jones, 1998), dos fluxos de meteoroides relacionados ao asteroide 1620 Geographos (Ryabova, 2002) e o estudo de Vaubaillon, Colas & Jorda (2005) que modelaram o fluxo de meteoroides Leonid.

Segundo Prietula e Kathuria (2013), uma simulação computacional é um modelo dinâmico instanciado em um computador orientado a processos. Estes podem variar de modelos tradicionais (expressos como equações) a construções e processos mais abstratos (expressos como objetos, agentes, operadores e algoritmos) (Nóbrega et al., 2022).

O presente trabalho alinha-se com os estudos de simulação de meteoroides e tem por objetivo apresentar e discutir um modelo para descrever a queda de meteoroides através da atmosfera terrestre, tendo por parâmetros sua velocidade e massa iniciais, acompanhando sua trajetória desde o ingresso nas camadas superiores da atmosfera até uma possível chegada ao solo. Foram escolhidos para compor o estudo meteoroides que tem baixa magnitude como primeira aproximação do fenômeno. A pergunta fundamental que o modelo busca responder é qual a magnitude aparente de um meteoróide com determinada massa. O modelo incorpora parâmetros físicos como condições de contorno iniciais e evolui no tempo apresentando o resultado das simulações na forma de gráficos.

Quanto à estrutura do artigo, na seção 2 apresentam-se os aspectos teóricos relacionados usualmente na descrição dos meteoroides. Na seção 3 o modelo físico-matemático é discutido juntamente com o algoritmo computacional da simulação. Na seção 4 apresentam-se os resultados. Na última seção concluímos e discutimos possibilidades a serem incorporadas em futuras implementações do código computacional da simulação.

2. Definição do Modelo Matemático

Ao entrar em contato com a atmosfera terrestre, o meteoróide tem sua velocidade reduzida. A redução acontece devido a perda de *momentum*, que é proporcional à quantidade de ar deslocada pelo meteoróide (Bronshen, 2012). A equação (1) descreve este fenômeno.

$$M \frac{dv}{dt} = \Gamma S \rho_a v^2 \quad (1)$$

onde

M é a massa inicial do meteoróide dada em gramas,

Γ é o coeficiente de arrasto que expressa a porção de momento que é perdida durante a queda sendo convertido em desaceleração do corpo,

S é a área de seção transversal do meteoróide é dada em metros quadrados,

ρ_a é a densidade da atmosfera a uma dada altura específica é dada em gramas por centímetro cúbico e,

v é a velocidade do meteoróide em um instante específico é dada em quilômetro por segundo.

Por conveniência adiante, para a velocidade do meteoróide, v será adotado conforme a equação (2):

$$v = (v^2 + u^2)^{1/2} \quad (2)$$

A variação da densidade da atmosfera ρ_a de acordo com a altura y , pode ser calculada com a seguinte aproximação (3)

$$\rho_a = \exp(6,65125 - 13,9813 \times 10^{-7} y) \quad (3)$$

Parte da energia cinética de movimento que o meteoróide tem durante sua queda é transformada em calor, durante o processo de ablação da massa (Ceplecha et al., 1998). A equação (4) descreve esse processo de perda da massa

$$\frac{dM}{dt} = -A \frac{S \rho_a v^3}{2Q} \quad (4)$$

onde

A é o coeficiente transferência de calor que tem uma certa porção de sua energia cinética sendo gasta a ablação é menor ou igual a 1, dado em Watts por metro quadrado por Kelvin,

Q é o calor latente de vaporização ou fusão do material do meteoróide em unidades de energia dada em Joules por grama.

A massa evaporada devido a ablação é convertida em radiação luminosa que é proporcional a energia cinética da massa evaporada num instante de tempo, dada por (5) (Ceplecha et al., 1998).

$$I = \tau \left(\frac{-dM}{dt} \right) \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

onde

I é a intensidade da radiação dada por Watts por stereradiano, M a massa em gramas, v a velocidade em quilômetro por segundo e,

τ é o coeficiente de luminosidade dada em Watts.

O efeito luminoso observado na trajetória do meteoróide é associado com a magnitude. A relação entre a magnitude aparente, a magnitude absoluta e a distância r (dada em *parsec*) é expressa em (6) (Szasz et al., 2008)

$$M = m + 5 - \log r \quad (6)$$

Usando como comparação os valores do Sol, pode-se descrever a magnitude de um meteoróide para um observador que está na superfície terrestre com o objeto visualizado no zênite como

$$m = 5 \log y - 2,5 \log I - 5,465 \quad (7)$$

Para os propósitos da modelagem do fenômeno como efetuado neste trabalho, na impossibilidade de adotar uma forma definida para o meteoróide, adota-se a forma esférica na relação entre volume V_m (em metros cúbicos), a seção transversal S (em metro quadrado), para definir o coeficiente de forma A do meteoróide como em (8), como proposto em (Bronshten, 2012)

$$A = \frac{S}{V_m^{2/3}} \quad (8)$$

Para uma esfera perfeita o coeficiente de forma é $A = 1,21$ e a área de seção transversal (Bronshten, 2012) é definida como em (9):

$$S = \frac{AM^{2/3}}{\rho_m^{2/3}} \quad (9)$$

onde M é a massa do meteoróide dada em gramas e ρ é a densidade do meteoróide dada em gramas por centímetro cúbico.

Substituindo os valores S da equação 1 conforme definido na equação (9) tem-se a equação (10) que descreve a velocidade do meteoróide

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma AM^{-1/3} \rho_m^{-2/3} \rho_a (u^2 + v^2)^2 \quad (10)$$

Nota-se, na equação (10), que a velocidade é composta por duas componentes u e v , relacionadas aos eixos x e y , respectivamente. A partir dessa distinção de componentes tem-se então duas equações diferenciais (11) e (12) que descrevem as velocidades do meteoróide.

$$\frac{du}{dt} = -\Gamma AM^{-1/3} \rho_m^{-2/3} \rho_a (u^2 + v^2)^{1/2} u \quad (11)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma AM^{-1/3} \rho_m^{-2/3} \rho_a (u^2 + v^2)^{1/2} v - g \quad (12)$$

Em que g é a aceleração gravitacional dada em metro por segundo ao quadrado.

A variação nas componentes da posição é dada pelas equações (13) e (14)

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (13)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \quad (14)$$

Usando a equação (9) para reescrever a equação (4) a fim de reorganizar os parâmetros e incluir as componentes da velocidade, tem-se que (15)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{-\Lambda A}{2Q} M^{2/3} \rho_m^{-2/3} \rho_a (u^2 + v^2)^{3/2} \quad (15)$$

O equacionamento do modelo necessita de cinco condições iniciais (massa inicial, posição x , posição y , velocidade x e velocidade y) e seis parâmetros livres e seis parâmetros livres ($A, Q, \Lambda, \tau, \rho_m$ e Γ) que devem ser satisfeitos para se obter uma descrição completa da magnitude de trajetória de um meteoróide.

3. O Algoritmo da Simulação

Dado que os parâmetros livres aparecem apenas em determinadas combinações das equações, estes podem ser agrupados a fim de reduzir o modelo a apenas três equações e assim reduzir também os cálculos algorítmicos e, possivelmente o custo computacional com a otimização.

Deste modo, tem-se que K_1 , em (16) e K_2 , na Equação (17) são constantes criadas para agrupar os parâmetros livres visando a escrita do algoritmo

$$K_1 = \frac{\Gamma A}{\rho_m^{2/3}} \quad (16)$$

$$K_2 = \frac{\Lambda A}{2Q \rho_m^{2/3}} \quad (17)$$

Os valores típicos para K_1 estão entre 0,5 e 1 e para K_2 o valor típico é 10^{-11} (Bronshen, 2012).

Reescrevendo as equações (11), (12) e (15) com os parâmetros livres agrupados tem-se

$$\frac{du}{dt} = -K_1 \rho_a (u^2 + v^2)^{1/2} M^{-1/3} u \quad (18)$$

$$\frac{dv}{dt} = -K_1 \rho_a (u^2 + v^2)^{1/2} M^{-1/3} v - g \quad (19)$$

$$\frac{dM}{dt} = -K_2 \rho_a (u^2 + v^2)^{3/2} M^{2/3} \quad (20)$$

Para resolver o conjunto de equações diferenciais que descrevem o movimento do meteoróide foi escrito um algoritmo na linguagem Python⁷ que emprega o Método de Euler modificado (Suli & Mayers, 2003) para calcular o novo estado dos parâmetros de entrada x_{i+1} , y_{i+1} , u_{i+1} , v_{i+1} e M_{i+1} no instante de tempo t_{i+1} . As equações (13), (14) e de (18) até (20) foram iteradas duas vezes a cada etapa de execução do algoritmo. A primeira interação ocorre na fase denominada predição, que efetua os cálculos incrementais a partir das condições de contorno iniciais. A segunda fase, denominada correção, os eventos incrementados são submetidos ao Método de Euler modificado para obter-se as condições de contorno seguintes. O ciclo se repete até o meteoróide atingir o solo ou a dissipar-se por ablação.

A equação (21) é usada para calcular a predição – correção

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2} dt [f(x_i, y_i) + f(x_i + dt, y_i + dt f(x_i, y_i))] \quad (21)$$

A função f denota as iterações utilizadas durante o Método de Euler modificado como aparece no código computacional.

A equação (22) nos dá um valor intermediário dos valores incrementados

$$t_{i+1} = t_i + dt \quad (22)$$

Aplicando a equação (22) nas cinco funções, tem-se

$$x_{i+1} = x_i + dt f_{x,i} \quad (23)$$

onde $f_{x,i}$ é dado pela eq. (13).

$$y_{i+1} = y_i + dt f_{y,i} \quad (24)$$

onde $f_{y,i}$ é dado pela eq. (14).

$$u_{i+1} = u_i + dt f_{u,i} \quad (25)$$

onde $f_{u,i}$ é dado pela eq. (18).

$$v_{i+1} = v_i + dt f_{v,i} \quad (26)$$

onde $f_{v,i}$ é dado pela eq. (19).

$$M_{i+1} = M_i + dt f_{M,i} \quad (27)$$

onde $f_{M,i}$ é dado pela eq. (20).

Essas cinco expressões fornecem a situação prevista no instante t_{i+1} . Já para a fase de predição – correção, tem-se:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{2} dt (f_{x,0_{i+1}} + f_{x,i}) \quad (28)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2} dt (f_{y,0_{i+1}} + f_{y,i}) \quad (29)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{1}{2} dt (f_{u,0_{i+1}} + f_{u,i}) \quad (30)$$

$$v_{i+1} = v_i + \frac{1}{2} dt (f_{v,0_{i+1}} + f_{v,i}) \quad (31)$$

$$M_{i+1} = M_i + \frac{1}{2} dt (f_{M,0_{i+1}} + f_{M,i}) \quad (32)$$

$I_{(i+1)} = \dots$ com a Equação 4 usando $f_{(M,0_{i+1})}$ para dM/dt , $u_{(0_{i+1})}$ e $v_{(0_{i+1})}$.

⁷ O código fonte dos cálculos está disponível em <https://github.com/Chbruzi/Meteoróide>

$m_{(i+1)} = \dots$ com a Equação 6 usando $I_{(i+1)}$ e o dado do estado $i + 1$.

Conforme a massa do meteoróide se reduz por ablação, as interações do algoritmo incrementam o tempo. Porém, à medida em que a massa diminui, também o incremento do tempo precisa ser ajustado para adequar-se à resolução da simulação. Ou, dito de outro modo, quando a massa diminui abaixo de um certo valor, os eventos acontecem mais rapidamente e o incremento do tempo, dt , precisa adequar-se para que a simulação seja válida para os instantes finais da trajetória.

Os valores utilizados para o incremento dt em função da redução de massa (ablação) foram os seguintes:

$dt = 0,1s$ caso a massa seja maior que 80% da massa inicial

$dt = 0,05s$ caso a massa estiver entre 80% e 50%

$dt = 0,02s$ caso a massa estiver entre 50% e 35%

$dt = 0,01s$ quando a massa cair abaixo de 35%

Tais valores foram ajustados por tentativa e erro, durante sessões de execução do código até obter uma boa resolução nos dados. Utiliza-se a massa para controlar o incremento do tempo pois com a sua redução devido a ablação não faz sentido continuar a iteração. Note que é a quantidade de massa que determina se ao final da trajetória haverá meteorito.

4. Resultados e Discussão

O referencial utilizado na simulação descreve o observador estando localizado sob o meteoróide, ou seja, o observador viaja junto com o meteoróide mantendo-o sempre no zênite e, portanto, com a mesma velocidade horizontal do meteoróide.

Na Tabela 1, apresentam-se as condições de contorno iniciais para os parâmetros de entrada, ou seja, para massa inicial ($M|0$), posição inicial no eixo x, (x_0), posição eixo y, (y_0), velocidade no eixo x, (u_0), velocidade no eixo y, (v_0), constante K_1 , constante K_2 e coeficiente de luminosidade (τ).

Tabela 1: Condições de contorno iniciais.

Meteoróide	x_0	y_0	u_0	v_0	M_0	K_1	K_2	τ
M1	0.0	160.0	20.0	-60.0	1.000	1.00	$1x10^{(-11)}$	0.02
M2	0.0	99.0	20.0	-25.0	0.010	1.00	$1x10^{(-11)}$	0.02
M3	0.0	90.0	20.0	-20.0	0.050	1.00	$1x10^{(-11)}$	0.02
M4	0.0	100.0	20.0	-25.0	0.025	1.00	$1x10^{(-11)}$	0.02

Fonte: Autoria própria.

Os valores da Tabela 1 foram escolhidos durante a primeira etapa da pesquisa através da execução do código da simulação de modo a obter resultados cujo comportamento cinemático fosse compatível com valores usualmente encontrados em bases de dados de meteoróides dentro da faixa de validade da simulação.

Na etapa seguinte, foram inseridos valores obtidos do catálogo fotográfico do *Meteor Data Center*⁸ (MDC) da *International Astronomical Union (IAU)* em busca de reproduzir os valores observados durante os fenômenos registrados no catálogo. Na Tabela 2 apresentam-se os valores obtidos do MDC/IAU e usados na simulação. O procedimento visou avaliar o código quanto à capacidade de retornar valores de magnitude similares aos da primeira rodada de simulações. O valor da altitude inicial, y_0 para o meteoróide D028 não estava disponível.

⁸ <https://www.astro.sk/iaumdcDB/> - Acesso em 26 jun. 2022.

Tabela 2: Valores observados durante os fenômenos registrados no catálogo MDC

Meteoróide	γ_0	ν_0	M_0	Magnitude
D6 028	-	-59.80	0.48	-0.9
H1 139	99.0	-26.69	0.00810	1.9
H1 073	92.2	-24.20	0.01510	1.9
H1 134	96.5	-20.85	0.01870	1.9

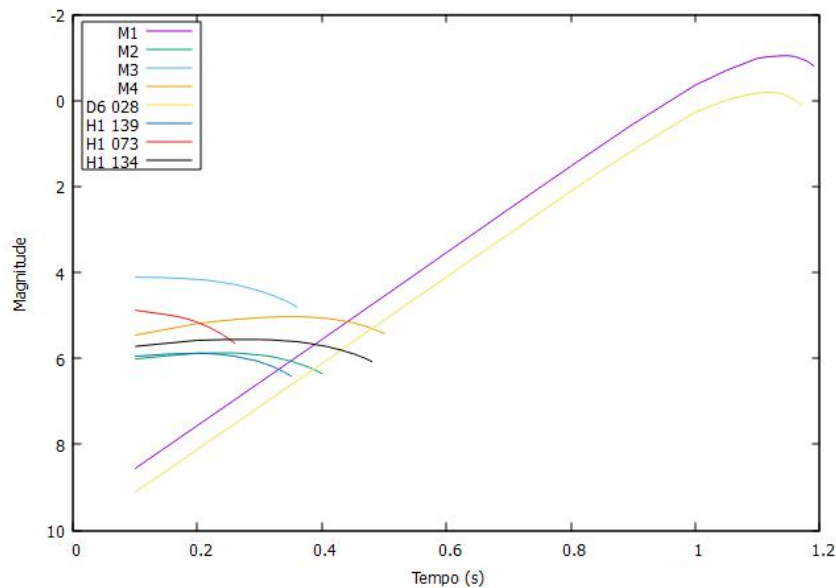
Fonte: IAU MDC (2022)

Os valores iniciais de x_0 , u_0 , K_1 , K_2 e τ para a Tabela 2 permanecem os mesmos já informados na Tabela 1.

A partir da aplicação das condições de contorno iniciais descritas na Tabela 1 e da base de dados da Tabela 2, o algoritmo produziu três tipos de gráficos, que descrevem a magnitude aparente, Figura 1, a perda de massa no decorrer do tempo, Figura 2, e trajetória, Figura 3, conforme discutido a seguir.

Todos os gráficos foram gerados comparando-se pares de meteoróides sendo um meteoróide “fictício”, designado pela letra ‘M’ (Tabela 1) com, pelo menos, um meteoróide real cujos dados foram obtidos do MDC/IAU (Tabela 2). Esta opção foi uma tentativa de obter um termo de comparação realista entre os valores simulados e os obtidos em condições efetivas das observações.

Figura 1: Magnitude aparente dos meteoróides.

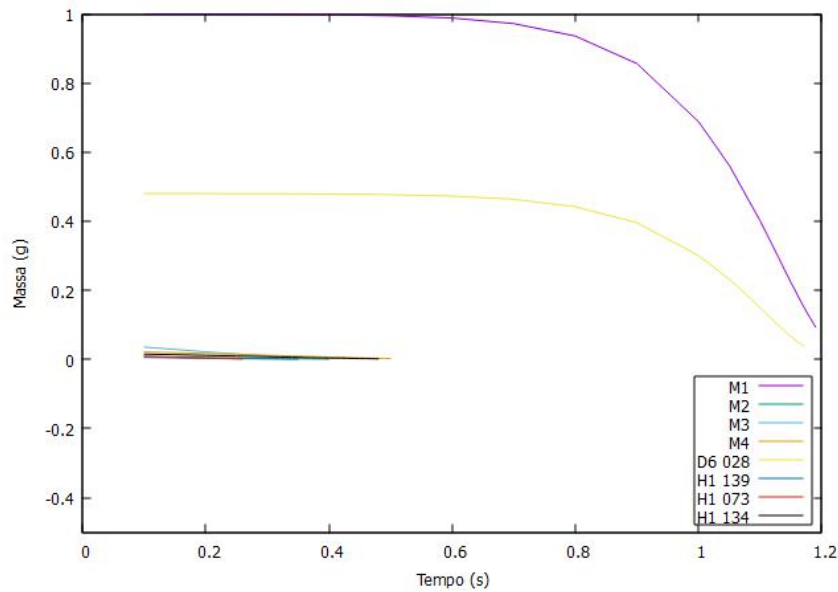


Fonte: Autoria própria.

O gráfico da magnitude aparente representado pela Figura 1 tem no seu eixo vertical a magnitude e no horizontal o tempo e apresenta a magnitude em função do tempo, as curvas tem um paralelismo entre si, isso pode ser explicado em função de que os parâmetros iniciais embora sejam similares, as condições reais como densidade da atmosfera, massa, forma do meteoróide entre outras, dificilmente seriam similares.

O segundo gráfico representado pela Figura 2 tem no eixo vertical a massa e no horizontal o tempo. Nele evidencia-se a perda de massa por ablação em função do tempo. Aqui temos uma boa coincidência com as curvas seguindo paralelamente uma à outra e ambas têm o coeficiente angular negativo – o que é esperado para o fenômeno.

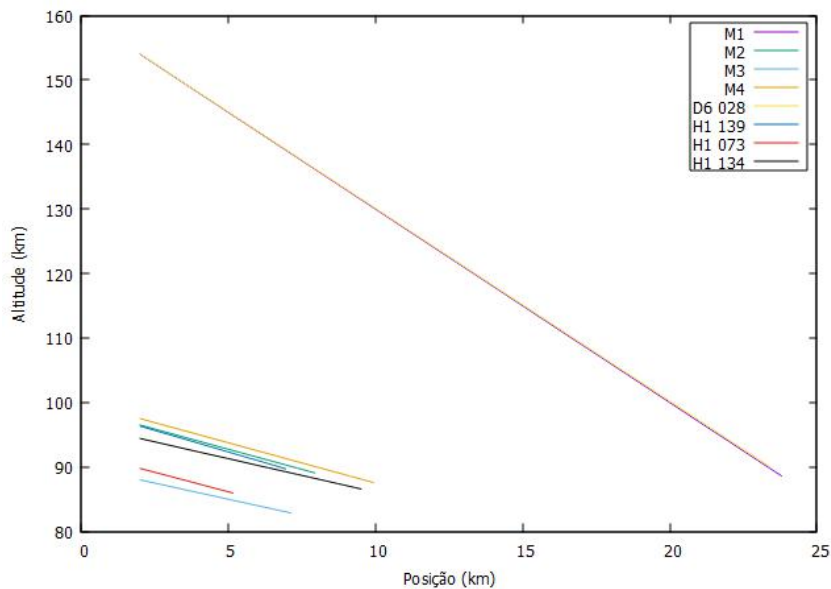
Figura 2: Massa ao decorrer do tempo dos meteoroides.



Fonte: Autoria própria.

No terceiro gráfico representado pela Figura 3, temos no eixo vertical a altura e no horizontal a posição, esse gráfico nos descreve a trajetória do meteoróide pode se notar que temos uma superposição das curvas M1 e D6 028. Nesse caso, que ocorreu por uma mera coincidência já que a simulação não contempla todas as condições reais efetivas que presidiram a observação.

Figura 3: Trajetória dos meteoroides.



Fonte: Autoria própria.

Em síntese, na comparação entre os resultados expressos nos gráficos dos meteoroides da Tabela 1, que contém os valores fictícios, com os valores observados, da Tabela 2, as curvas calculadas através da simulação apresentam boa concordância quando examinadas do ponto de vista de que têm a mesma tendência. Por exemplo, suas derivadas coincidem em sinal e orientação.

As condições meteorológicas, o formato do corpo do meteoróide, a densidade tanto da atmosfera quanto do próprio meteoróide e outras variáveis que presidem a queda de um meteoróide são apenas alguns dos fatores que influenciam os resultados apresentados. Vale ressaltar que a simulação não foi construída de forma a contemplar todas essas variações, deste modo o fato de as curvas terem a mesma tendência, aparência e comportamento foi considerado satisfatório dada a simplicidade do modelo e as aproximações efetuadas.

Ao contrário do que se espera, podemos observar na simulação realizada que os pares de meteoróides que contém maior velocidade e massa são aqueles que têm a menor magnitude aparente, isso evidencia que os dois fatores são as principais informações relevantes para se verificar a magnitude de um meteoróide nesta ordem de grandeza de massa.

5. Conclusões

O propósito desta pesquisa foi realizar a simulação de meteoróides de diversas massas observando sua trajetória e magnitude aparente, após o ingresso na atmosfera terrestre, a fim de modelar seu comportamento durante a interação com a atmosfera terrestre e comparar o resultado obtido com dados de meteoróides reais.

Os resultados obtidos com a simplicidade do modelo matemático podem ser considerados satisfatórios quando comparados com os dados de observações. O uso da linguagem *Python* mostrou-se uma escolha conveniente pois foi eficaz na construção do algoritmo e flexível no momento da execução.

Em futuros trabalhos pretende-se aperfeiçoar o algoritmo de modo a incluir a modelagem de estratificação da atmosfera segundo observáveis de temperatura, rarefação e outros parâmetros que podem afetar a ablação do meteoróide. Além disso, pretende-se experimentar o uso do algoritmo de Monte Carlo na simulação da fragmentação para tentar simular a aleatoriedade que preside o processo de ablação. A densidade do meteoróide em função de sua composição química também será alvo de estudos com vistas a aprimorar a simulação.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Dr. Carlos Fernando Jung, ao Prof. Dr. Diego Samuel Rodrigues e aos avaliadores que contribuíram com suas críticas e sugestões para aprimorar o artigo. À CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

- Amaral, L. S. et al. (2020). *Encontreitor: First Radiants*. JIMO, 48, 69-88.
- Beech, M., & Steel, D. (1995). On the definition of the term meteoroid. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 36, 281-284.
- Bronshten, V. A. (2012). *Physics of meteoric phenomena* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Brown, P., & Jones, J. (1998). Simulation of the formation and evolution of the Perseid meteoroid stream. *Icarus*, 133(1), 36-68. <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5920>
- Butcher, J. C. (2016). Numerical methods for ordinary differential equations. *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.1002/9781119121534>
- Ceplecha, Z., et. al (1998). Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews*, 84(3), 327-471.
- Cordero, G., & Poveda, A. (2011). Curuça 1930: A probable mini-Tunguska? *Planetary and Space Science*, 59(1), 10-16. <https://doi.org/10.1016/J.PSS.2010.10.012>.
- IAU MDC Database - Photographic catalogs (2022) IAU MDC Database. <https://www.astro.sk/iaumdcDB/home/catalog/photo>.
- Krot, A. N. et. al. (2007). Classification of Meteorites. *Treatise on Geochemistry*, 1-9, 1-52. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/01062-8>.
- McIntosh, B. A., & Jones, J. (1988). The Halley comet meteor stream-Numerical modelling of its dynamic evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 235, 673-693. <https://doi.org/10.1093/mnras/235.3.673>
- Nóbrega, J. C. da S., et al. (2022). Aplicações científicas e tecnológicas da derivada e integral usando simulação computacional. *Research, Society and Development*, 11(2), e5011224025. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.24025>

- Ol'khovotov, A. (2021). *The 1908 Tunguska event and forestfalls*. <http://arxiv.org/abs/2110.15193>.
- Pepin, R. O. (1991). On the origin and early evolution of terrestrial planet atmospheres and meteoritic volatiles. *Icarus*, 92(1), 2-79. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90036-S](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90036-S).
- Prietula, M. J., & Kathuria, A. (2013). Computational Simulation. *The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management*. Jan.
- Rondón, E., et al. (2020). OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies - Some Results on NEO's Physical Properties. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132(1012), <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab87a7>
- Rubin, A. E., & Grossman, J. N. (2010). Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(1), 114-122. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>
- Ryabova, G. O. (1989). Effect of secular perturbations and the Poynting-Robertson effect on structure of the Geminid meteor stream. *Solar System Research*, 23(3), 158-165.
- Ryabova, G. O. (2002). Asteroid 1620 Geographos: II. Associated Meteor Streams. *Solar System Research*, 36(3), 234-247.
- Ryabova, G. O. (2020). *Mathematical Modelling of Meteoroid Streams*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Sekanina, Z. (1983). The Tunguska event - No cometary signature in evidence. *The Astronomical Journal*, 88, 1382-1413. <https://doi.org/10.1086/113429>.
- Sulí, E., & Mayers, D. F. (2003). *An Introduction to Numerical Analysis* (Cambridge University Press).
- Szasz, C., et al. (2008). Estimated Visual Magnitudes of the EISCAT UHF Meteors. *Earth, Moon, and Planets*, 102(1), 373-378. <https://doi.org/10.1007/s11038-007-9206-y>
- Turco, R. P. et al. (1982). An analysis of the physical, chemical, optical, and historical impacts of the 1908 Tunguska meteor fall. *Icarus*, 50(1), 1-52.
- Vaubailon, J., Colas, F., & Jorda, L. (2005). A new method to predict meteor showers-I. Description of the model. *Astronomy & Astrophysics*, 439(2), 751-760. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042626>
- Wegener, A., & Celâl Şengör, A.M. (1975) The origin of lunar craters. *The Moon* 14, 211-236. <https://doi.org/10.1007/BF00565323>.
- Williams, I. P. (2011). The origin and evolution of meteor showers and meteoroid streams. *Astronomy & Geophysics*, 52(2), 2-20. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2011.52220.x>.
- Williams, I. P., Murray, C. D., & Hughes, D. W. (1979). The long-term orbital evolution of the Quadrantid meteor stream. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 189(3), 483-492. <https://doi.org/10.1093/mnras/189.3.483>.
- Zucolotto, M. E., et al. (2013). *Decifrando os meteoritos*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional.
- Zurita, M. (2020). *Rocha encontrada em Tiros é um meteorito vindo de Vesta que teve sua queda filmada em Maio – BRAMON*. <http://www.bramonmeteor.org/bramon/rocha-encontrada-em-tiros-e-um-meteorito-vindo-de-vesta-que-teve-sua-queda-filmada-em-maio/>.