



MODELO DE HAPKE APLICADO PARA ESTIMAR PROPRIEDADES FOTOMÉTRICAS DO COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO

HAPKE MODEL APPLIED TO ESTIMATE PHOTOMETRIC PROPERTIES OF THE 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO COMET

Thiago Statella¹

Resumo

A sonda Rosetta estudou com sucesso o cometa 67P / Churyumov-Gerasimenko de 2014 a 2016, quando a missão terminou com uma tentativa de pousar o satélite no núcleo do cometa. Apesar da presença da câmera científica OSIRIS a bordo da espaçonave, diversos pesquisadores usaram imagens da câmera de navegação (NavCam) para apoiar a análise do alvo. Parâmetros e calibração radiométrica foram previamente estimados para a NavCam através da calibração cruzada com a câmera OSIRIS. As reflectâncias médias do núcleo do cometa calculadas a partir de um extenso catálogo de imagens são utilizadas neste trabalho para ajustar o modelo de Hapke para a refletância, a fim de fornecer um conjunto de parâmetros que descrevem as propriedades fotométricas do núcleo do cometa. Os resultados permitiram o cálculo do albedo geométrico do alvo, bem como informações sobre o albedo de espalhamento singular, ângulo de rugosidade médio, fator assimétrico e efeito de oposição de ocultação de sombra em função do ângulo de fase.

Palavras-chave: fotometria, modelo de hapke, cometa 67P.

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)

Abstract

The Rosetta spacecraft successfully studied the 67P/Churyumov-Gerasimenko comet from 2014 to 2016, when the mission ended with an attempt to land the satellite on the comet nucleus. Despite the presence of the scientific camera OSIRIS on board the spacecraft, a number of researches used images of the navigational camera (NavCam) for supporting their analysis of the target. The radiometric calibration parameters were previously estimated from a cross-calibration with the OSIRIS camera. The average reflectances of the comet nucleus calculated from an extended catalogue of NavCam images were used in this paper to fit Hapke's model for the reflectance in order to deliver a set of parameters that describe the photometric properties of the comet nucleus. Our findings allowed for the calculation of the geometric and bond albedo of the target, as well as information on the single scattering albedo, average roughness angle, asymmetric factor and shadow-hiding opposition effect as a function of the phase angle.

Keywords: photometry, hapke model, 67P comet.

1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo da missão Rosetta era estudar o cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. A espaçonave atingiu sua órbita ao redor do cometa em 2014. Entre seus instrumentos científicos, a espaçonave Rosetta carregava dois sensores ópticos, denominados OSIRIS (*Optical, Spectroscopic e Infrared Remote Sensing System*) e NavCam (*Navigation Camera*). A OSIRIS era o principal instrumento óptico científico a bordo e, portanto, ambas as câmeras, a NAC (*Narrow Angle Camera*) e a WAC (*Wide Angle Camera*), haviam sido calibradas geométrica e radiometricamente (KELLER, 2007). A NavCam, por outro lado, era destinada a apoiar a navegação e, portanto, carecia de uma calibração radiométrica adequada. Apesar disso, a comunidade científica usaria as imagens adquiridas pela NavCam em várias aplicações, como imagens de contexto (FELDMAN et al. 2015), erupções de cometas (GRÜN et al. 2016; VINCENT et al. 2016) e outros.

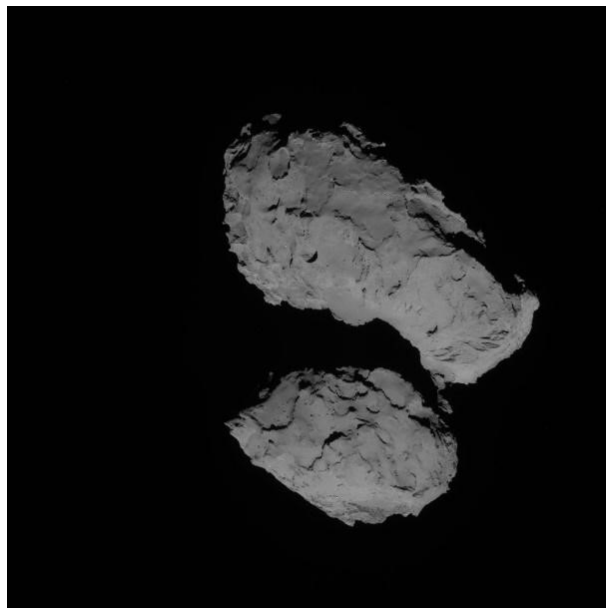
Para recuperar as unidades físicas dos números digitais (DN) registrados pela câmera de navegação, realizou-se uma calibração cruzada da NavCam, com base nas imagens de radiância OSIRIS (STATELLA & GEIGER, 2017). A partir disso, um fator multiplicativo foi concebido para transformar os números digitais das imagens NavCam (obtidas com o filtro de atenuação e regime de alto ganho) em radiância espectral L_λ (em $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$). Além disso, determinou-se as propriedades de refletância do núcleo do cometa em função do ângulo de fase. Neste trabalho, apresenta-se uma modelagem da refletância do núcleo do cometa com base na teoria de Hapke, a partir da qual obteve-se algumas propriedades fotométricas do núcleo do 67P.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Materiais

Um conjunto de 558 imagens NavCam, adquiridas em modo FOC_ATT/HIGH (atenuação de foco e ganho alto) entre 20/07/2014 às 06:58:03h e 22/08/2014 às 08:07:18h, que fazem parte dos catálogos MTP005 e MTP006, disponíveis via *Planetary Science Archive* (GEIGER & BARTHELEMY, 2015), foi processado para calcular a reflectância (ou intensidade sobre fluxo - I/F) média do núcleo do cometa. A Figura 1 mostra um exemplo de imagem NavCam adquirida em 08/08/2014 a uma distância de cerca de 80 km do cometa.

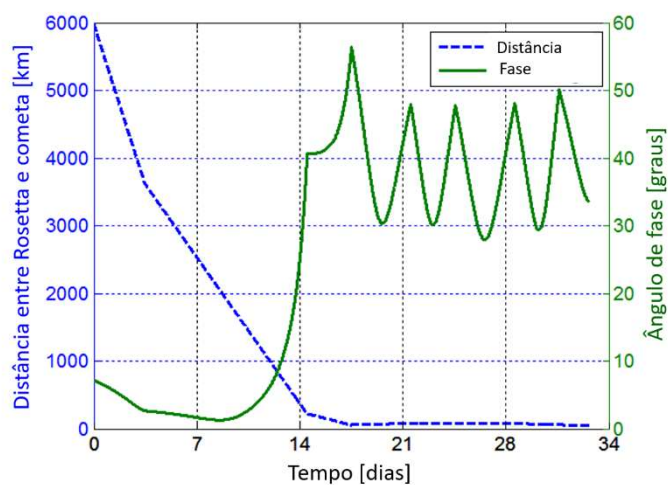
Figura 1 - Imagem NavCam ROS_CAM1_20140808T123003F.FIT do núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko adquirida em 08/08/2014 à ~80 km do cometa.



Fonte: ESA/Rosetta/NavCam. Arquivo: Geiger & Barthelemy (2015).

Os ângulos de fase das imagens variaram de aproximadamente 1° a 55° , e a distância entre o orbitador e o cometa variaram de ~6.000 a ~50 km durante o período considerado, como mostrado na figura 2.

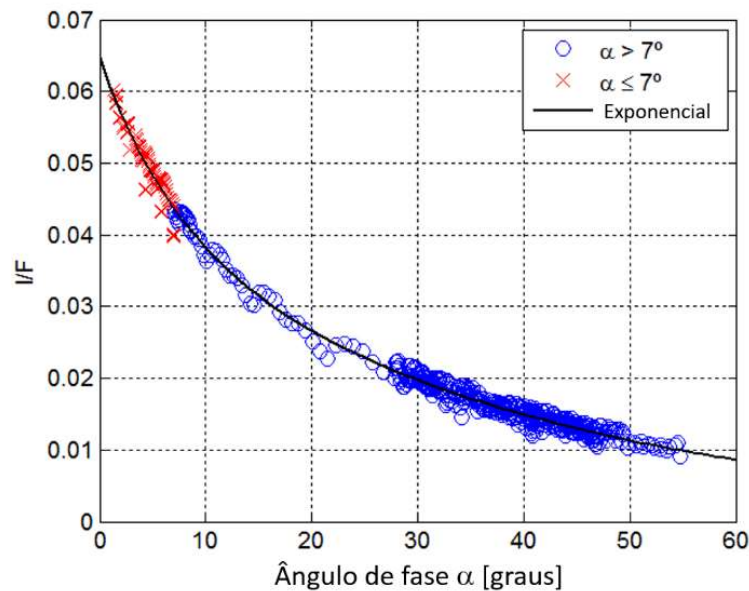
Figura 2 - Variação do ângulo de fase e da distância entre cometa e a Rosetta de 20/07/2014 em T = 0:00:00h à 22/08/2014 em T = 10:00:00h.



Fonte: autoria própria.

A refletância média (I/F) do núcleo do cometa em função do ângulo de fase é mostrada na figura 3. O procedimento detalhado para o cálculo I/F é descrito em Statella e Geiger (2017). Pode-se ver que alguns dos valores I/F são ligeiramente menores do que a tendência para ângulos de fase menores que 7° . Isso se deve às maiores distâncias entre a Rosetta e o cometa, e imagens adquiridas entre 20 e 22 de julho. Nesses casos, o núcleo do cometa era tão pequeno quanto $\sim 15 \times 15$ pixels e efeitos da função de espalhamento pontual afetaram uma quantidade relativamente maior de pixels na fronteira do núcleo. A seguir, descreve-se como a modelagem Hapke foi realizada.

Figura 3 - Reflectância média resultante de 558 imagens NavCam variando de 20/07/2014 em $T = 06:58:03$ h até 22/08/2014 em $T = 08:07:18$ h, nas quais o núcleo do cometa foi completamente enquadrado nas cenas. A curva contínua em preto mostra o ajuste de uma exponencial de dois termos aos dados.



Fonte: autoria própria.

3. MÉTODO

3.1 Ajuste de modelo de reflectância aos dados

Nesta seção, realizou-se uma estimativa de parâmetros fotométricos com base nos dados da NavCam para derivar propriedades fotométricas espectrais do núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Replicou-se o procedimento seguido por Fornasier et al. (2015), que usou dados OSIRIS. Portanto, adotou-se o modelo de Hapke (HAPKE, 2012) que estabelece um conjunto de funções úteis para descrever a contribuição do espalhamento

singular, espalhamento múltiplo, efeito de oposição e rugosidade para reproduzir teoricamente a refletância medida de um alvo. A expressão de Hapke (2012) para a refletância (ou, intensidade sobre fluxo – I/F) média do núcleo pode ser escrita como:

$$\frac{I_{\lambda}}{F_{\lambda}} = K(\alpha, \theta) \left[\left(\frac{w_{\lambda}}{8} \left[(1 + B_{SH\lambda}(\alpha)) P_{hg}(\alpha, g_{\lambda}) - 1 \right] + \frac{r_{0\lambda}}{2} (1 - r_{0\lambda}) \right) \right. \\ \left. \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \ln \left[\cot \frac{\alpha}{4} \right] \right) + \frac{2}{3\pi} r_{0\lambda}^2 (\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha) \right]. \quad (1)$$

Em que α é o ângulo de fase, λ é o comprimento de onda em que a refletância é medida, θ é o ângulo de rugosidade média, w_{λ} é o albedo de espalhamento singular, g_{λ} é o fator de assimetria, $B_{SH\lambda}(\alpha)$ é o efeito de oposição de ocultação por sombras, $P_{hg}(\alpha, g_{\lambda})$ é a função Henyey-Greenstein e r_0 é definido como (HAPKE, 2012):

$$r_{0\lambda} = \frac{1 - \sqrt{1 - w_{\lambda}}}{1 + \sqrt{1 - w_{\lambda}}}. \quad (2)$$

A qual é uma função do albedo de espalhamento singular w_{λ} . O efeito de oposição de ocultação por sombras $B_{SH\lambda}(\alpha)$ é dado por (HAPKE, 2012):

$$B_{SH\lambda}(\alpha) = \frac{B_0}{1 + \frac{\tan(\alpha / 2)}{h_s}}. \quad (3)$$

Em que h_s e B_0 são, respectivamente, a largura e amplitude do efeito de oposição de ocultação por sombras. O termo $K(\alpha, \theta)$ na equação (1) é a função de sombra, escrita como (HAPKE, 2012):

$$K(\alpha, \theta) = \exp \left[-0.32\theta \left(\tan \theta \tan \frac{\alpha}{2} \right)^{1/2} - 0.52\theta \tan \theta \tan \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (4)$$

Para a função de fase de partículas adotou-se a função Henyey-Greenstein, escrita como:

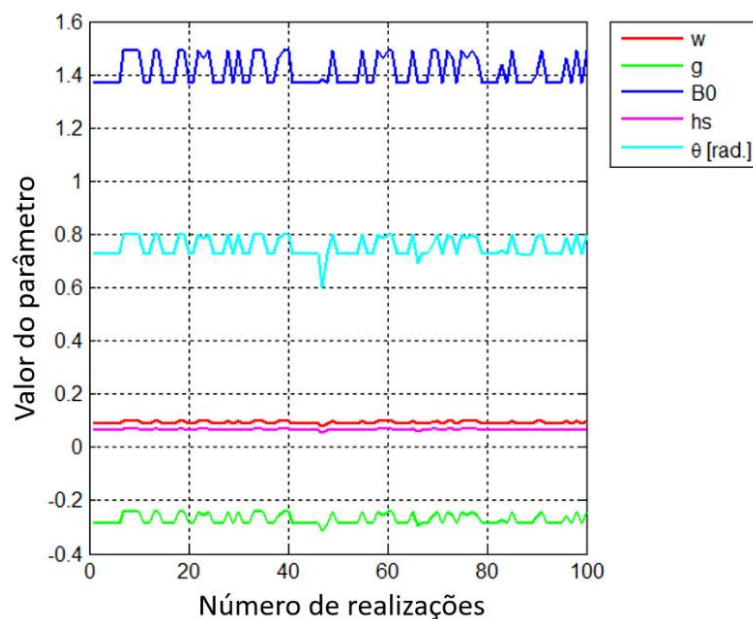
$$P_{hg}(\alpha, g_\lambda) = \frac{(1 - g_\lambda^2)}{(1 + 2g_\lambda \cos \alpha + g_\lambda^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas equações (1) a (5), procurou-se resolver as funções de Hapke para cinco parâmetros, que são, g_λ , w_L , ℓ , B_0 e h_s . A fim de modelar os dados NavCam observados de acordo com a expressão de Hapke, escolheu-se aleatoriamente 100 condições iniciais para cada parâmetro e, em seguida, aplicou-se uma função multivariável não linear restrita usando o algoritmo de ponto interior e procurou-se o mínimo global entre as observações e as estimativas ajustadas. As condições iniciais, bem como as estimativas, foram restringidas dentro dos limites $w_L=[0,02, 0,10]$, $g_L=[-1,00, 1,00]$, $B_0 = [0,20, 1,50]$, $h_s=[0,00, 0,50]$ e $\ell=[5^\circ, 90^\circ]$, conforme usado por Fornasier et al. (2015).

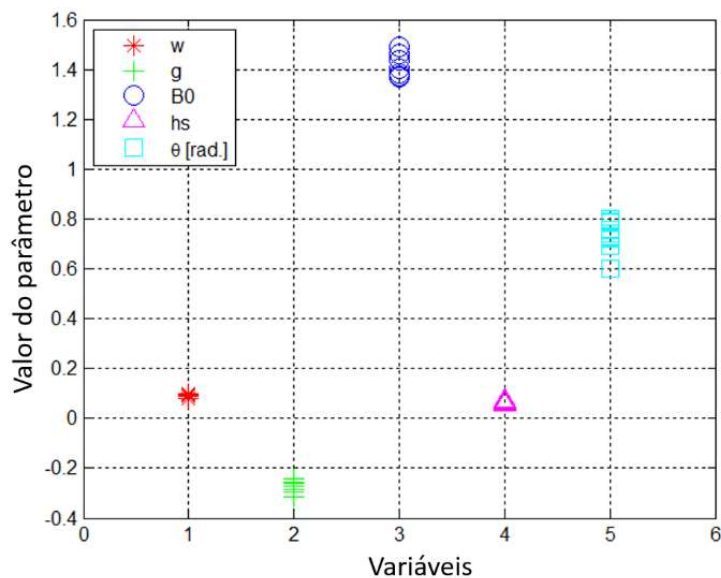
Na figura 4, mostra-se a variação do valor de cada parâmetro em função das realizações. O parâmetro ℓ é mostrado em radianos para fornecer uma escala mais compatível para representação junto com os outros parâmetros. Na figura 5, mostra-se a dispersão de cada parâmetro após 100 realizações. Escolheu-se a melhor solução entre as 100 realizações como sendo aquela que retornou o menor valor de χ^2 quando comparada com os pontos de dados de refletância calculados das imagens NavCam. O desvio padrão de cada parâmetro foi calculado a partir da dispersão entre as soluções de cada realização. Os resultados são apresentados na Tabela 1, na qual também são apresentados os valores obtidos por Fornasier et al. (2015) a partir de imagens OSIRIS centradas no filtro de comprimento de onda de 700 nm.

Figura 4 - Variação dos parâmetros w_L , g_L , B_0 , h_s e ℓ . O ângulo médio de rugosidade é dado em radianos. As condições iniciais, bem como as estimativas, foram restringidas dentro dos limites: $w_L=[0,02, 0,10]$, $g_L=[-1,00, 1,00]$, $B_0 = [0,20, 1,50]$, $h_s=[0,00, 0,50]$ e $\ell=[5^\circ, 90^\circ]$.



Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Dispersão de cada parâmetro após 100 realizações.



Fonte: autoria própria.

Na Tabela 1, o albedo de espalhamento singular de partícula (w_l) tem um valor muito semelhante ao encontrado em Fornasier et al. (2015) para o filtro Hydra da OSIRIS. A estimativa para o fator assimétrico foi menor, e o valor $\sim -0,2$ indica uma pequena quantidade de retroespalhamento, no entanto, como g_l é próximo de zero, há razões para acreditar que em 720 nm, e na escala das imagens NAVCAM utilizadas, o núcleo apresenta um comportamento

do tipo isotrópico. Além disso, em todas as iterações, o fator assimétrico nunca indicou um espalhamento direto (embora o intervalo de pesquisa tenha sido $[-1,00, 1,00]$), como é mostrado na figura 6. O aumento de oposição de ocultação de sombra foi semelhante para NavCam e OSIRIS, apesar de uma amplitude maior. O ângulo de inclinação média da rugosidade θ dos cálculos foi de $\sim 46^\circ$ (variando de 40° a 46° na maioria das vezes), enquanto o encontrado por Fornasier et al. (2015) foi de $\sim 43^\circ$. Essa diferença pode ser devida ao fato de que os dados neste trabalho foram um pouco melhor restringidos com observações para α variando de $\sim 1,3^\circ$ a $\sim 60^\circ$ (os dados usados por Fornasier et al. (2015) tinham $1,3^\circ \leq \alpha \leq 54^\circ$). Nas presentes estimativas, todos os parâmetros de Hapke se mostraram mais precisos, ou seja, com menor desvio padrão em todos os casos.

Tabela 1 - Parâmetros do modelo de Hapke obtidos a partir da NavCam, banda centrada em 720 nm, e OSIRIS, banda centrada em 700 nm (estes últimos estimados por Fornasier et al. (2015)).

Instrumento	w	g	B_0	h_s	([deg.]
OSIRIS	0,089	-0,30	1,42	0,047	43,40
(700 nm)	$\pm 0,011$	$\pm 0,04$	$\pm 0,11$	$\pm 0,011$	$\pm 7,00$
NAVCAM	0,0993	-0,2431	1,4914	0,0708	45,86
(720 nm)	$\pm 0,0045$	$\pm 0,0201$	$\pm 0,0564$	$\pm 0,0039$	$\pm 2,17$

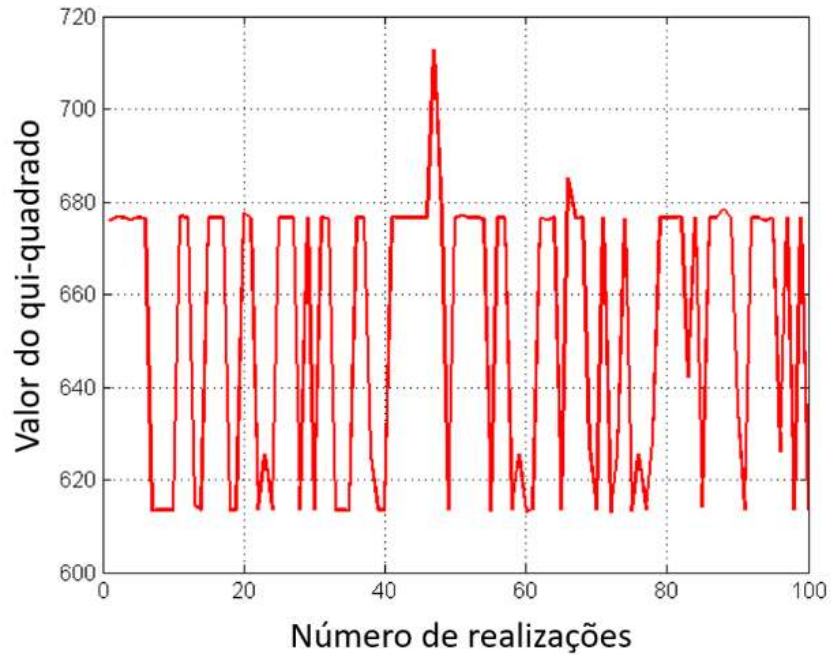
Fonte: autoria própria.

Na figura 6 mostra-se a variação do valor de χ^2 (valor mínimo de ~ 600) para as 100 realizações. O valor de χ^2 foi calculado usando a seguinte equação:

$$\chi^2 = \sum \frac{(Mod - Obs)^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

Em que Mod é a reflectância modelada usando os parâmetros de Hapke estimados, Obs é a reflectância calculada a partir das imagens NavCam e σ^2 é uma estimativa do erro nos cálculos de reflectância observadas pela câmera de navegação. Na equação (6) assume-se o valor $\sigma^2 = 0,001^2$ (STATELLA & GEIGER, 2017).

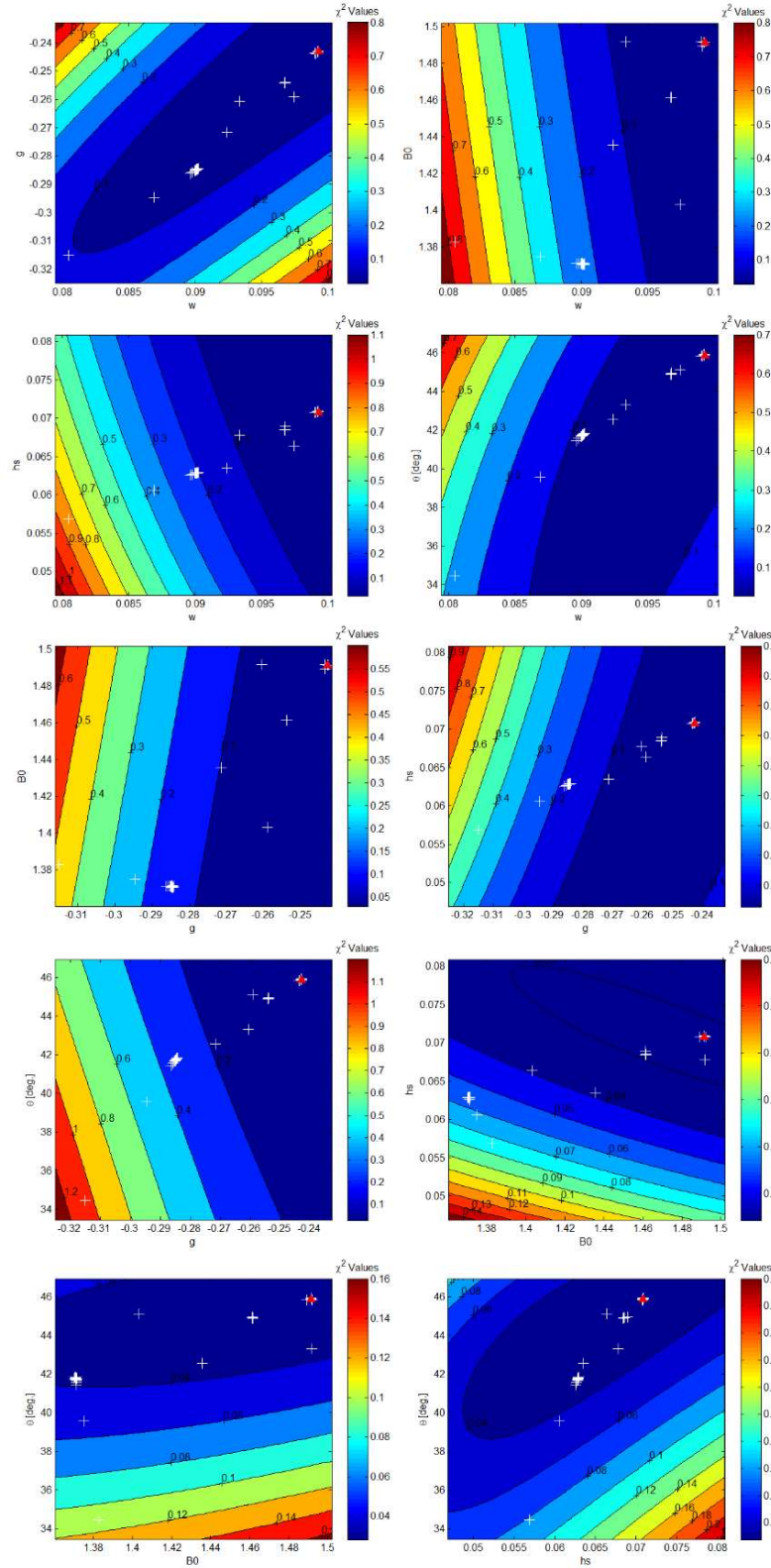
Figura 6 - Variação do valor χ^2 para 100 realizações.



Fonte: autoria própria.

Em seguida, a fim de representar graficamente a covariância entre os parâmetros estimados das 100 realizações, foram fixados três parâmetros entre os valores estimados (w_L , g_L , B_0 , h_s , λ) e calculados o ajuste de χ^2 como uma função dos dois parâmetros restantes. Na figura 7, exibem-se gráficos de contorno para os seguintes pares: (w_L , g_L), (w_L , B_0), (w_L , h_s), (w_L , λ), (g_L , B_0), (g_L , h_s), (g_L , λ), (B_0 , h_s), (B_0 , λ) and (h_s , λ).

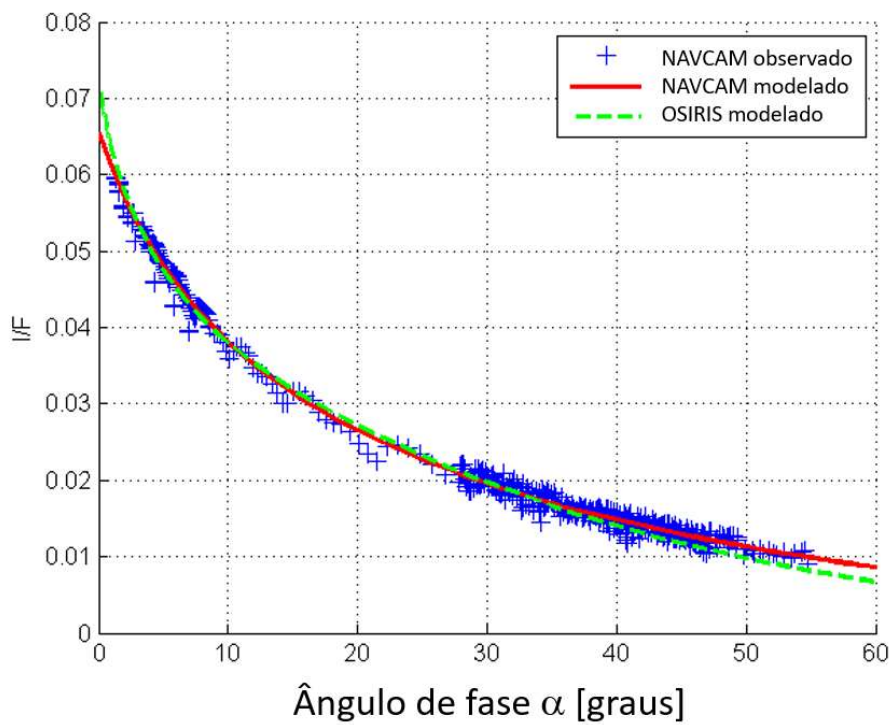
Figura 7 - Gráficos de contorno para os seguintes pares: (w_L, g_L) , (w_L, B_0) , (w_L, h_s) , (w_L, θ) , (g_L, B_0) , (g_L, h_s) , (g_L, θ) , (B_0, h_s) , (B_0, θ) and (h_s, θ) . As cruzes brancas marcam a variação em cada um dos parâmetros para as 100 realizações. Os triângulos vermelhos marcam o melhor ajuste para cada um dos pares de parâmetros.



Fonte: autoria própria.

Na figura 8 exibe-se a reflectância (I/F) média para o núcleo, calculada a partir de imagens NavCam (pontos de dados em azul), a I/F modelada por Hapke para OSIRIS (linha verde tracejada, cujos parâmetros foram estimados por Fornasier et al. (2015)) e a I/F calculada a partir do modelo de Hapke para NavCam (linha vermelha, para a qual foram usados os parâmetros estimados dados na Tabela 1) como uma função do ângulo de fase α .

Figura 8 - Comparação entre a reflectância média da NavCam (cruzes azuis), reflectância modelada para a OSIRIS (linha verde pontilhada) e reflectância modelada para NavCam (linha vermelha) em função do ângulo de fase. Para o gráfico das reflectâncias modeladas para a NavCam foram utilizados os parâmetros de Hapke escolhidos a partir do teste ².



Fonte: autoria própria.

O Albedo geométrico (calculado para o ângulo de fase $\alpha = 0^\circ$), obtido a partir dos parâmetros estimados, é 0,0672. O albedo bolométrico, segundo Hapke (2012) pode ser escrito como:

$$A_{bond} \approx r_0 \left(1 - \frac{1-r_0}{6} \right). \quad (7)$$

Em que r_0 foi definido na equação (2).

O albedo bolométrico resultante com base na refletância NavCam é 0,02. Para efeito de comparação, os Albedos geométricos para o núcleo do cometa calculados a partir de observações VIRTIS e de observações OSIRIS, ambos em 700 nm, são, respectivamente, $0,077 \pm 0,002$ (CIARNIELLO et al., 2015) e $0,072 \pm 0,003$ (FORNASIER et al., 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de cometas é importante porque eles são amostras da composição inicial do sistema solar e podem ajudar a esclarecer como a Terra se formou e se desenvolveu, e como a vida no planeta pode ter surgido. Análises de fotometria por sensoriamento remoto podem fornecer dados sobre a composição e estrutura desses corpos celestes por meio de análises espectrais.

Neste trabalho utilizou-se um conjunto de 558 imagens NavCam, cujos números digitais (DN) foram convertidos em radiância e refletância por Statella e Geiger (2017) para estimar as propriedades fotométricas do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Para fazer isso, aplicou-se a teoria estabelecida por Hapke para modelar a resposta (I/F) média do núcleo do cometa. Seguiu-se o procedimento aplicado por Fornasier et al. (2015), que usou dados OSIRIS. Os resultados obtidos são muito semelhantes, fornecendo uma visão das propriedades fotométricas do núcleo do cometa, como o albedo de espalhamento singular, que representa a probabilidade de espalhamento quando os fótons atingem as partículas no meio, e o ângulo de inclinação da rugosidade média. A partir dos parâmetros estimados, pode-se calcular propriedades de refletância importantes do alvo, a saber, o albedo geométrico ($\sim 0,07$) e o albedo bolométrico (0,02). Além disso, o modelo pode ser usado para prever a I/F do alvo para um determinado ângulo de fase.

6. REFERÊNCIAS

- CIARNIELLO, M. et al. *Photometric properties of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from VIRTIS-M onboard Rosetta*. **Astronomy and Astrophysics**, v. 583, p. 1-14, 2015.
- FELDMAN, P. et al. *Measurements of the near-nucleus coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko with the Alice far-ultraviolet spectrograph on Rosetta*. **Astronomy and Astrophysics**, v. 583, n. A8, p. 1-15, 2015.
- FORNASIER, S. et al. *Spectro-photometric properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko's nucleus from the OSIRIS instrument onboard the Rosetta spacecraft*. **Astronomy and Astrophysics**, n. 583, p. 1-18, 2015.

GEIGER, B.; BARTHELEMY, M. **ROSETTA ORBITER NAVCAM PRELANDING MTP006, RO-C-NAVCAM-2-PRL-MTP006-V1.0**. ESA Planetary Science Archive and NASA Planetary Data System, 2015.

GRÜN, E. et al. *The 2016 Feb 19 outburst of comet 67P/CG: an ESA Rosetta multi-instrument study*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 462. edição suplementar 1, p. S220-S234, 2016.

HAPKE, B. **Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy**. Cambridge: Cambridge University Press, USA, 2012

KELLER, H.U. et al. *OSIRIS-The Scientific Camera System onboard Rosetta*. **Space Science Reviews**, v. 128, p. 1-4, 2007.

STATELLA, T.; GEIGER, B. *Cross-calibration of the Rosetta Navigation Camera based on images of the 67P comet nucleus*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 469, p. 285-294, 2017.

VINCENT, J. et al. *Summer fireworks on comet 67P*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 462, p. 184-194, 2016.