



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE MATEMÁTICA E CIÊNCIAS NATURAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Viviane Figueiredo Peixoto

Estudo da Geologia dos Pequenos Corpos do Sistema Solar

Trabalho de Conclusão de Curso

Rio de Janeiro

2023



Viviane Figueiredo Peixoto

Estudo da Geologia dos Pequenos Corpos do Sistema Solar

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de geóloga.

Orientadores: Dr. José Carlos Sícoli Seoane (UFRJ)

Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo (ON)

Dr. Bruno Eduardo Morgado (OV/UFRJ)

Rio de Janeiro

2023

Peixoto, Viviane Figueiredo

Estudo da Geologia dos Pequenos Corpos do Sistema Solar. / Viviane Figueiredo Peixoto – Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, 2023.

68 f.

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2023.

Orientadores: José Carlos Sícoli Seoane; Julio Ignacio Bueno de Camargo; Bruno Eduardo Morgado.

1. Geologia Planetária. 2. Fotometria. 3. Ocultação Estelar. 4. Albedo.

Viviane Figueiredo Peixoto

Estudo da Geologia dos Pequenos Corpos do Sistema Solar

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de geóloga.

Dr. José Carlos Sícoli Seoane (UFRJ)

Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo (ON)

Dr. Bruno Eduardo Morgado (OV/UFRJ)

Dr. Atlas Vasconcelos Corrêa Neto (UFRJ)

Dra. Diana Paula de Pinho Andrade (OV/UFRJ)

Rio de Janeiro

2023

*“Cada dia me enamoro mais e mais pelas montanhas...
E se meus estudos permitissem, eu passaria dias inteiros sobre os montes para contemplar,
naquele ar puro, a Grandeza do Senhor!”*

– Beato Pier Giorgio

Agradecimentos

Agradeço e dedico este trabalho e os quatro anos de Iniciação Científica que nele resultaram a Deus, que com tanta sabedoria e bondade criou tudo o que cada geólogo se orgulha tanto de estudar. Ele esteve presente em todos os momentos da minha graduação, me sustentando com seu braço forte e me fazendo continuar. Foi impossível, durante esses cinco anos, estudar a criação sem me maravilhar cada vez mais com o Criador!

Agradeço também a minha família, pelo apoio incessante que me forneceu desde o início. Obrigada por entenderem minha ausência quando eu tinha que estudar e, principalmente, por acreditarem em mim quando eu mesma não consegui. Agradeço aos meus pais por serem exemplos de bons profissionais. Se me dediquei durante toda a minha trajetória foi porque vocês me ensinaram a ser assim. Obrigada por sempre me motivarem e por sempre estarem ao meu lado. Espero que se orgulhem de mim tanto quanto me orgulho de vocês.

Agradeço aos meus orientadores de Iniciação Científica Julio Camargo e Bruno Morgado, que tanto me ensinaram e apoiaram nesses últimos anos. Obrigada por terem me dado uma chance e me mostrado o caminho. Agradeço também ao professor Cainho, por ter aceitado me orientar neste TCC e a todos professores do departamento de Geologia da UFRJ, por provarem que o ensino público de qualidade existe e persiste.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho. De forma especial, agradeço ao Grupo de Astrometria do Rio, pelo suporte, incentivo, apoio nas apresentações e pela companhia nas noites de observação.

Também agradeço aos meus amigos de Petrópolis por me darem motivo para rir e por me ensinarem a rir sem motivo também. Obrigada pela amizade, pelos rolês e pelas conversas.

Por fim, agradeço de todo coração àqueles que permaneceram comigo (em ordem alfabética para eu não ter problemas): Aisha, Arthur, Casado, Danyel, Davi, Diego, Leandro, Leo, Lucas, Luciano e Marllon. Sou muito grata por cada aula, trabalho, campo, prova, almoço, circular, chopp de vinho, baralhos e vitórias que pudemos compartilhar. Vocês tornaram a minha graduação mais leve e mais prazerosa e agora é impossível pensar nesses últimos 5 anos sem lembrar de vocês. Sou grata por ter dividido esse pedacinho do tempo geológico com vocês e espero continuar dividindo o máximo possível. Afinal, a Geologia é um mundo pequeno... E ainda bem.

Resumo

PEIXOTO, V. F. **Estudo da Geologia dos Pequenos Corpos do Sistema Solar**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. 68p.

Os Pequenos Corpos do Sistema Solar são todos aqueles objetos que não se enquadram nas definições de planeta, planeta-anão e satélite dadas pela União Astronômica Internacional. Entre as diferentes classes de pequenos corpos foram estudados neste trabalho os objetos do Cinturão de *Kuiper* (KBOs), os Centauros e, de forma mais aprofundada, os Troianos de Júpiter. Com o intuito de conhecer melhor as características superficiais desses objetos, foram utilizados os dados provenientes do *Dark Energy Survey* (DES) e, para os troianos (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys, dados de ocultações estelares. A partir dos dados do DES, foi calculada a magnitude absoluta para os objetos estudados, que auxiliaram na sua classificação taxonômica. Os KBOs e os Centauros foram separados em 4 classes: BB, BR, IR e RR, que representam, respectivamente, objetos com cores desde neutras até mais avermelhadas em comparação ao Sol, como consequência do material que apresentam em suas superfícies. Objetos do tipo BB são aqueles com as mais significativas proporções de gelo, enquanto que os do tipo RR apresentam pequenas quantidades de H₂O e CH₄, comumente apresentando tolina. As classes BR e IR são as intermediárias, sendo que esta última parece conter espectros de silicatos hidratados. Como resultado dessa classificação, dos 97 objetos classificados, 33 pertencem ao grupo BB, 30 ao grupo BR, 24 ao IR e 10 são do grupo RR. Já os objetos Troianos foram divididos em 3 classes: C, V e S, sendo C a classe tipicamente de cor mais escura e de baixa refletividade e S a mais brilhante e reflexiva. Como resultado dessa classificação, dos 117 asteroides Troianos observados pelo DES e para os quais foram calculadas as magnitudes absolutas, 70 são do tipo C e 47, do tipo S. Asteroides do tipo C apresentam misturas de gelo e matéria orgânica e minerais como filossilicatos máficos. Já os asteroides do tipo S costumam apresentar ferro e níquel metálicos em suas superfícies e são caracterizados por uma ampla variedade mineral, podendo incluir olivina, piroxênio e plagioclásio. Para aqueles objetos que foram observados em eventos de ocultação estelar, foi possível estimar os valores de raio equatorial e achatamento. Tais valores, combinados com as magnitudes absolutas estimadas, foram usados para o cálculo do albedo geométrico. O valor de albedo calculado para o troiano (5638) Deikoon na banda *g* é de 0.0577 ± 0.0129 , para o (12929) Periboea, 0.0395 ± 0.0020 e o albedo do objeto (58931) Palmys é 0.0312 ± 0.0007 . Esses valores encontrados estão dentro do esperado para as classes às quais pertencem cada um desses objetos.

Palavras-chave: Geologia Planetária; Fotometria; Ocultação Estelar; Albedo

Abstract

The Small Bodies of the Solar System are all objects that do not fit the definitions of planets, dwarf planets, and satellites given by the International Astronomical Union. Among the different classes of small bodies, this study focused on objects in the Kuiper Belt (KBOs), Centaurs, and, in more detail, Jupiter's Trojans. In order to better understand the surface properties of these objects, data from the Dark Energy Survey (DES) were used, and for the trojans (5638) Deikoon, (12929) Periboea, and (58931) Palmys, occultation data were utilized. From the DES data, the absolute magnitude for the studied objects was calculated, aiding in their taxonomic classification. KBOs and Centaurs were separated into 4 classes: BB, BR, IR, and RR, representing objects with colors ranging from neutral to more reddish compared to the Sun, as a result of the material on their surfaces. BB objects have the highest proportions of ice, while RR types have small amounts of H₂O and CH₄, commonly containing tholins. BR and IR classes are intermediate, with the latter seemingly containing spectra of hydrated silicates. As a result of this classification, out of the 97 classified objects, 33 belong to the BB group, 30 to the BR group, 24 to the IR group, and 10 to the RR group. Trojan objects were divided into 3 classes: C, V, and S, with C being the typically darker and less reflective class, and S being the brightest and most reflective. From the 117 Trojan asteroids observed by DES and for which absolute magnitudes were calculated, 70 are of type C, and 47 are of type S. C-type asteroids have mixtures of ice, organic matter, and minerals such as mafic phyllosilicates. S-type asteroids typically exhibit metallic iron and nickel on their surfaces and are characterized by a wide variety of minerals, including olivine, pyroxene, and plagioclase. For objects observed in stellar occultation events, it was possible to estimate the values of equatorial radius and flattening. These values, combined with estimated absolute magnitudes, were used to calculate the geometric albedo. The calculated albedo value for the trojan (5638) Deikoon in the g-band is 0.0577 ± 0.0129 , for (12929) Periboea, it is 0.0395 ± 0.0020 , and the albedo of object (58931) Palmys is 0.0312 ± 0.0007 . These values are within the expected range for the classes to which each of these objects belongs.

Keywords: Planetary Geology; Photometry; Stellar Occultation; Albedo

Lista de Figuras

Figura 1: Desenhos da Lua feitos por Galileu Galilei contidos no livro <i>Siderus Nuncius</i> , 1610. Fonte: Rossi (2018).....	14
Figura 2: Dois grandes cinturões de pequenos corpos orbitam o Sol: o primeiro entre as órbitas de Marte e Júpiter (painel superior) e o segundo fora da órbita de Netuno (painel inferior). As órbitas realizadas pelos objetos de cada população são regidos por ressonâncias orbitais com os gigantes gasosos vizinhos. As localizações de tais ressonâncias de movimento médio são indicadas pelas linhas verticais cinzas. Modificado de Vita-Finzi (2013).....	16
Figura 3: Região observada pelo DES. Fonte: Dark Energy Survey.....	18
Figura 4: Valores de reflectância compreendidos em cada um dos grupos BB, BR, IR e RR, sendo BB aqueles com reflectância mais neutra em relação ao Sol e RR, as mais vermelhas...	21
Figura 5: Locais dos quais foi feita ao menos uma observação de ocultação estelar em colaboração com o grupo de pesquisa.....	23
Figura 6: Exemplos de curvas de luz provenientes de ocultações estelares: uma positiva (a) e outra negativa (b).....	24
Figura 7: Exemplo de cordas positivas (em azul) e negativas (em vermelho) projetadas no plano do céu (a) e elipse ajustada nas cordas positivas (b).....	25
Figura 8: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (5638) Deikoon analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecção negativa.....	27
Figura 9: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (12929) Periboea analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecção negativa.....	28
Figura 10: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (58931) Palmys analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecção negativa.....	30
Figura 11: Quantidade de medidas por banda para os KBOs e Centauros.....	32

Figura 12: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os KBOs.....	33
Figura 13: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os Centauros.....	34
Figura 14: Quantidade de medidas por banda para os Troianos.....	35
Figura 15: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os Troianos.....	36
Figura 16: Agrupamento, com utilização das cores g-r, g-i e g-z, obtida com o algoritmo PAM para observações realizadas com o DES. Os grupos BB, BR, IR e RR estão representados 1, 2, 3 e 4, respectivamente.....	37
Figura 17: Distribuição de cada classe taxonômica para os KBOs e Centauros.....	38
Figura 18: Distribuição de cada classe taxonômica para os Troianos.....	40
Figura 19: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 23-02-2019.....	41
Figura 20: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 10-04-2020.....	41
Figura 21: Melhor elipse ajustada para os dois eventos de ocultação estelar pelo troiano (5638) Deikoon. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em tons de azul.....	42
Figura 22: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 20-04-2019.....	43
Figura 23: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 30-07-2022.....	43
Figura 24: Melhor elipse ajustada para os dois eventos de ocultação estelar pelo troiano (12929) Periboea. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em azul.....	44
Figura 25: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 14-04-2021.....	45
Figura 26: Elipse ajustada para o evento de ocultação estelar em 14-04-2021.....	45
Figura 27: Ajustes das cordas positivas normalizadas dos eventos de 2022.....	46
Figura 28: Melhor elipse ajustada para os eventos de ocultação estelar de 2022 pelo troiano (58931) Palmys. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em azul.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Quantidade de objetos observados pelo DES em cada uma das classes estabelecidas pelo SkyBoT.....	19
Tabela 2: Informações sobre os eventos de ocultação por (5638) Deikoon, incluindo a data do evento, o local de onde foi observado, o nome dos observadores, suas coordenadas em DMS.S, o equipamento e a natureza da detecção.....	26
Tabela 3: Informações sobre os eventos de ocultação por (12929) Periboea.....	28
Tabela 4: Informações sobre os eventos de ocultação por (58931) Palmys.....	29
Tabela 5: Magnitudes absolutas calculadas em diferentes bandas para os troianos (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys.....	36
Tabela 6: Coluna (1): Identificação do objeto. Coluna (2): Classificação obtida neste trabalho utilizando o algoritmo PAM. Coluna (3): Classificação oriunda de BARUCCI <i>et al.</i> (2005). Coluna (4): Classificação oriunda de PERNA <i>et al.</i> (2010).....	38
Tabela 7: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (5638) Deikoon.....	42
Tabela 8: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (5638) Deikoon.....	42
Tabela 9: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (12929) 1999 TZ1.....	44
Tabela 10: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (12929) 1999 TZ1.....	44
Tabela 11: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (58931) Palmys.....	47
Tabela 12: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (58931) Palmys.....	48
Tabela 13: Valores de albedo calculados para os troianos (5628) Deikoon, (12929) Palmys e (58931) Periboea.....	49
Tabela 14: Valores de albedo esperados para os objetos de cada classe taxonômica (modificado de Usui, 2013).....	50

Lista de Anexos

Anexo A: Main belt asteroids taxonomical information from Dark Energy Survey data.....56

Anexo B: Year six astrometric and photometric measurements of known TNOs and Centaurs by DES.....68

Sumário

1. Introdução	14
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos	17
2. Metodologia e Dados	18
2.1 Dark Energy Survey - DES	18
2.1.1 KBOs e Centauros	20
2.1.2 Troianos	22
2.2 Ocultações Estelares	22
2.2.1 (5638) Deikoon	25
2.2.2 (12929) Periboea	28
2.2.3 (58931) Palmys	29
2.3 Albedo	31
3. Resultados	32
3.1 Magnitudes Absolutas	32
3.1.1 KBOs e Centauros	32
3.1.2 Troianos	35
3.2 Classificação Taxonômica	37
3.2.1 KBOs e Centauros	37
3.2.2 Troianos	39
3.3 Ocultações Estelares	41
3.3.1 (5638) Deikoon	41
3.3.2 (12929) Periboea	43
3.3.3 (58931) Palmys	45
3.4 Albedo	49
4. Conclusão	51
Referências	53
Anexo A	56
Anexo B	68

1. Introdução

A Geologia Planetária é uma área interdisciplinar que combina conhecimentos da geologia, astronomia, física, química e outras áreas científicas para estudar as características e processos geológicos que ocorrem em corpos celestes, como planetas, satélites, asteroides e cometas.

O nascimento da Geologia Planetária como disciplina está fortemente associado ao surgimento da Astronomia como ciência, com o advento do telescópio, no início do século XVII. Sendo o objeto extraterrestre mais próximo da Terra, a Lua foi o primeiro corpo planetário a ser observado através de uma óptica geológica (Figura 1), a partir da qual os objetos deixam de ser intangíveis, mas se mostram repletos de materiais e processos semelhantes aos observados aqui na Terra.

A Geologia tem como objeto de estudo superfícies sólidas, o que reduz o número de objetos do Sistema Solar que podem ser estudados dentro desse âmbito, mas não drasticamente. Exceto pelos gigantes gasosos, todos os objetos do nosso sistema podem ser estudados geologicamente, por meio de sensoriamento remoto ou operações *in-situ* de coleta de amostras. O clássico estudo por meio do trabalho de campo só foi conduzido até o momento na Lua, com as bem-sucedidas missões Apollo.

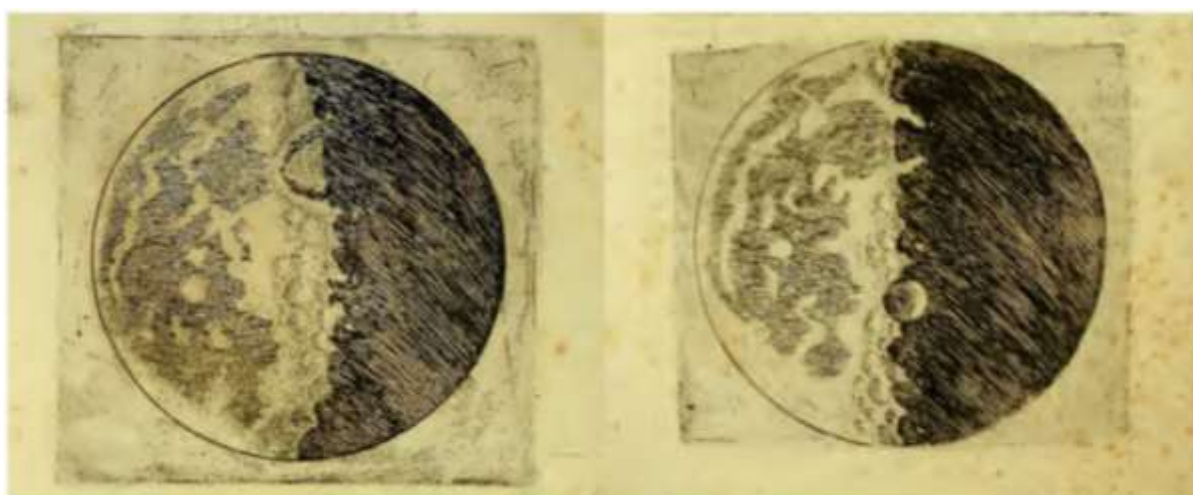


Figura 1: Desenhos da Lua feitos por Galileu Galilei contidos no livro *Sidereus Nuncius*, 1610.

Fonte: Rossi (2018).

A União Astronômica Internacional, em sua resolução B5 de 2006 (Assembly, 2006), atualizou as definições dos objetos que compõem o Sistema Solar. De acordo com essa resolução, para que um objeto seja considerado um planeta, ele deve:

- (a) orbitar o Sol;
- (b) ter massa suficiente para atingir um equilíbrio hidrostático, assumindo uma forma arredondada;
- (c) ter “limpado” a vizinhança nos arredores de sua órbita.

Caso um objeto cumpra com os dois primeiros requisitos, mas não com o terceiro, ele será considerado um planeta-anão (a partir dessa resolução, Plutão deixou de ser considerado um dos planetas do Sistema Solar e recebeu o título de planeta-anão). Todos os outros objetos do Sistema Solar, com exceção dos satélites, são os chamados Pequenos Corpos do Sistema Solar (*Small Solar-System Bodies – SSSB*), que são o alvo desta pesquisa.

Com isso, atualmente o Sistema Solar consiste de oito planetas, cinco planetas-anões, mais de 200 satélites e mais de 1.302.900 objetos classificados como pequenos corpos¹ (quantidade que aumenta a cada dia).

Os pequenos corpos são divididos em diferentes classes dinâmicas, com base nas características de suas órbitas. Neste trabalho, três delas são mais profundamente estudadas: os Troianos de Júpiter, o Cinturão de *Kuiper* (KBOs) e os Centauros (Figura 2).

Os Troianos de Júpiter consistem em uma numerosa classe de asteroides que se distribuem nos pontos Lagrangianos L_4 e L_5 do planeta gigante. Atualmente, há mais de 12.600 troianos conhecidos¹ e, por terem sido capturados por Júpiter durante sua migração e apresentarem órbitas estáveis por bilhões de anos, são objetos importantes para os modelos de formação e evolução do Sistema Solar (Zhang & Michel, 2021).

Os KBOs fazem parte de uma população maior de pequenos corpos conhecida como objetos transnetunianos (TNOs), ou seja, objetos que estão além da órbita de Netuno. Os KBOs, em particular, fazem parte de um cinturão localizado a cerca de 30 a 50 UA do Sol. Já os Centauros apresentam órbitas mais espalhadas (entre Júpiter e Netuno), com tempo de vida médio da ordem de alguns milhões de anos (ou seja, são órbitas instáveis). Por se encontrarem a distâncias heliocêntricas muito grandes, essas duas classes dinâmicas são mais difíceis de se observar, ao mesmo tempo que, justamente por se encontrarem tão distantes do Sol, eles preservam muitas informações sobre o disco protoplanetário (Sheppard, 2006).

¹ Informação extraída de: [IAU Minor Planet Center](#) em Julho de 2023.

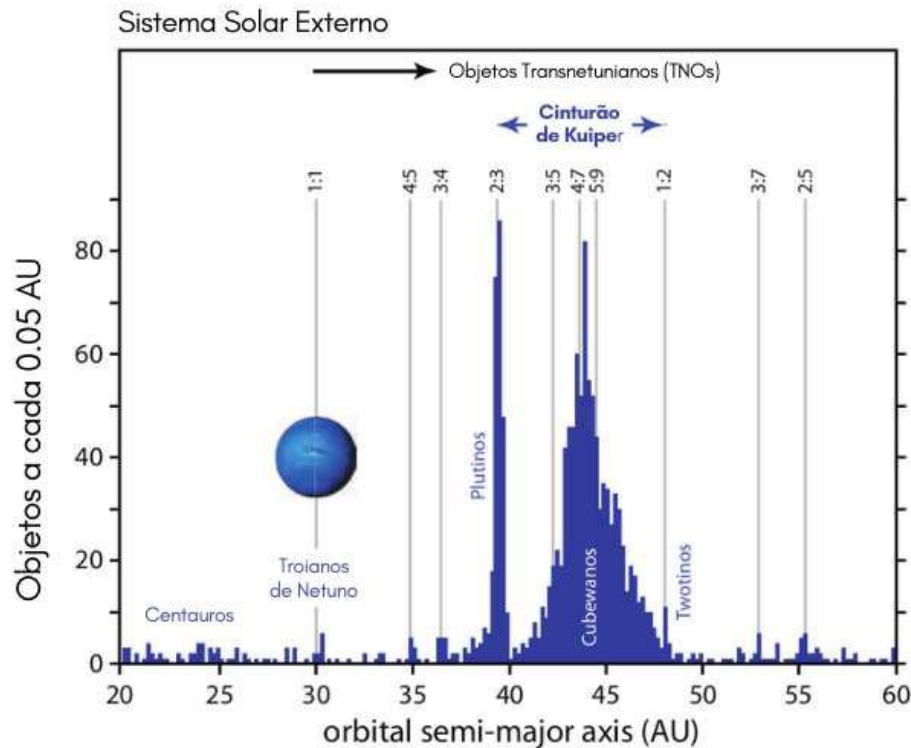
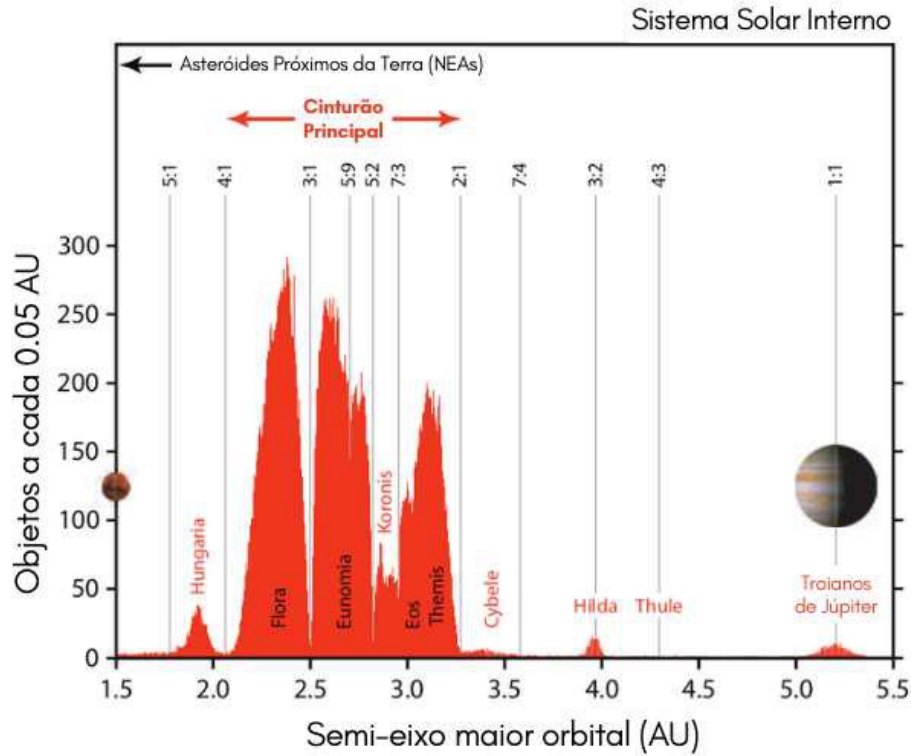


Figura 2: Dois grandes cinturões de pequenos corpos orbitam o Sol: o primeiro entre as órbitas de Marte e Júpiter (painel superior) e o segundo fora da órbita de Netuno (painel inferior). As órbitas realizadas pelos objetos de cada população são regidos por ressonâncias orbitais com os gigantes gasosos vizinhos. As localizações de tais ressonâncias de movimento médio são indicadas pelas linhas verticais cinzas. Modificado de Vita-Finzi (2013).

1.1 Justificativa

Os pequenos corpos são os objetos do Sistema Solar que menos apresentam traços de evolução térmica, química e tectônica quando comparados com os planetas e os grandes satélites. Dessa forma, eles são considerados “fósseis” que guardam características dos estágios iniciais do nosso sistema planetário (Tsiganis, 2010).

Com isso, um estudo aprofundado sobre as populações de pequenos corpos pode resultar em respostas sobre a origem e a evolução do Sistema Solar (Hestroffer *et al.*, 2019), obtendo-se informações sobre como os planetas e outros grandes objetos se formaram e evoluíram ao longo do tempo.

Além disso, cada corpo individual tem suas particularidades geológicas, o que inclui crateras de vários tamanhos e profundidades, rochas de diferentes tamanhos e morfologias, lineamentos, fraturas, assinaturas de deslizamentos de terra, terraços e cumes (Zhang & Michel, 2021). Tais características geológicas ainda não foram exploradas por completo, havendo a necessidade de melhor compreender o seu significado nas superfícies de baixa gravidade nas quais estão presentes.

1.2 Objetivos

A partir do exposto, este trabalho tem como objetivo geral a utilização de diferentes dados astronômicos para o estudo da geologia (morfologia e composição superficial) dos pequenos corpos do Sistema Solar, com ênfase nos Troianos de Júpiter, nos objetos do Cinturão de *Kuiper* (KBOs) e nos Centauros.

Para cada uma dessas classes, a depender dos dados disponíveis para cada objeto, como objetivos específicos, estão:

- O cálculo das magnitudes absolutas (magnitude observada compensada pela distância do objeto e pelo ângulo de fase) a partir de dados fotométricos;
- A separação desses objetos em classes taxonômicas, visando uma correlação entre classe e composição superficial;
- A redução de dados provenientes de ocultações estelares, a fim de estimar o tamanho e forma do objeto;
- Utilizar os dados fotométricos e os resultados das ocultações estelares de forma complementar para estimar valores de albedo (medida que descreve a capacidade de uma superfície de refletir a luz solar).

2. Metodologia e Dados

Neste capítulo estão descritas as metodologias aplicadas aos diferentes tipos de dados. Primeiramente, o tópico 2.1 é referente aos dados do Dark Energy Survey (DES) e o mesmo encontra-se subdividido em sub tópicos para cada classe dinâmica estudada. No tópico 2.2, está detalhada a redução dos dados de ocultação estelar para os três troianos aqui estudados e, por fim, no tópico 2.3, há detalhes sobre como foi obtido o albedo desses objetos.

2.1 Dark Energy Survey - DES

Parte dos dados utilizados neste trabalho são provenientes do *Dark Energy Survey* - DES (Flaugher, 2005). O DES é um levantamento astronômico que, tendo por objetivo estudar a natureza da energia escura e determinar a sua evolução ao longo do tempo, realizou observações cobrindo 5 mil graus quadrados do hemisfério sul celeste (Dark Energy Survey Collaboration *et al.*, 2016), como mostra a Figura 3. Para isso, foi utilizada uma câmera de campo amplo acoplada ao *Blanco*, um telescópio de 4 metros de diâmetro localizado no Chile. Esse levantamento, realizado de 2013 até 2019, foi feito em 5 diferentes filtros (*grizY*) e totalizou 758 noites de observação, durante as quais muitos objetos foram observados.

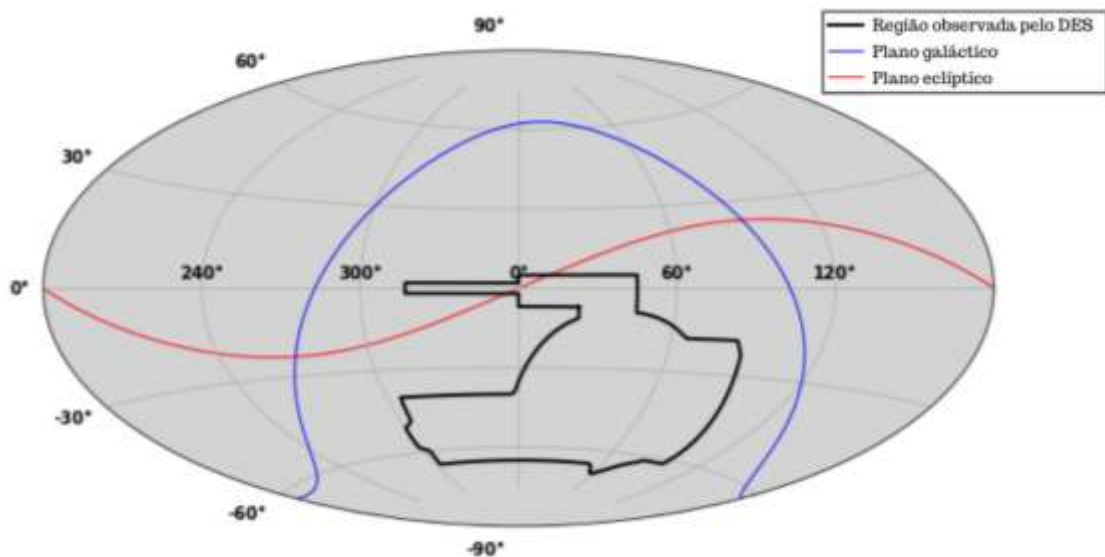


Figura 3: Região observada pelo DES. Fonte: Dark Energy Survey.

Um primeiro passo nesta etapa do trabalho foi identificar todos os pequenos corpos conhecidos do Sistema Solar presentes nas imagens do DES. Para isso, foi utilizado o SkyBoT (Berthier *et al.*, 2006), um serviço desenvolvido pelo Observatório de Paris que serve

principalmente para buscar e identificar objetos do Sistema Solar presentes em imagens astronômicas. Por meio dessa ferramenta, que necessita de informações das imagens obtidas pelo DES, tornou-se possível conhecer quais objetos estavam presentes em cada imagem, possibilitando, assim, a organização desses objetos com base em suas respectivas classes dinâmicas. De maneira geral, o SkyBoT funciona da seguinte forma: fornecemos localização do telescópio, data e hora da observação, coordenadas de apontamento e tamanho do campo de visada. O SkyBoT, então, nos retorna todos os objetos conhecidos do Sistema Solar presentes na região observada.

A fim de organizar tais objetos e aplicar a melhor metodologia para estudar cada um deles, eles foram separados conforme suas características orbitais. Como o SkyBoT foi a ferramenta utilizada para identificar os pequenos corpos observados pelo DES, consequentemente, a classificação dinâmica desses objetos implementada é aquela fornecida pelo próprio SkyBoT². O critério de classificação utilizado por essa ferramenta leva em consideração as características das órbitas dos pequenos corpos, dividindo-os nas seguintes classes: objetos próximos da Terra (NEOs), objetos cujas órbitas atravessam a órbita de Marte (Mars-Crossers), família Hungaria, Cinturão Principal de Asteroides, Troianos, Centauros, objetos do Cinturão de Kuiper (KBOs) e Cometas. A partir disso, obtivemos a identificação de cerca de 350.000 objetos, presentes em mais de 4.000.000 das imagens geradas pelo DES.

A partir da identificação dos objetos observados pelo DES e da sua organização nas classes dinâmicas definidas pelo SkyBoT, encontrou-se o seguinte levantamento:

Tabela 1: Quantidade de objetos observados pelo DES em cada uma das classes estabelecidas pelo SkyBoT.

Classe dinâmica	Número de objetos observados
Cinturão Principal	320.202
Hungaria	10.694
NEOs	8.176
Mars-Crossers	7.505
Troianos	1.321
KBOs	758
Cometas	422
Centauros	129
Total:	349.207

² <https://ssp.imcce.fr/webservices/skybot/>

Como mencionado, de todos os objetos observados pelo DES, este projeto destinou-se a estudar aqueles pertencentes às classes dos Troianos, dos KBOs e dos Centauros. Para essas classes, foi calculada a magnitude absoluta (magnitude observada quando o objeto encontra-se a uma unidade astronômica (ua³) do Sol e do observador e com ângulo de fase igual a zero) para bandas que apresentassem três ou mais medidas.

Tal cálculo foi feito utilizando-se a equação I:

$$H = m - 5 \log R\Delta - \alpha\beta \quad (I)$$

Onde H é a magnitude absoluta, m é a magnitude observada, R e Δ são, respectivamente, as distâncias heliocêntrica e topocêntrica do objeto no momento da observação, α é o ângulo de fase e β é o coeficiente angular (inclinação de fase) da relação ($\alpha, m - 5 \log R\Delta$).

Calculamos H e β por meio do método dos mínimos quadrados, uma vez que os valores de m , R , Δ e α são obtidos da observação e da posição astrométrica do corpo no instante da observação.

O cálculo das magnitudes absolutas para os objetos dessas duas classes por meio de uma relação linear é justificado pela presença de intervalos pequenos de ângulo de fase ($< \sim 5$ graus) que tais objetos apresentam por estarem a grandes distâncias da Terra e do Sol (Hughes, 2003; Szabó *et al.*, 2007).

Um outro resultado que pode-se alcançar a partir dos dados do DES é a classificação taxonômica dos objetos observados. Para isso, a metodologia utilizada para os KBOs e Centauros foi diferente daquela aplicada para os Troianos (e também para objetos do Cinturão Principal), como descrito nas subseções 2.1.1 e 2.1.2.

2.1.1 KBOs e Centauros

Para esses objetos, a classificação taxonômica foi feita com base em índices de cor. Por conta da irregularidade das observações e por conta da rotação de cada objeto, não teria sido prudente a determinação de tais índices a partir de magnitudes observadas, visto que não há como garantir que tenham sido obtidas nas mesmas fases rotacionais. Uma alternativa para essa situação foi, portanto, a determinação de índices de cor a partir das magnitudes absolutas em diferentes filtros.

³ 1 ua = 149.597.870,7 km

Dessa forma, para os objetos com medidas suficientes para serem determinadas pelo menos 3 cores — $g-r$, $g-i$ e $g-z$ — nos foi possível agrupá-los em diferentes classes, com base na taxonomia apresentada em Fulchignoni *et al.* (2008), na qual os objetos são separados em 4 grupos: BB, BR, IR e RR. Tais classes representam objetos com cores desde neutras (BB) até mais avermelhadas (RR) em comparação ao Sol. A relação de comprimento de onda e reflectância apresentada por essas classes pode ser observada na Figura 4.

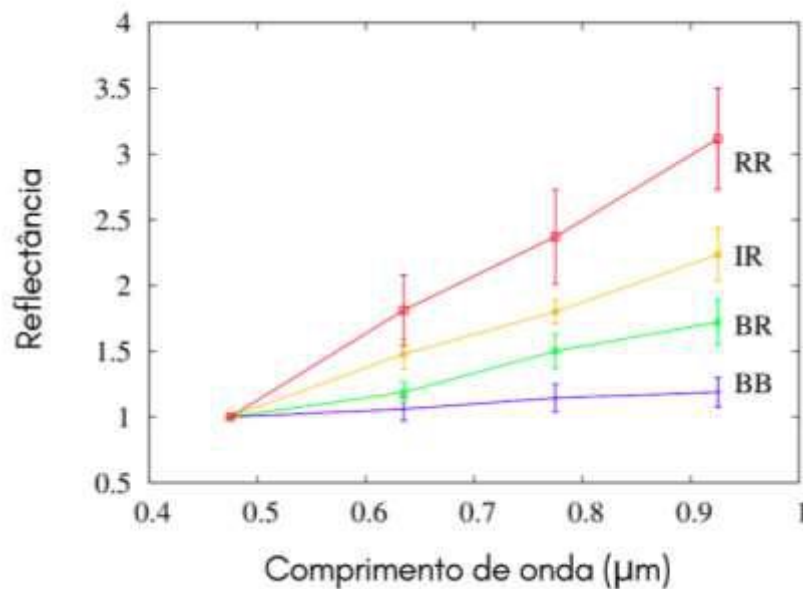


Figura 4: Valores de reflectância compreendidos em cada um dos grupos BB, BR, IR e RR, sendo BB aqueles com reflectância mais neutra em relação ao Sol e RR, as mais vermelhas.

Tal agrupamento foi feito por meio do algoritmo *Partition Around Medoids* (PAM), que é um algoritmo de agrupamento disponível no pacote R que, resumidamente, busca agrupar, a partir de um número escolhido de medóides⁴, as cores através de uma métrica específica. Espera-se, então, que objetos pertencentes a um mesmo grupo apresentem, de maneira geral, características superficiais em comum. Maiores informações sobre esta etapa do trabalho podem ser encontradas no artigo “*Year six astrometric and photometric measurements of known TNOs and Centaurs by DES*”, de Ferreira *et al.* (*in prep.*), em revisão interna pela colaboração DES e a ser submetido à *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. A primeira página deste artigo encontra-se no Anexo B.

⁴ Objeto no cluster cuja dissimilaridade média para todos os outros objetos é mínima, ou seja, é um ponto localizado mais centralmente no cluster.

2.1.2 Troianos

A classificação taxonômica utilizada para os objetos dessas classe foi feita com base na metodologia de DeMeo & Carry (2013), que os dividem em três grupos principais (C, S e V) segundo seus espectros de reflectância. Para isso, também foram utilizados índices de cor, calculados a partir dos dados do DES. Os asteroides pertencentes ao complexo C são tipicamente de cor mais escura e de baixa refletividade, enquanto os objetos do complexo S são normalmente mais brilhantes e reflexivos sendo a classe V uma classe intermediária.

Na metodologia aplicada, os objetos foram agrupados a partir de histogramas que relacionam inclinações gri com a cor $i-z$. Com os resultados obtidos, buscou-se fazer uma correlação entre as classes taxonômicas definidas e os valores de magnitude absoluta e albedo apresentados por seus integrantes.

Com isso, a ideia é então utilizar a distribuição de taxonomias de asteroides conhecidas, para fazer previsões sobre corpos ainda não classificados, utilizando métodos de aprendizagem de máquina. Mais detalhes sobre essa metodologia podem ser encontrados no artigo em anexo, “*Main belt asteroids taxonomical information from DES data*”, de Carruba *et al.* (2023), no qual essa classificação é aplicada aos asteroides do Cinturão Principal.

2.2 Ocultações Estelares

O segundo conjunto de dados explorado neste trabalho é proveniente de ocultações estelares. Ocultação estelar é uma técnica observacional na qual se adquire imagens com alta resolução temporal no momento em que um objeto passa em frente a uma estrela do ponto de vista de um dado observador. Dessa maneira, sabendo-se a velocidade e o tempo de duração do evento, é possível conhecer as dimensões e a forma do objeto ocultador.

O primeiro passo para observar uma ocultação estelar é fazer a predição do evento, ou seja, é necessário saber o momento em que o objeto ocultará determinada estrela e de quais partes do planeta espera-se que esse evento poderá ser observado. As predições das ocultações estelares observadas neste trabalho foram feitas com base nas efemérides⁵ da versão 3 do NIMA (*Numerical Integration of the Motion of an Asteroid*; Desmars *et al.*, 2015).

Uma vez conhecidas as informações sobre a ocultação, é feita uma campanha de observação, a partir da qual conta-se com a colaboração da maior quantidade de observadores possível. Atualmente, há uma rica participação de observadores amadores presentes em

⁵ Tabelas astronômicas que fornecem informações sobre a posição e os movimentos dos corpos celestes.

diversos países que, estando localizados próximos à área de interesse e possuindo o equipamento adequado para o evento, poderão se disponibilizar para observá-lo (Figura 5). Após 2021, a comunicação com esses observadores vem sendo feita pelo *Occultation Portal*⁶ (Kilic *et al.*, 2022), uma plataforma projetada para o rápido e eficiente gerenciamento centralizado de campanhas de ocultações estelares.

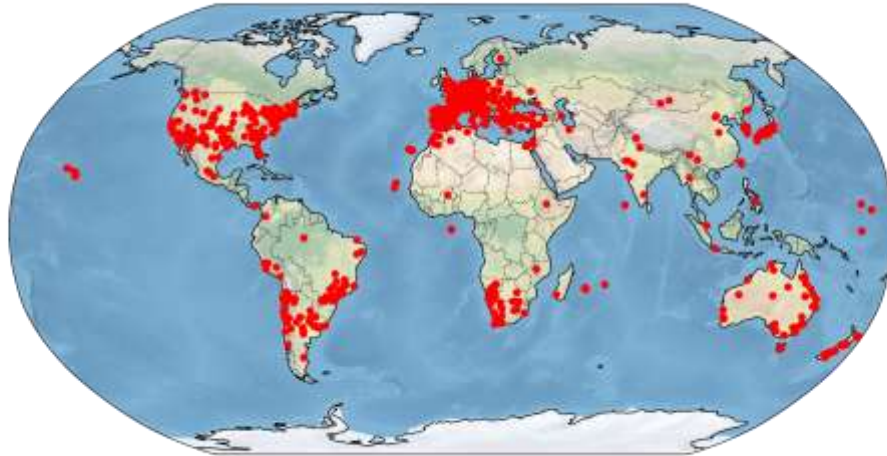


Figura 5: Locais dos quais foi feita ao menos uma observação de ocultação estelar em colaboração com o grupo de pesquisa.

A partir dos dados enviados pelos observadores, é feita uma fotometria, por meio do PRAIA (Plataforma de Redução Automática de Imagens Astronômicas; Assafin *et al.*, 2023), gerando uma curva de luz. Essa curva de luz mostra o fluxo relativo da estrela ocultada, em função do tempo. Aqui, o fluxo relativo é a razão entre o fluxo da estrela a ser ocultada e o fluxo de uma estrela de referência no mesmo campo de observação. As curvas de luz nas quais a estrela tenha sido efetivamente ocultada (isto é, que apresenta uma queda no fluxo observado durante alguns instantes) recebem o nome de “curvas positivas” enquanto que as outras curvas são chamadas de “curvas negativas” (Figura 6).

⁶ <https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/>

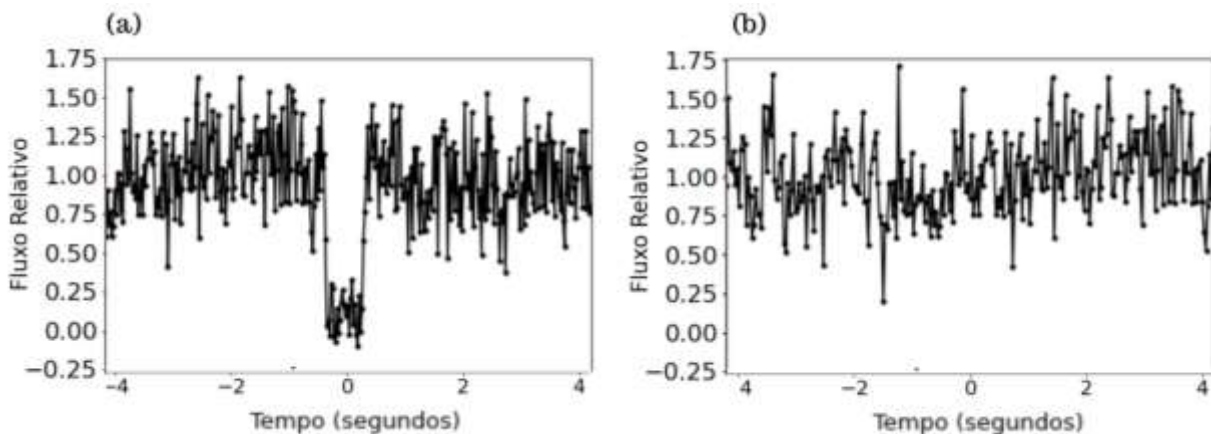


Figura 6: Exemplos de curvas de luz provenientes de ocultações estelares: uma positiva (a) e outra negativa (b).

A análise dessas curvas de luz inclui a determinação dos instantes de imersão e emersão da estrela ocultada (no caso de curvas positivas), que permitem estimar a duração de tempo do evento e projetar estes instantes no plano do céu, criando o que é chamado de uma corda (levando em consideração as distâncias entre o objeto, a Terra e o tamanho angular da estrela ocultada na distância do objeto ocultador). A partir de duas ou mais cordas positivas, é feito o ajuste de uma elipse, que será utilizada para estimar as dimensões e a forma do objeto projetados no plano do céu no momento da ocultação (Figura 7). As cordas negativas podem, por implicarem em limitação às dimensões do corpo ocultador, ser usadas na eliminação de possíveis elipses ajustadas, tornando os resultados mais precisos. Esta etapa da redução dos dados foi feita por meio da ferramenta SORA (*Stellar Occultations Reduction and Analysis*; Gomes-Júnior *et al.* 2022), um pacote Python que permite analisar ocultações estelares.

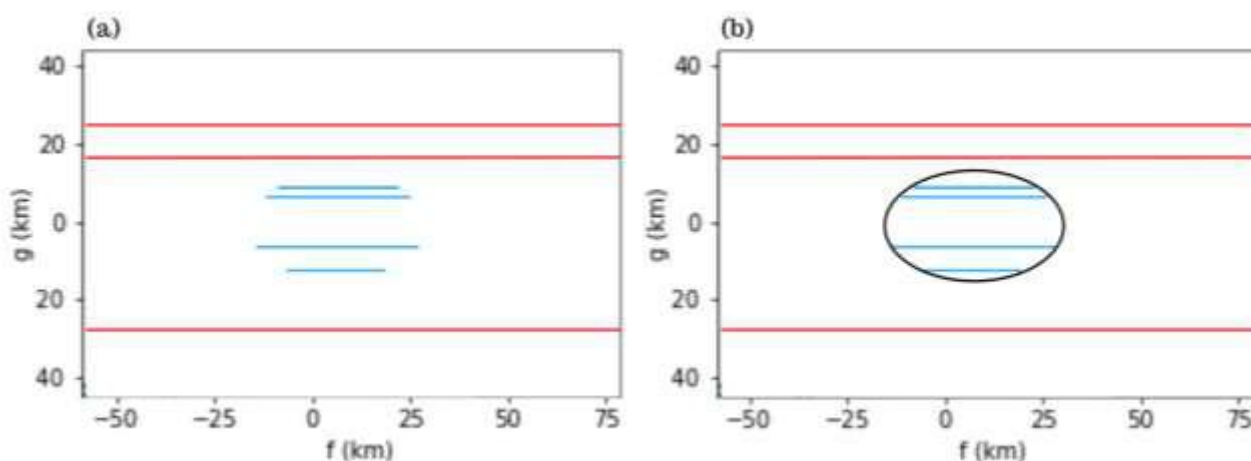


Figura 7: Exemplo de cordas positivas (em azul) e negativas (em vermelho) projetadas no plano do céu (a) e elipse ajustada nas cordas positivas (b).

De todos os objetos observados pelo DES, três troianos foram estudados neste trabalho também pela técnica das ocultações estelares: (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys. Cada um desses objetos foi observado em ao menos duas ocultações estelares com cordas positivas. A seguir, encontram-se alguns dados gerais sobre esses troianos, assim como as principais informações sobre cada um dos eventos de ocultação estelar analisados neste trabalho.

2.2.1 (5638) *Deikoon*

Descoberto em outubro de 1988, o (5638) Deikoon está localizado no ponto Lagrangiano L_5 de Júpiter. Foram observadas duas ocultações estelares por este troiano, uma em 2019 e outra em 2020, cujos detalhes encontram-se na Tabela 2 e na Figura 8.

Tabela 2: Informações sobre os eventos de ocultação por (5638) Deikoon, incluindo a data do evento, o local de onde foi observado, o nome dos observadores, suas coordenadas em DMS.S (grau, minuto, segundo), o equipamento e a natureza da detecção. Em alguns casos, a informação não foi fornecida pelo observador, sendo indicada por “n/a” (*not available*).

Data	Local	Observador	Latitude Longitude Altitude (m)	Telescópio (mm) Câmera	Tempo de exposição (s)	Detecção
23/02/2019	Estorninhos, Portugal	W. Beisker	37 12 30.7 -07 36 52.3 148	270 ICX445	0.075	Negativa
	Le Grand- Pressigny, França	P. Le Cam	46 55 30.7 00 47 18.1 58	500 QHYCCD 174M	0.10	Negativa
	Seysses, França	M. Boutet	43 30 06.7 01 17 20.2 178	300 Watec 910HX	0.32	Negativa
	Mouhet, França	L. Rousselot	46 21 22.6 01 25 56.2 313	250 ZWO 1600 Pro	0.04	Positiva
	Bélesta-en- Lauragais, França	P. Andre	43 26 39.4 01 48 58.6 234	300 Watec 910HX	0.40	Negativa
	Faycelles, França	E. Frappa	44 33 55.6 01 59 08.6 327	203 n/a	n/a	Negativa
	Vars, França	A. Figer	44 34 24.5 06 40 53.1 1857	75 NIKON D850	0.27	Positiva
	Caussols, França	A. Klotz	43 45 07.3 06 55 25.1 1270	250 n/a	n/a	Negativa
	La Trinité, França	M. Conjat	43 43 32.9 07 17 59.4 350	400 ASI 174MM	0.08	Negativa
	Viroinval, Bélgica	R. Boninsegna	50 05 25.9 04 34 56.0 195	406 Watec 910HX	0.08	Negativa
	Liège, Bélgica	O. Schreurs	50 38 36.2 05 33 23.4 107	280 Watec 910HX	0.08	Negativa
	Muzzano, Suíça	A. Ossola	45 59 50.6 08 55 10.5 350	230 n/a	n/a	Negativa
Massa- Carrara, Itália	P. Baruffetti	44 01 17.0 10 07 56.7 30	300 n/a	n/a	Negativa	
Santa Maria a	M. Bachini	43 44 12.6	400	0.40	Negativa	

	Monte PI, Itália		10 40 24.4 29	DTA 260		
	Roma, Itália	C. Costa	41 56 58.4 12 25 42.8 124	200 QHYCCD 174M	n/a	Negativa
	Nandrin, Bélgica	O. Schreurs	50 31 24.8 05 26 29.5 261	406 n/a	n/a	Negativa
	Selfkant, Alemanha	C. Ellington	51 01 38.7 05 53 47.1 57	250 RunCam NEA	0.09	Positiva
	Eppstein, Alemanha	O. Kloes	50 08 17.4 08 21 50.4 256	254 n/a	n/a	Negativa
10/04/2020	Neutraubling, Alemanha	B. Kattentidt	48 59 23.1 12 12 57.3 335	279 n/a	n/a	Negativa
	Berlim, Alemanha	C. Weber	52 30 58.0 13 25 40.0 40	203 n/a	n/a	Negativa
	Valašské Meziříčí, Tchéquia	P. Zeleny	49 27 47.9 17 58 24.5 338	254 QHYCCD 174M	0.50	Positiva
	Banská Bystrica, Eslováquia	M. Harman	48 44 33.2 19 08 54.4 572	250 n/a	n/a	Positiva

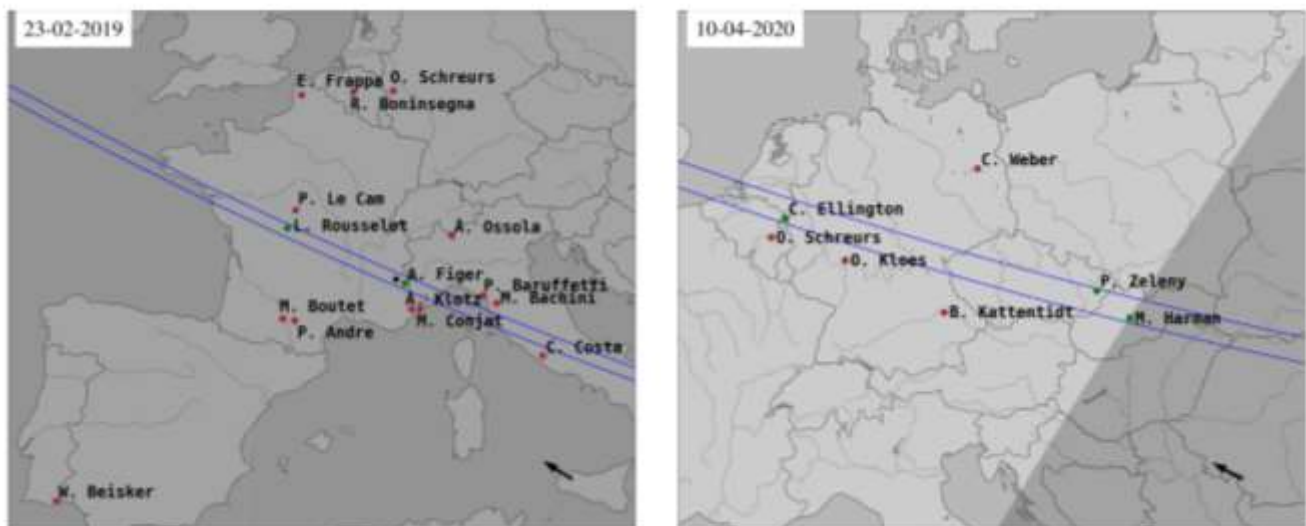


Figura 8: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (5638) Deikoon analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecção negativa.

2.2.2 (12929) Periboea

Está localizado no ponto Lagrangiano L₅ de Júpiter. Descoberto em 1999, foi inicialmente considerado um Centauro, mas foi reclassificado como Troiano posteriormente. Foram observadas duas ocultações estelares por esse objeto, em 2021 e 2022. Maiores detalhes sobre esses dois eventos podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 9.

Tabela 3: Informações sobre os eventos de ocultação por (12929) Periboea

Data	Local	Observador	Latitude Longitude Altitude (m)	Telescópio (mm) Câmera	Tempo de exposição (s)	Deteccção
20/04/2021	Regensburg, Alemanha	B. Kattentidt	48 59 23.1 12 12 57.3 335	100 Watec 910HX	0.040	Positiva
	Kaufering, Alemanha	O. Schreurs	48 5 22.7 10 50 57.9 596	406 Watec 910HX	0.160	Negativa
	Carnetin, França	Arnaud L.	48 53 55.9 2 42 19.9 110	200 QHY174M	1.500	Negativa
30/07/2022	Itajubá, Brasil	L. Liberato	-22 32 7.7 -45 34 57.5 1810.71	600 IXon	0.987	Positiva
	Campo Magro, Brasil	F. Ribas	-25 20 57.3 -49 21 55.4 1055.01	257 QHY174M	0.500	Negativa



Figura 9: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (12929) Periboea analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecccção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecccção negativa.

2.2.3 (58931) *Palmys*

Foi descoberto em 1998 e, assim como os outros dois troianos estudados neste trabalho, o (58931) *Palmys* está localizado no ponto Lagrangiano L_5 de Júpiter. Foram analisados cinco eventos de ocultação estelar por este troiano, ocorridos em 2021 e 2022, como detalhado na Tabela 4 e na Figura 10.

Tabela 4: Informações sobre os eventos de ocultação por (58931) *Palmys*

Data	Local	Observador	Latitude Longitude Altitude (m)	Telescópio (mm) Câmera	Tempo de exposição (s)	Detecção
14/04/2021	Florence, EUA	W. Thomas	33 00 54.3 -111 21 00.6 488.2	279.0 Watec 910HX	0.198	Positiva
20/07/2022	Gardnerville, EUA	J. Bardecker	38 53 23.5 -119 40 20.2 1533.73	305.0 Watec 910HX	0.267	Positiva
28/07/2022	Westport, EUA	K. Green	41 10 15.8 -73 19 39.2 88	356.0 QHY174M	0.125	Positiva
	Houston, EUA	P. Stuart	29 32 55.5 -95 2 6.5 15.8	203.2 Watec 910BD	0.267	Negativa
17/08/2022	Woodsboro, EUA	D. & J. Dunham	39 32 44.2 -77 19 33.0 142	203.0 Watec 910HX	0.640	Positiva
20/08/2022	Glenlee, Australia	S. Kerr	-23 16 10.0 150 30 1.6 53.4	304.0 Watec 910BD	0.640	Positiva

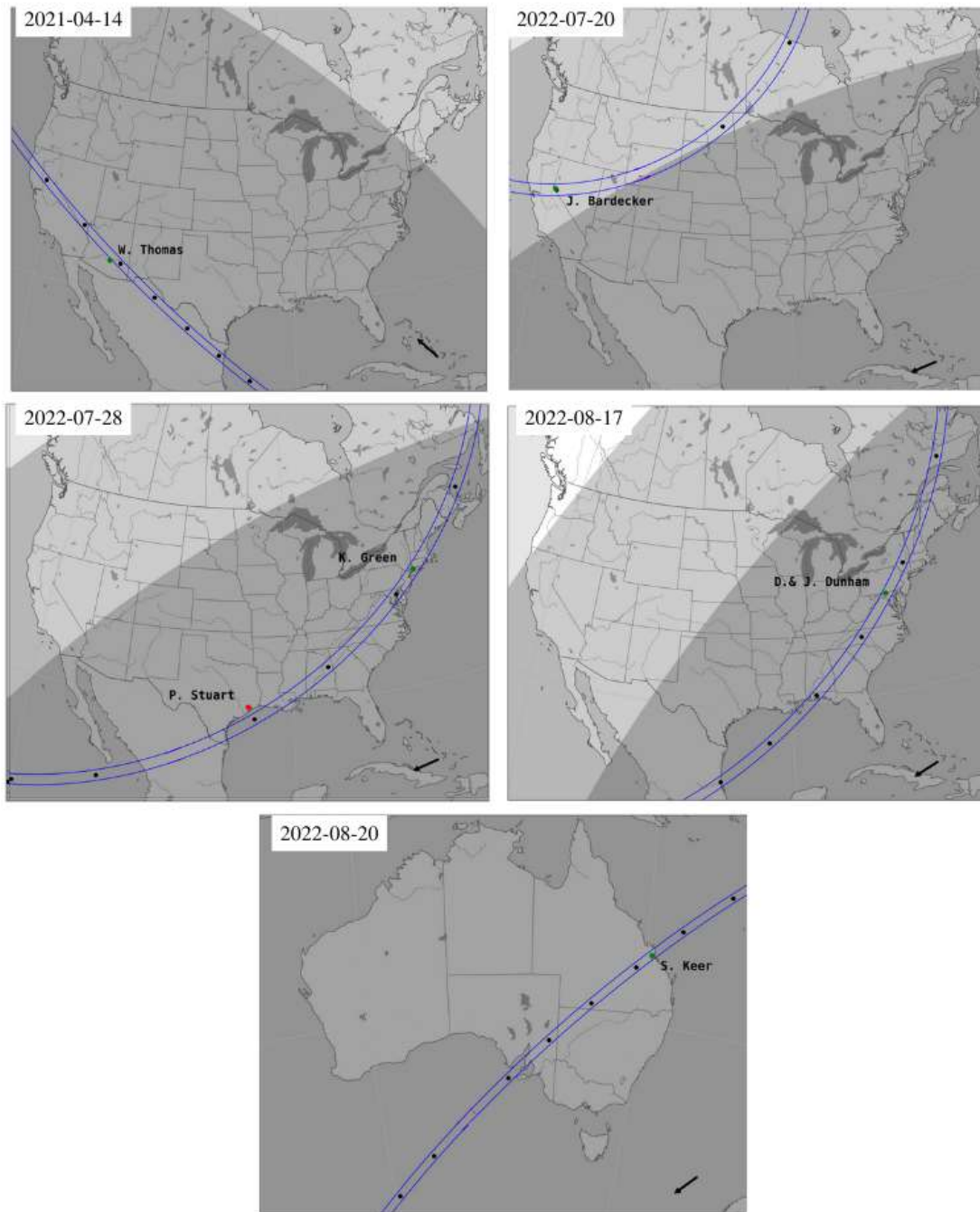


Figura 10: Trajetória da sombra das duas ocultações estelares por (58931) Palmys analisadas aqui. As linhas sólidas azuis correspondem ao tamanho aproximado do objeto. As setas mostram a direção do movimento. Os pontos verdes marcam os locais onde foram obtidos dados com detecção positiva do evento e os vermelhos, os locais que obtiveram detecção negativa.

2.3 Albedo

Uma importante medida que se pode utilizar como característica da superfície de um pequeno corpo é o albedo, que é a razão entre a luz refletida pelo objeto e a luz solar que incide sobre ele. Esse valor tem relação direta com a composição superficial do corpo estudado, podendo ser usado, por exemplo, para se fazer correlações com a assembleia mineralógica presente em sua superfície.

O albedo pode ser calculado a partir da expressão II (Morbidelli *et al.*, 2002):

$$\rho = 10^{0.4(H_{Sol} - H)} \times \left(\frac{2 AU}{D} \right)^2 \quad (II)$$

onde D é o diâmetro efetivo do corpo, H_{Sol} é a magnitude aparente do Sol numa dada banda, H é a magnitude absoluta do corpo na mesma banda, ρ é o albedo também na mesma banda e AU é a unidade astronômica em km (149.597.870,7 km). Portanto, diâmetros e magnitudes absolutas precisos levam a albedos precisos.

Como visto nos tópicos anteriores, a partir dos dados fotométricos provenientes das análises do DES, valores de magnitude absoluta (H) foram determinados. Por meio de dados de ocultações estelares, o diâmetro dos troianos (5638) Deikoon, (12929) 1999 TZ1 e (58931) Palmys foram estimados. Para esses três objetos, que foram observados tanto pelo DES quanto em ocultações estelares, pôde ser calculado o albedo.

3. Resultados

Neste capítulo apresentamos os resultados desta pesquisa. Em particular, no tópico 3.1 falamos sobre as magnitudes calculadas para os KBOs, Centauros e Troianos. A classificação taxonômica e os resultados relacionados aos eventos de ocultação estelar analisados neste trabalho estão nos tópicos 3.2 e 3.3, respectivamente. Por fim, o tópico 3.4 é referente ao albedo encontrado como explicitado no Capítulo 2.

3.1 Magnitudes Absolutas

3.1.1 KBOs e Centauros

O primeiro conjunto de resultados alcançado são as magnitudes absolutas dos KBOs e dos Centauros. Tais valores foram calculados para as bandas que atenderam aos requisitos detalhados no Capítulo 2, resultando na relação de número de magnitude absoluta calculada por banda apresentada na Figura 11.

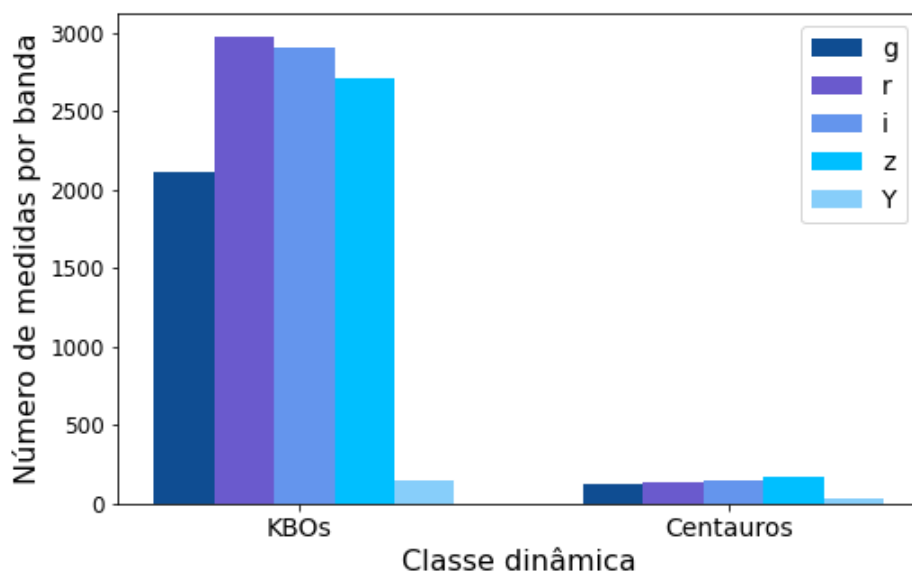


Figura 11: Quantidade de medidas por banda para os KBOs e Centauros.

Com isso, para cada banda, chegou-se a relação de quantidade de objeto por intervalo de magnitude absoluta presente nas figuras 12 (para os KBOs) e 13 (para os Centauros). Observa-se que os KBOs apresentam valores de magnitude absoluta em torno de 7.5 nas bandas *g* e *r*, enquanto que os valores são menores (< 6.5) para as outras bandas. Em relação aos

Centauros, a grande maioria dos objetos apresentam magnitude absoluta dentro do intervalo de 11 a 11.5 nas bandas *g*, *r*, *i* e *z*, sendo diferente apenas na banda *Y*, na qual os objetos apresentam, em sua maioria, valores inferiores a 6. Isso acontece por conta do pequeno número de medidas disponíveis na banda *Y* para cada objeto, como visto na Figura 10.

Dessa forma, é possível comparar os objetos dessas duas classes em relação aos valores de magnitude calculados, com os Centauros apresentando valores significativamente maiores que os KBOs. Apenas na banda *Y* o comportamento dos objetos de ambas as classes não diverge tanto (com a exceção de um Centauro 2014ON6 que apresenta magnitude absoluta de 11.605 ± 0.228 nesta banda).

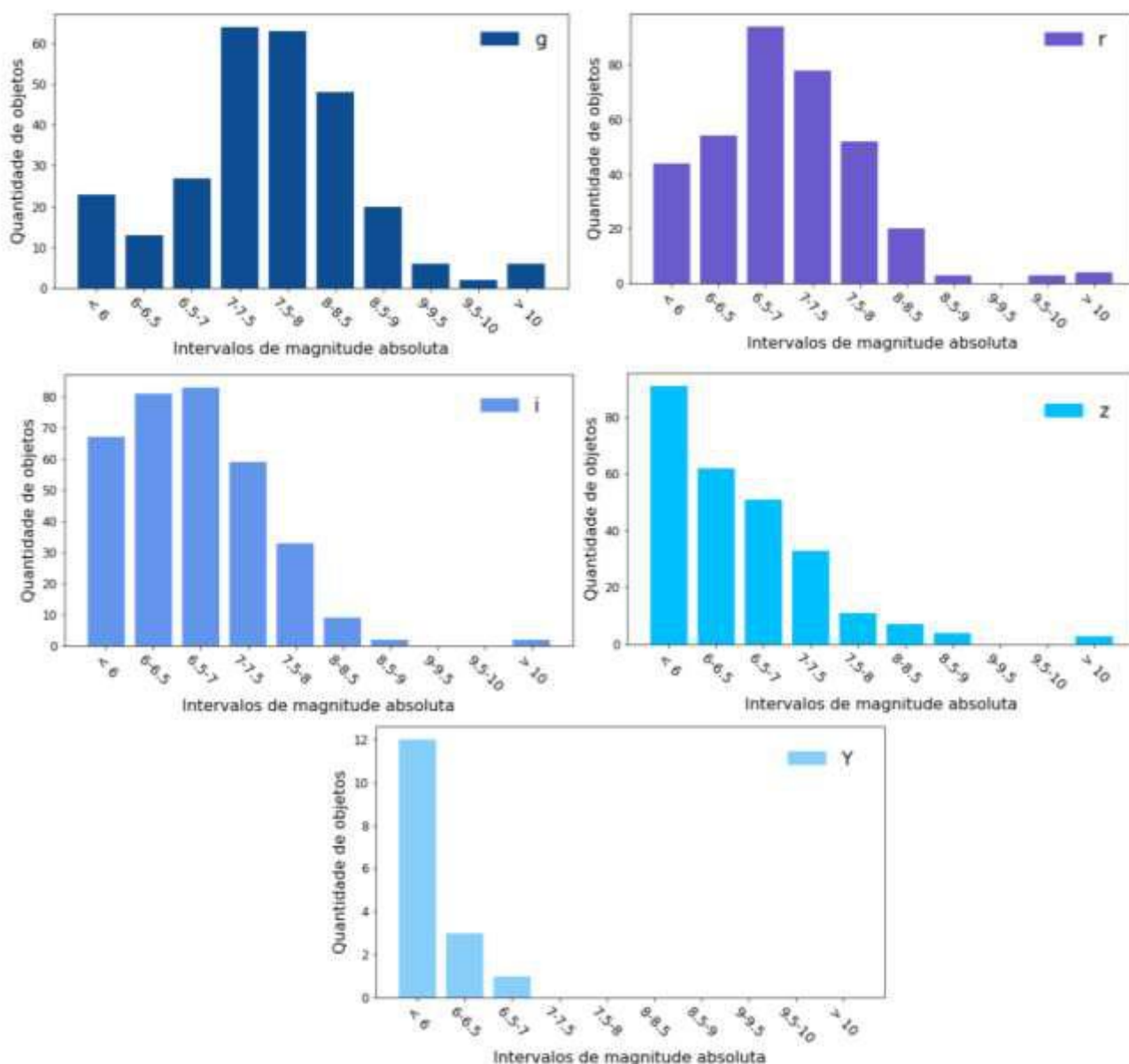


Figura 12: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os KBOs.

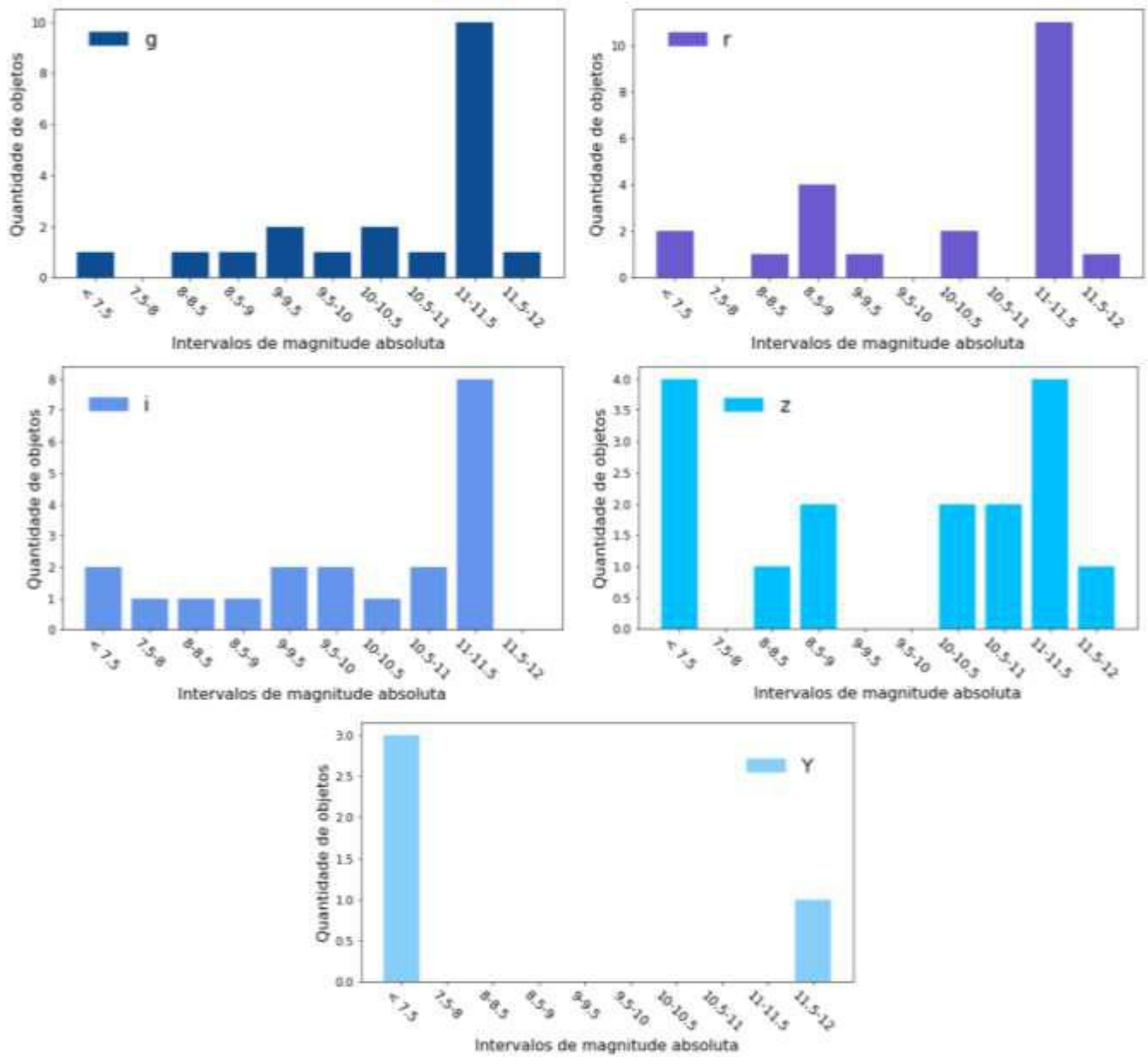


Figura 13: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os Centauros.

3.1.2 Troianos

Assim como para os KBOs e Centauros, foram calculadas as magnitudes absolutas para os objetos troianos. Na Figura 14 pode ser observada a relação de número de magnitude absoluta calculada por banda, e na Figura 15 encontra-se a relação de quantidade de objeto por intervalo de magnitude absoluta calculada, na qual observa-se que a maioria dos objetos dessa classe apresentam, em todas as cinco bandas, magnitudes absolutas dentro do intervalo de 11 a 11.5.

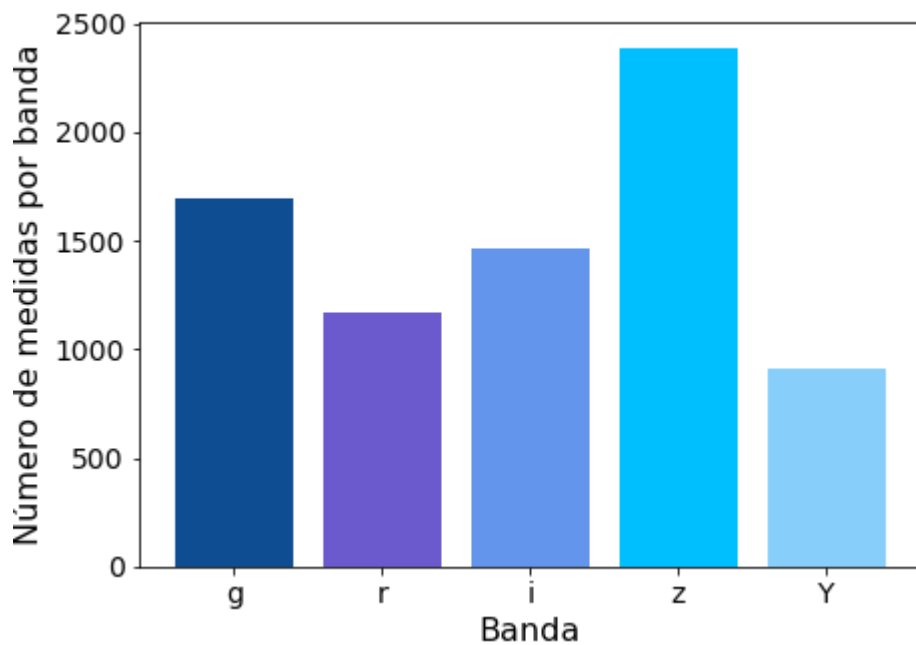


Figura 14: Quantidade de medidas por banda para os Troianos.

Na Tabela 5, foram explicitados os valores de magnitude absoluta calculados para os três troianos para os quais também tratamos dados de ocultações estelares, cujos resultados encontram-se no tópico 3.3. No caso desses três objetos, os valores de magnitude absoluta foram utilizados também para o cálculo do albedo, como explicado no subtópico 2.3 e com os resultados apresentados neste capítulo (tópico 3.4).

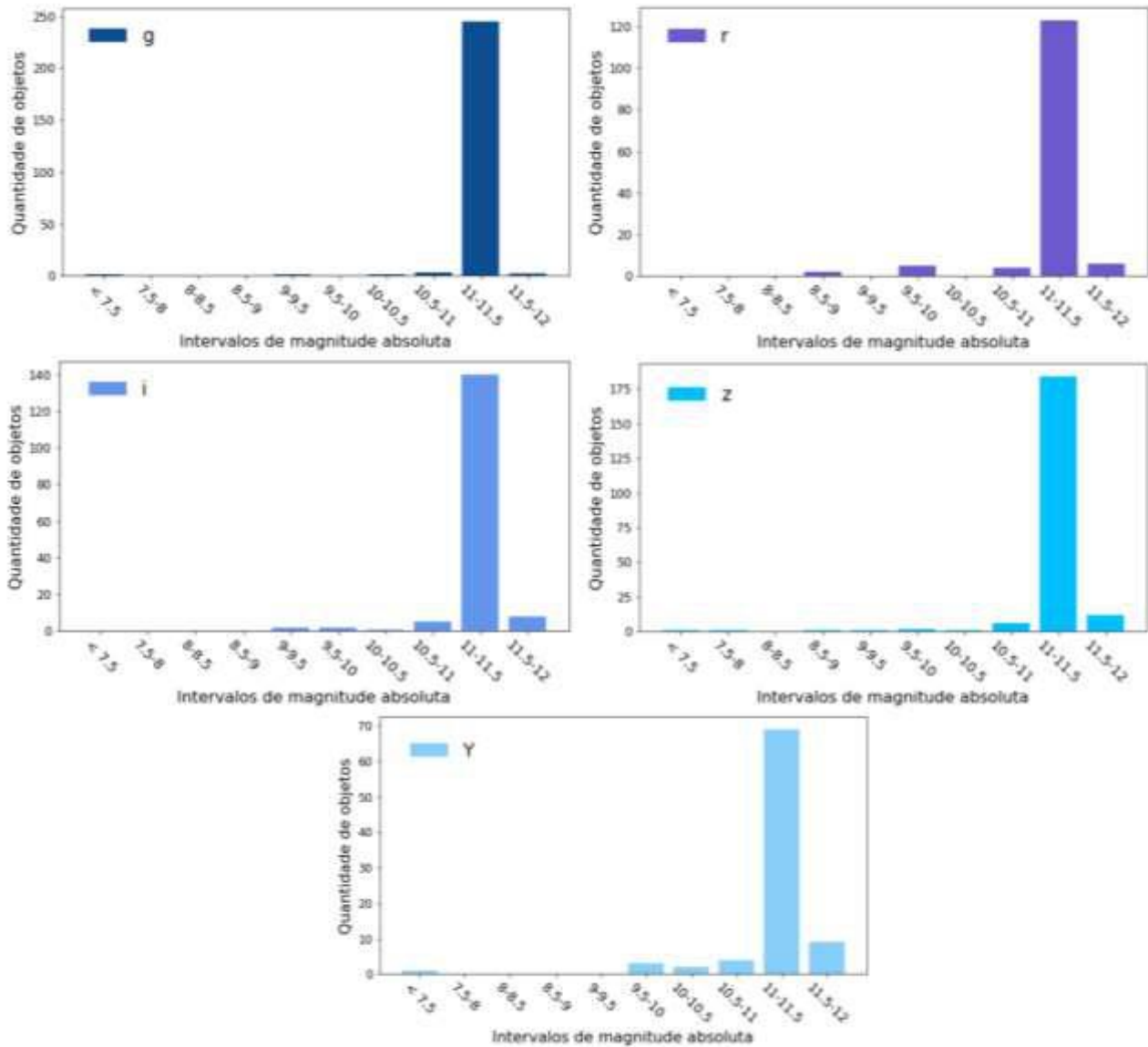


Figura 15: Quantidade de objetos por intervalo de magnitude absoluta para os Troianos.

Tabela 5: Magnitudes absolutas calculadas em diferentes bandas para os troianos (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys.

Objeto	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>Y</i>
(5638) Deikoon	10.985 ± 0.013	—	10.418 ± 0.007	—	—
(12929) Periboea	10.717 ± 0.021	—	—	9.845 ± 0.020	9.807 ± 0.036
(58931) Palmys	12.422 ± 0.023	12.236 ± 0.015	12.223 ± 0.015	13.574 ± 0.049	—

3.2 Classificação Taxonômica

3.2.1 KBOs e Centauros

A partir das atividades realizadas, foi obtida a segregação dos KBOs e Centauros em 4 agrupamentos, mostrada na Figura 16, em que as elipses hachuradas podem ser associados às classes taxonômicas já mencionadas, ou seja, BB (grupo 1), BR (grupo 2), IR (grupo 3) e RR (grupo 4).

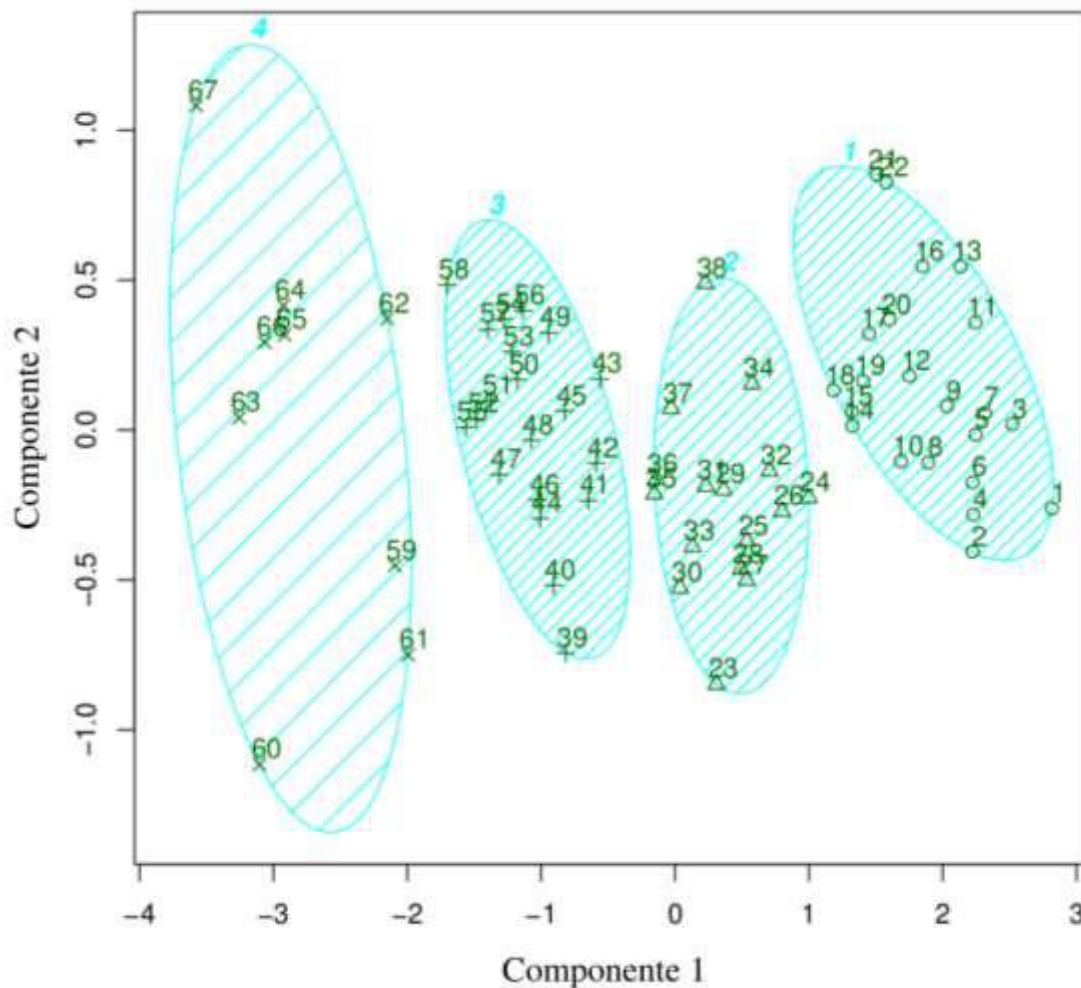


Figura 16: Agrupamento, com utilização das cores g-r, g-i e g-z, obtida com o algoritmo PAM para observações realizadas com o DES. Os grupos BB, BR, IR e RR estão representados 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

No total, a classificação de 67 objetos destas duas classes dinâmicas (sendo 64 KBOs e 3 Centauros) se mostrou consistente com resultados obtidos na literatura, como discutido a seguir. Na Figura 17, está a distribuição desses objetos por classe taxonômica.

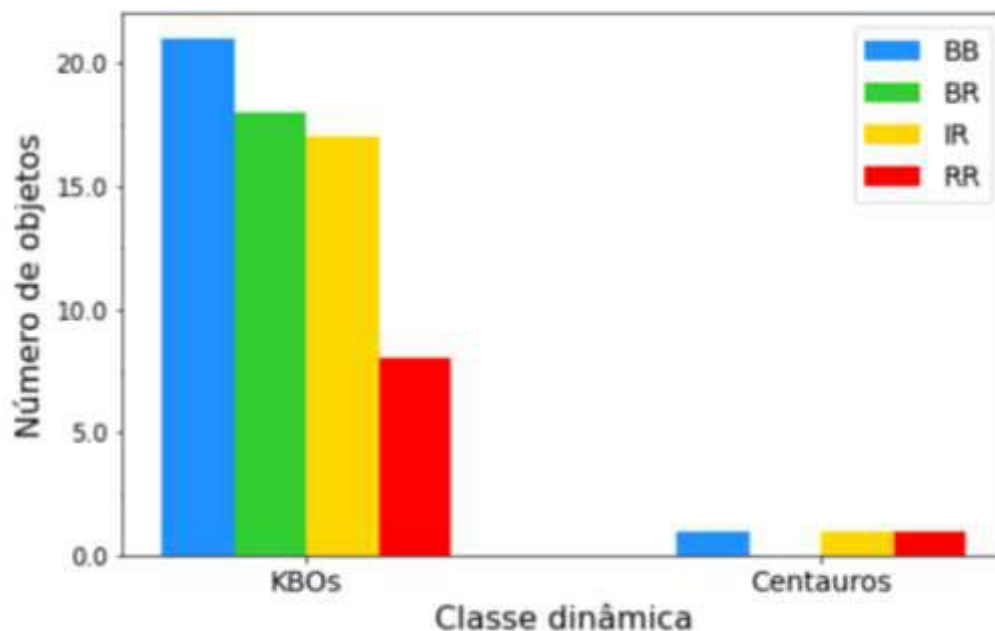


Figura 17: Distribuição de cada classe taxonômica para os KBOs e Centauros.

Na Tabela 6, há um comparativo, para alguns objetos, entre a classificação encontrada com o algoritmo PAM e as classificações encontradas em BARUCCI *et al.* (2005) e em PERNA *et al.* (2010). Dessa forma, é perceptível que os resultados encontrados estão compatíveis com os resultados já presentes na literatura.

Tabela 6: Coluna (1): Identificação do objeto. Coluna (2): Classificação obtida neste trabalho utilizando o algoritmo PAM. Coluna (3): Classificação oriunda de BARUCCI *et al.* (2005). Coluna (4): Classificação oriunda de PERNA *et al.* (2010).

Objeto	PAM (Este trabalho)	Barucci <i>et al.</i> (2005)	Perna <i>et al.</i> (2010)
Chiron	BB	BB	—
Eris	BB	—	BB
1999 RB216	BR	BR	—
1999 OX3	RR	RR	RR
2001 QF298	BB	BB	—
2004 TY364	IR	—	IR,RR,BR

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho também podem ser encontrados no artigo indicado no Anexo B.

Como visto, o conhecimento físico e químico dos KBOs e Centauros pode fornecer informações sobre a formação e evolução da nebulosa solar. Em geral, esses objetos são formados por rochas e gelos ricos em compostos orgânicos complexos (Barkume *et al.*, 2008). A presença desses componentes em suas superfícies é determinada por diversos fatores, como a história de colisões.

Todos os objetos da classe mais avermelhada (RR) mostram uma pequena porcentagem de gelo de H₂O e metanol em suas superfícies (Fulchignoni *et al.*, 2008). A cor vermelha dessa classe pode ser explicada pela presença de tolina (Barucci *et al.*, 2005). Tolina é uma fonte de matéria orgânica não encontrada naturalmente na Terra, mas muito comum em corpos gelados do Sistema Solar exterior.

Os objetos do grupo IR parecem conter espectros de silicatos hidratados (Fulchignoni *et al.*, 2008). Esse grupo é menos vermelho que o RR, o que pode sugerir uma presença menor de tolina.

A classe BR é intermediária entre BB e IR, o que significa que esse grupo tem menos gelo do que o BB e mais do que o IR. No entanto, a pequena porcentagem de H₂O presente na superfície desses objetos mostra que eles se aproximam mais do comportamento do grupo IR (Fulchignoni *et al.*, 2008).

Embora todos os quatro grupos mostrem a presença de gelo, os objetos da população neutra (BB) são os corpos que apresentam as maiores quantidades (Barucci *et al.*, 2008), com alguns de seus membros mostrando bandas de absorção de gelo de H₂O profundas. Na verdade, espera-se que o gelo seja um componente importante desse grupo, o que pode ser interpretado como uma consequência da história de colisões desses corpos (Barucci *et al.*, 2005, Fulchignoni *et al.*, 2008).

3.2.2 Troianos

A classificação taxonômica para os troianos foi feita a partir da metodologia detalhada no subtópico 2.1.2. A partir dela, os objetos foram separados nas classes C, V e S, nas proporções mostradas na Figura 18:

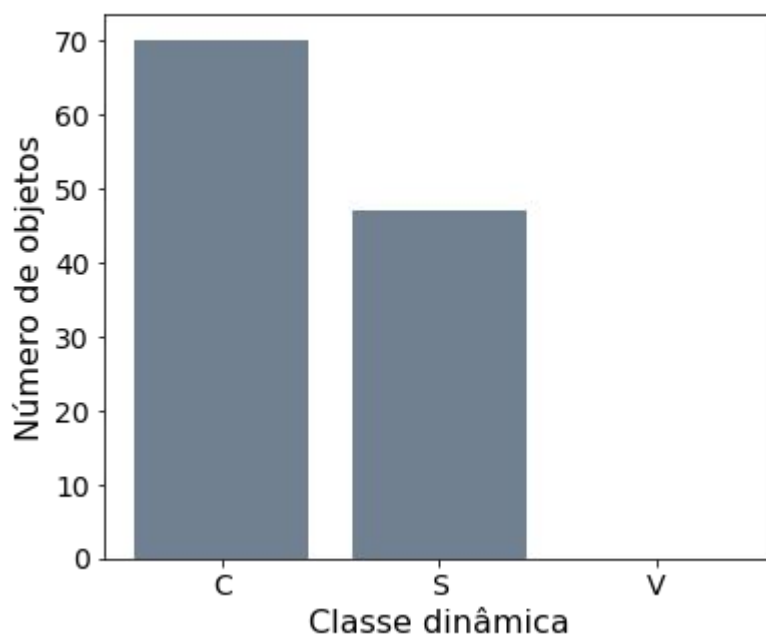


Figura 18: Distribuição de cada classe taxonômica para os Troianos.

Como já mencionado, os objetos da classe C são os que apresentam os menores valores de albedo, ou seja, são aqueles que menos refletem a luz solar que incide sobre suas superfícies. No geral, os asteroides dessa classe são compostos pelo material mais imaculado do Sistema Solar primitivo, apresentando mistura de minerais, gelo e matéria orgânica (Yada *et al.*, 2022). Essa classe apresenta ainda uma banda de absorção bastante típica, geralmente associada a alteração de filossilicatos máficos e que está presente também em alguns condritos carbonáceos (Vilas & Gaffey 1989).

Os asteroides do tipo S, por outro lado, apresentam altos valores de albedo associados com a presença de ferro e níquel metálicos em suas superfícies (Carvano *et al.*, 2010). Além disso, segundo Gaffey *et al.* (1993), os objetos dessa classe são caracterizados por uma ampla variedade mineral, incluindo subtipos quase monominerálicos em olivina (dunitos), até aqueles com misturas de olivina e piroxênios (peridotitos) ou piroxênios com plagioclásio (basaltos).

A classe que não apresentou representantes entre os objetos estudados neste trabalho foi a classe V. Esses objetos são corpos com superfícies constituídas por basalto (Roig *et al.*, 2008). Eles são caracterizados por uma profunda banda de absorção em torno de 1 micrômetro, associada com uma diversidade mineralógica que indica misturas de metais, basalto e assembleias dominadas por olivina/piroxênio (Gaffey *et al.*, 1993).

3.3 Ocultações Estelares

3.3.1 (5638) *Deikoon*

Como mencionado, para este troiano, duas ocultações estelares foram observadas: em 23/02/2019 (com 2 cordas positivas e 13 negativas) e em 10/04/2020 (com 3 cordas positivas e 4 negativas). Das cordas positivas desses dois eventos, duas foram completamente analisadas neste trabalho e podem ser observadas nas figuras 19 e 20, com os modelos ajustados. Os resultados da fotometria das outras cordas foram enviados pelos próprios observadores.

Na tabela 7, encontram-se os instantes de imersão e emersão da estrela ocultada, que foram utilizados para o ajuste da forma aparente do objeto, como mostra a Figura 21.

A partir desse ajuste, foi possível estimar seu diâmetro e achatamento para cada um dos dois eventos, além da obtenção da posição astrométrica do objeto atualizada (Tabela 8).

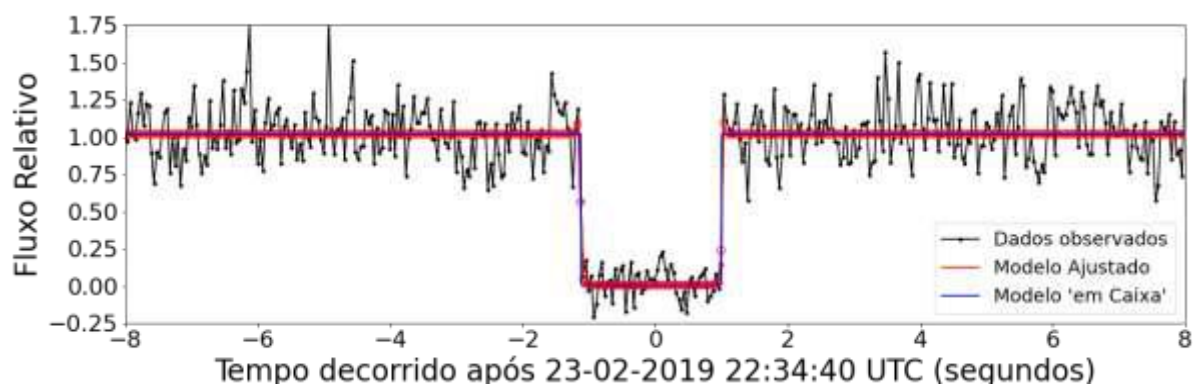


Figura 19: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 23-02-2019.

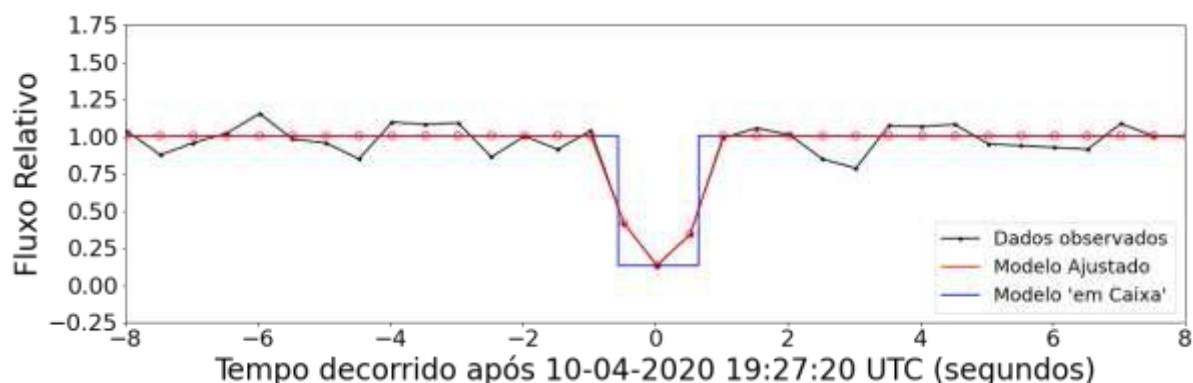


Figura 20: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 10-04-2020.

Tabela 7: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (5638) Deikoon

Evento	Observador	Imersão	Emersão	Tamanho da corda (km)
23-02-2019	L. Rousselot	22:33:37.883 ± 0.005	22:33:40.002 ± 0.005	48 ± 0.16
	A. Figer	22:33:14.20 ± 0.25	22:33:16.78 ± 0.25	32 ± 5.6
10-04-2020	C. Ellington	19:28:05.51 ± 0.17	19:28:06.71 ± 0.17	15 ± 3.6
	P. Zeleny	19:27:43.941 ± 0.053	19:27:45.158 ± 0.051	30 ± 1.05
	M. Harman	19:27:42.28 ± 0.22	19:27:43.82 ± 0.22	15 ± 4.65

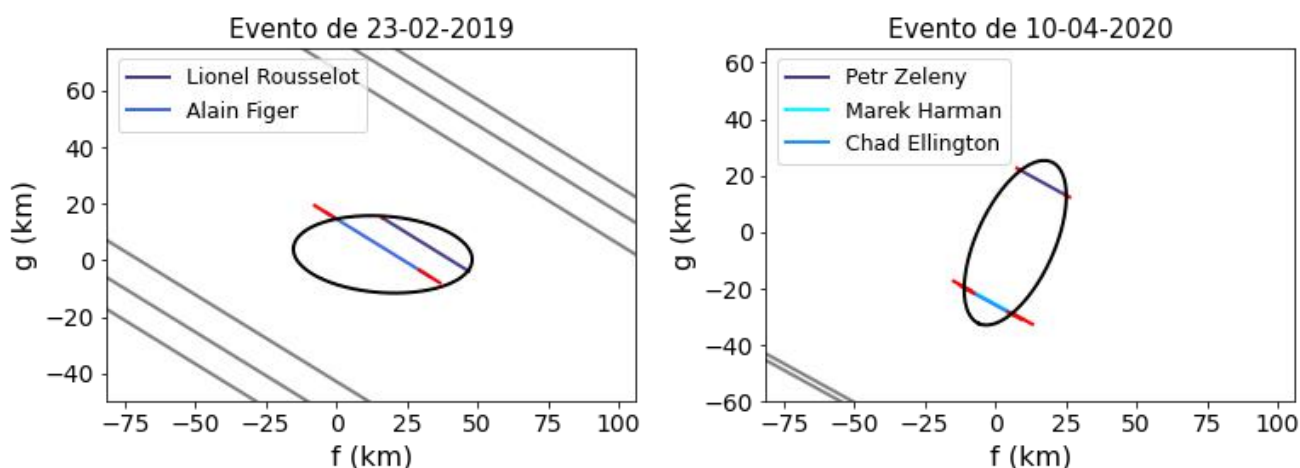


Figura 21: Melhor elipse ajustada para os dois eventos de ocultação estelar pelo troiano (5638) Deikoon. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em tons de azul.

Tabela 8: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (5638) Deikoon.

Evento	Raio equatorial (km)	Achatamento	Posição astrométrica (mas)
23-02-2019 22:29:16.400	30.292 ± 1.224	0.559 ± 0.013	RA = 11 10 16.7349215 ± 5.493 DEC = 7 17 25.258747 ± 3.278
10-04-2020 23:11:46.000	30.307 ± 1.244	0.528 ± 0.044	RA = 13 30 16.2520694 ± 0.764 DEC = 1 00 46.453068 ± 0.477

3.3.2 (12929) Periboea

Uma ocultação estelar por esse objeto foi observada em 20/04/2021, obtendo-se 1 corda positiva e 2 negativas. Por se tratar de um evento de corda única, um ajuste preliminar pôde ser feito a partir dos dados fornecidos pela *Neowise* (Grav *et al.*, 2012). Os dados astrométricos obtidos a partir da redução deste evento permitiram realizar uma melhor predição para outras ocultações por este objeto, incluindo o evento que ocorreu no dia 30/07/2022, no qual foram obtidas 1 corda positiva e 1 negativa.

As cordas positivas desses dois eventos podem ser observadas nas figuras 22 e 23, assim como os modelos ajustados, que resultaram nos instantes de imersão e emersão presentes na Tabela 9.

As elipses ajustadas para cada evento estão na Figura 24 e na Tabela 10 podem ser encontrados os valores de raio equivalente, achatamento e as novas posições astrométricas do objeto.

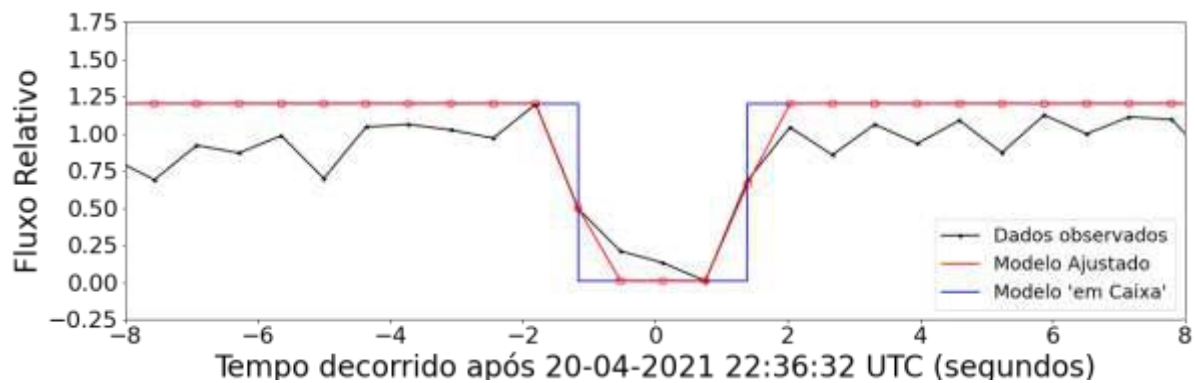


Figura 22: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 20-04-2019.

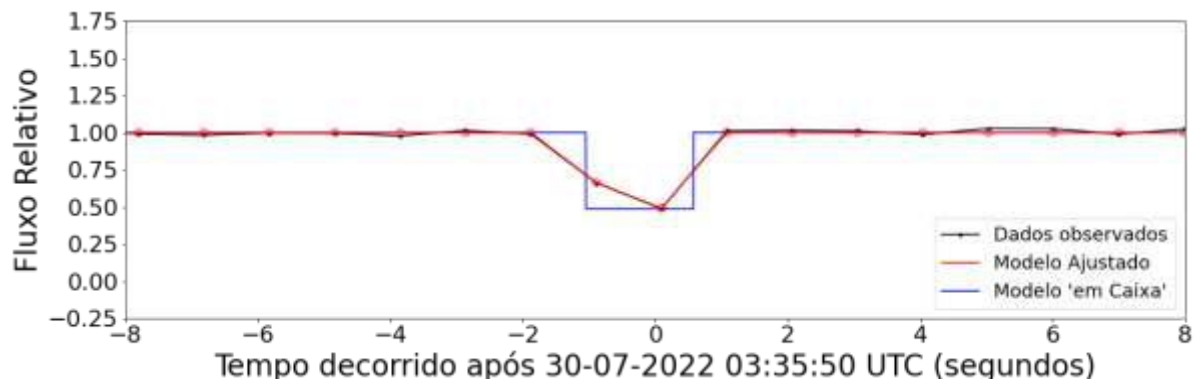


Figura 23: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 30-07-2022.

Tabela 9: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (12929) 1999 TZ1.

Evento	Observador	Imersão	Emersão	Tamanho da corda (km)
20-04-2021	B. Kattentidt	22:36:43.838 ± 0.004	22:36:46.389 ± 0.004	63 ± 0.21
30-07-2022	L. Liberato	03:45:55.342 ± 0.033	03:45:56.988 ± 0.030	15 ± 0.6

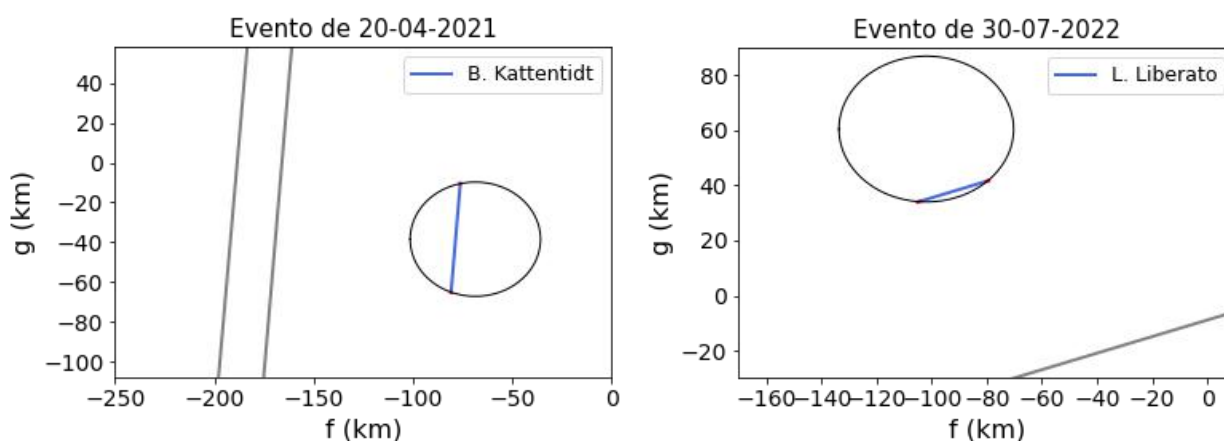


Figura 24: Melhor elipse ajustada para os dois eventos de ocultação estelar pelo troiano (12929) Periboea. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em azul.

Tabela 10: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (12929) Periboea.

Evento	Raio equatorial (km)	Achatamento	Posição astrométrica (mas)
20-04-2021 22:33:46.480	27.265 ± 0.447	0.015 ± 0.014	RA = 20 45 52.1812925 ± 5.538 DEC = 31 30 14.611862 ± 7.371
30-07-2022 03:45:07.180	32.068 ± 4.916	0.244 ± 0.230	RA = 18 34 34.9630581 ± 1.194 DEC = 21 29 58.934225 ± 0.231

3.3.3 (58931) *Palmys*

Para este objeto, foram observadas cinco ocultações estelares, sendo todos eventos de corda única. O primeiro deles, ocorrido em 14 de Abril de 2021 despertou bastante interesse, pois, no decorrer da ocultação, a estrela “reapareceu”, como pode ser visto na Figura 25:

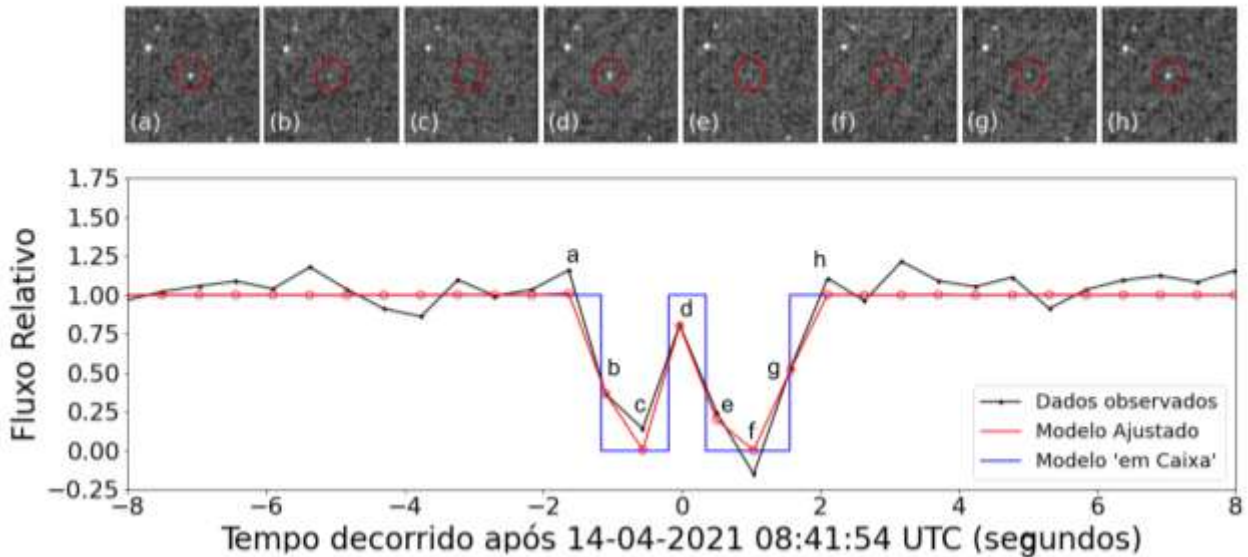


Figura 25: Ajuste da corda positiva normalizada do evento de 14-04-2021. Nesse caso, como a estrela reaparece durante o evento da ocultação (ponto d), o modelo ‘em caixa’ foi ajustado considerando as duas quedas da curva de luz, resultando em dois instantes de imersão e emersão.

Esse reaparecimento da estrela pode ser um indicativo de binaridade ou de uma interessante característica topográfica presente no objeto. O ajuste para este evento pode ser visto na Figura 26, na qual observa-se a distância entre os dois segmentos da corda positiva registrada.

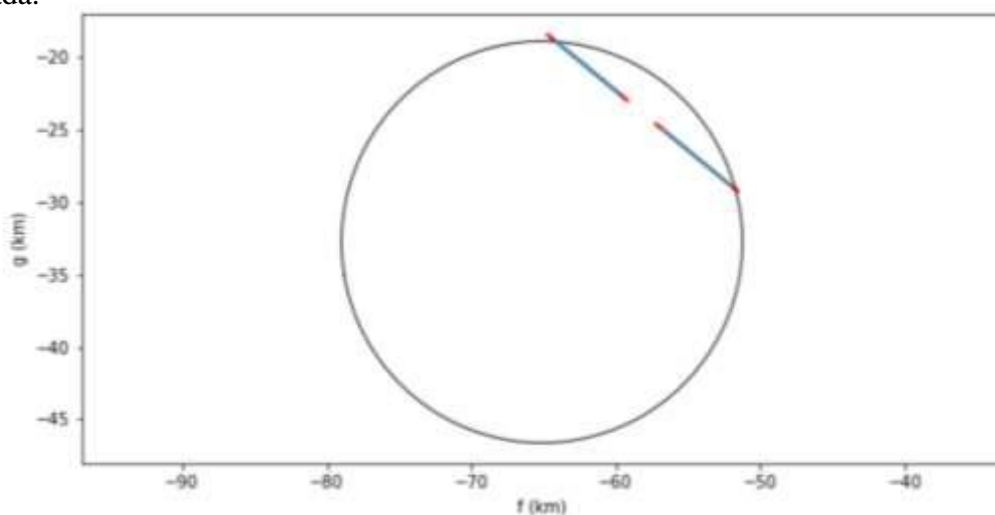


Figura 26: Elipse ajustada para o evento de ocultação estelar em 14-04-2021.

Com o intuito de obter mais informações sobre esta particularidade, os outros quatro eventos foram observados. Em nenhum deles, porém, a corda obtida apresentou este comportamento (Figura 27).

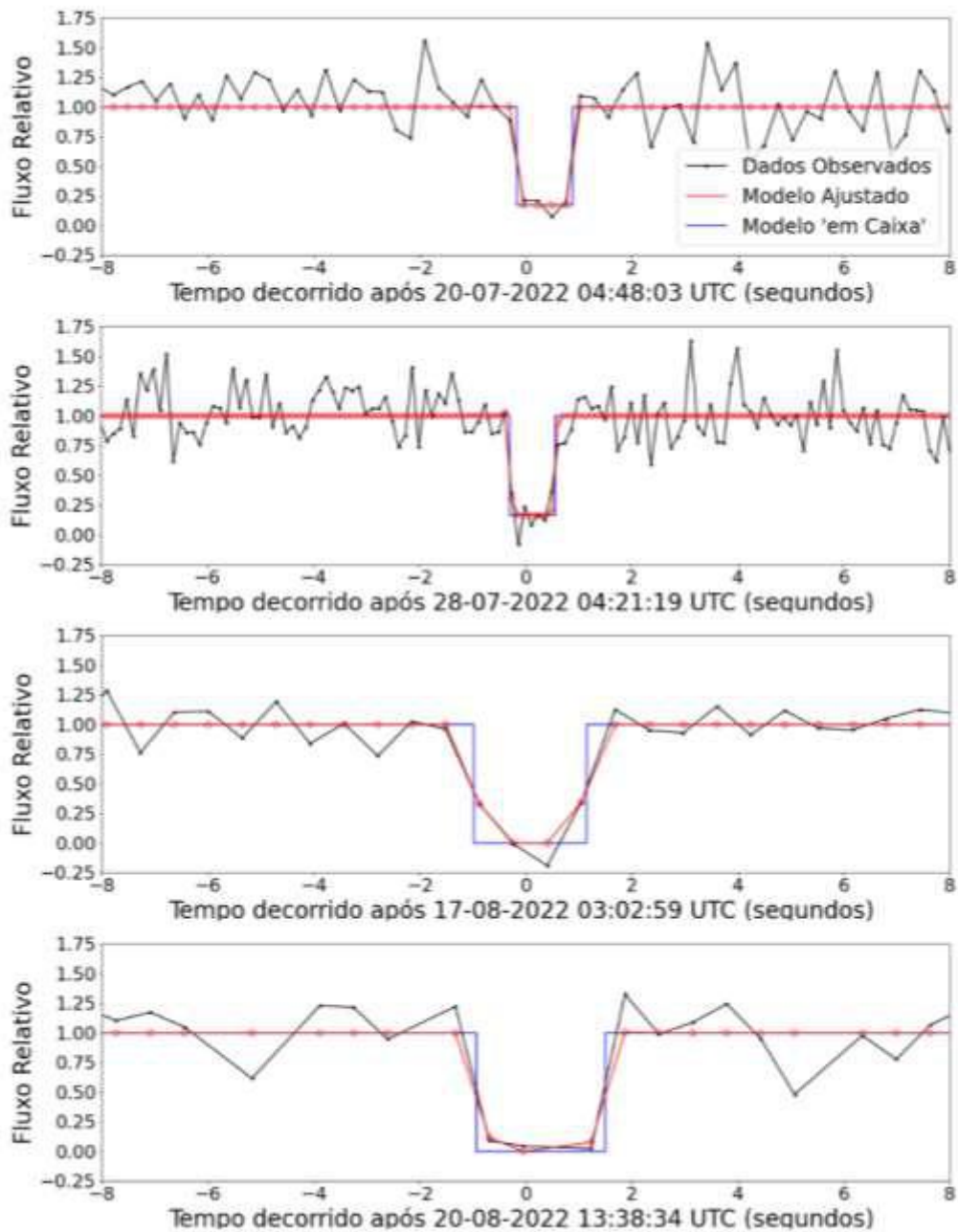


Figura 27: Ajustes das cordas positivas normalizadas dos eventos de 2022.

Na Tabela 11, estão os tempos de imersão e emersão para cada corda, sendo que, para o evento de 14-04-2021, foram estimados dois instantes de cada. Na Figura 28, estão os ajustes feitos para cada evento, a partir dos dados da Neowise (Grav *et al.*, 2012), e os resultados encontram-se na Tabela 12.

Tabela 11: Instantes de imersão e emersão determinados para as ocultações por (58931) Palmys.

Evento	Observador	Imersão	Emersão	Tamanho da corda (km)
14-04-2021	W. Thomas	$08:41:52.77 \pm 0.04$	$08:41:53.88 \pm 0.05$	5.0 ± 0.3
		$08:41:54.40 \pm 0.04$	$08:41:55.56 \pm 0.04$	5.0 ± 0.3
20-07-2022	J. Bardecker	$04:48:02.83 \pm 0.13$	$04:48:03.88 \pm 0.12$	15.0 ± 2.7
28-07-2022	K. Green	$04:21:18.70 \pm 0.03$	$04:21:19.60 \pm 0.03$	15.0 ± 0.6
17-08-2022	D. & J. Dunham	$03:02:58.02 \pm 0.11$	$03:03:00.15 \pm 0.11$	20.0 ± 1.6
20-08-2022	S. Kerr	$13:38:33.41 \pm 0.11$	$13:38:35.84 \pm 0.08$	18.0 ± 1.2

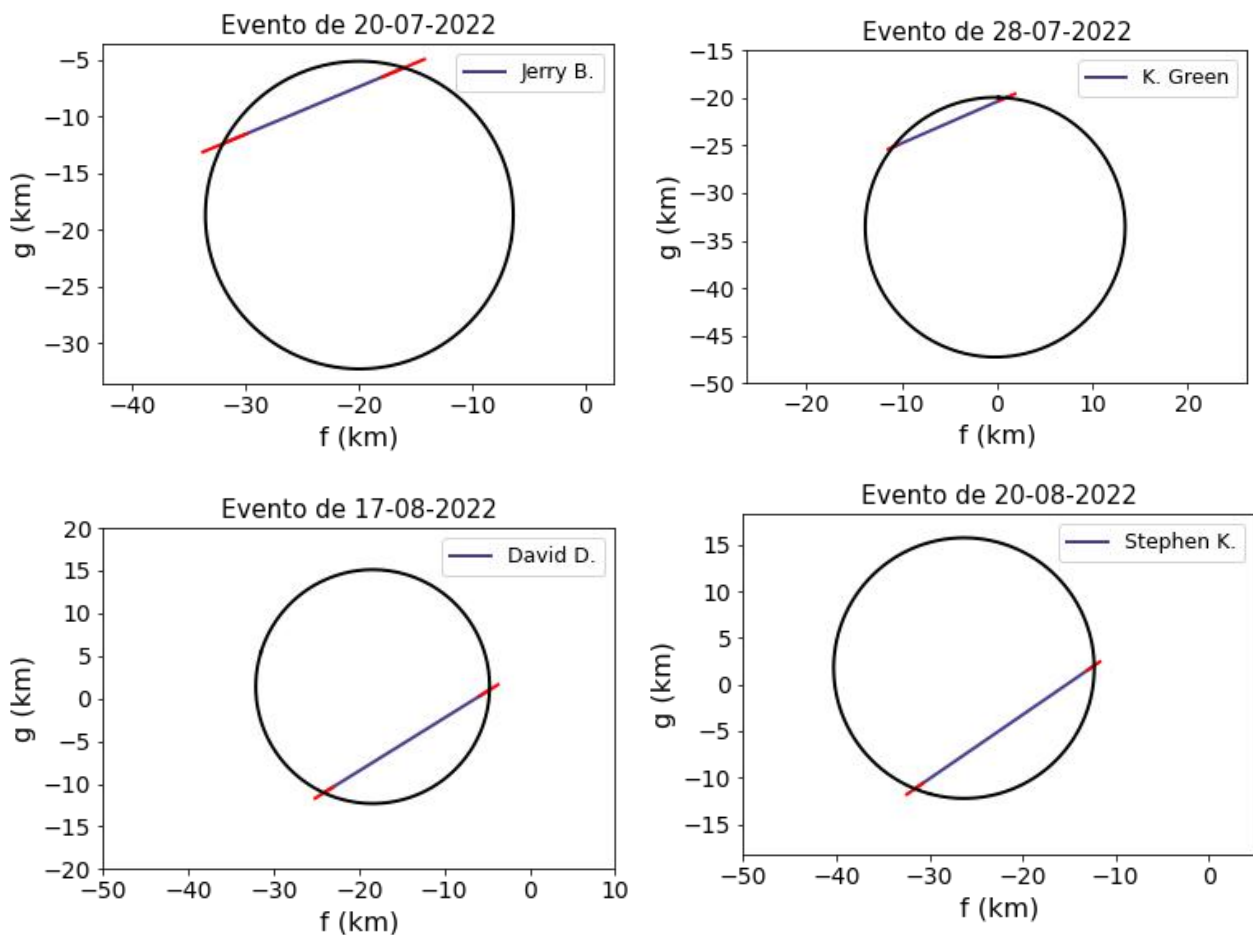


Figura 28: Melhor elipse ajustada para os eventos de ocultação estelar de 2022 pelo troiano (58931) Palmys. As cordas negativas estão em cinza e as positivas estão em azul.

Tabela 12: Valores de Raio equatorial, achatamento e posições astrométricas determinados para as ocultações por (58931) Palmys.

Evento	Raio equatorial (km)	Achatamento	Posição astrométrica (mas)
14-04-2021 08:27:46.500	16.678 ± 3.112	0.250 ± 0.250	RA = 17 01 15.9630530 \pm 0.133 DEC = -6 53 29.830369 \pm 0.091
20-07-2022 04:47:10.580	16.783 ± 3.215	0.250 ± 0.250	RA = 19 18 23.4568630 \pm 4.452 DEC = -18 46 40.781540 \pm 5.191
28-07-2022 04:24:42.540	16.601 ± 3.033	0.250 ± 0.250	RA = 19 14 13.4549671 \pm 3.990 DEC = -19 12 22.262537 \pm 5.482
17-08-2022 03:08:45.020	16.743 ± 3.177	0.250 ± 0.250	RA = 19 05 58.1637474 \pm 3.485 DEC = -20 12 46.837124 \pm 3.583
20-08-2022 13:42:57.180	16.741 ± 3.174	0.250 ± 0.250	RA = 19 04 58.8891387 \pm 3.391 DEC = -20 22 18.483695 \pm 3.515

Uma discussão mais detalhada sobre os eventos de ocultação estelar pelo troiano Palmys poderá ser encontrada no artigo “*Properties of Trojan (58931) Palmys: Magnitude, Size, Shape, Albedo and Topographic Features*”, de Peixoto *et al.* (*in prep.*), cuja submissão na revista *Planetary and Space Science* está prevista para o primeiro semestre de 2024.

3.4 Albedo

Como mencionado anteriormente, foi calculado para os troianos (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys o albedo geométrico. Esse cálculo foi feito para cada uma das bandas para a qual foi calculada a magnitude absoluta. No caso dos objetos que foram analisados em mais de um evento de ocultação estelar, o albedo foi calculado para cada um dos valores de raio equivalente estimados. Esses resultados podem ser observados na Tabela 13. É importante ressaltar que os valores de erro aqui apresentados podem estar subestimados uma vez que o cálculo feito não levou em consideração o período de rotação de cada um desses objetos.

Tabela 13: Valores de albedo calculados para os troianos (5638) Deikoon, (12929) Palmys e (58931) Periboea.

Objeto Raio equivalente	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>Y</i>
(5638) Deikoon 20.116 ± 2.112 (km)	0.0577 ± 0.0129	-	0.0591 ± 0.0132	-	-
(5638) Deikoon 20.821 ± 2.769 (km)	0.0550 ± 0.0163	-	0.0564 ± 0.0167	-	-
(12929) Periboea 27.059 ± 0.622 (km)	0.0395 ± 0.0020	-	-	0.0532 ± 0.0026	0.0549 ± 0.0031
(12929) Periboea 27.882 ± 9.828 (km)	0.0551 ± 0.0352	-	-	0.0742 ± 0.0474	0.0773 ± 0.0499
(58931) Palmys 13.876 (km)	0.0312 ± 0.0007	0.0244 ± 0.0003	0.0228 ± 0.0003	0.0065 ± 0.0003	-

Como visto, o albedo contribui com o nosso entendimento em larga escala sobre a composição dos asteroides, estando fortemente relacionado com suas condições e composições superficiais. A determinação de classes taxonômicas não pode ser feita utilizando-se valores de albedo de forma isolada. Existe, porém, uma relação entre as diferentes classes e os valores de albedo esperados para os objetos pertencentes a cada uma delas (Usui, 2013). Por exemplo, asteroides do tipo C geralmente apresentam baixos valores de albedo, enquanto que os asteroides do tipo S são aqueles com os maiores valores (Zellner & Gradie, 1976).

Na Tabela 14, estão os valores de albedo esperados para cada uma das classes taxonômicas.

Tabela 14: Valores de albedo esperados para os objetos de cada classe taxonômica (modificado de Usui, 2013).

Classe Taxonômica	Albedo
C	0.071 ± 0.040
S	0.208 ± 0.079
X	0.098 ± 0.081
D	0.086 ± 0.053
V	0.297 ± 0.131

Com isso, observada a classificação encontrada na literatura para os objetos estudados, percebe-se que os valores de albedo para eles calculados estão dentro dos intervalos esperados.

De acordo com Carvano *et al.* (2010), o (5638) Deikoon é classificado como um asteroide do tipo D. Asteroides dessa classe apresentam tipicamente valores baixos de albedo e acredita-se que suas superfícies contenham misturas de gelo, silicatos anidros e matéria orgânica (DeMeo & Carry, 2013).

O troiano (12929) Periboea é tido como um asteroide do tipo C (LCDB, 2018), cujas características mineralógicas já foram expostas. Já o (56931) Palmys ainda não possui uma classificação taxonômica publicada, porém, tendo em vista os valores de albedo calculados para este objeto, ele é possivelmente pertencente à classe C (compatível com a classificação feita neste trabalho) ou da classe D.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo a partir da análise de dados provenientes do *Dark Energy Survey* (DES) e de ocultações estelares para estudar pequenos corpos do Sistema Solar, com ênfase nos Troianos de Júpiter, objetos do Cinturão de Kuiper (KBOs) e Centauros. A análise dos dados do DES permitiu calcular magnitudes absolutas e classificar os objetos com base em índices de cor, enquanto as ocultações estelares forneceram informações valiosas sobre as dimensões e formas desses corpos.

Os resultados obtidos deste estudo forneceram informações sobre a geologia, morfologia, composição superficial e albedo dos objetos estudados. Dessa forma, a análise das classes taxonômicas dos KBOs, Centauros e Troianos proporciona uma visão intrigante sobre a composição e a história desses objetos celestes.

Para os KBOs e Centauros, são identificados componentes orgânicos complexos e a influência de fatores como colisões em suas superfícies. Enquanto as classes mais avermelhadas sugerem a presença de substâncias como tolina, comuns em corpos gelados do Sistema Solar exterior, a população neutra destaca-se pela presença significativa de gelo de H₂O.

No caso dos Troianos, a classificação em classes C, S e V fornece informações valiosas sobre a diversidade mineral e composições de suas superfícies. As classes C indicam material pouco alterado do Sistema Solar primitivo, enquanto as classes S revelam a presença de metais como ferro e níquel, com ampla variedade mineralógica. A classe V, embora menos representada, é caracterizada por superfícies basálticas.

Neste estudo, a observação de ocultações estelares proporcionou uma valiosa oportunidade de investigar as propriedades físicas de três troianos: (5638) Deikoon, (12929) Periboea e (58931) Palmys. A análise dessas ocultações, ocorridas em datas distintas, permitiu a determinação de parâmetros essenciais, como o diâmetro e achatamento aparentes e a posição astrométrica no momento da ocultação desses objetos. Em particular, para o (58931) Palmys, a detecção de um reaparecimento estelar durante uma ocultação sugere questões intrigantes sobre a possibilidade de binaridade ou características topográficas peculiares neste objeto.

Além disso, a análise dos albedos geométricos dos três troianos desempenha um papel significativo na caracterização desses objetos do Sistema Solar. O albedo é uma medida que fornece importantes informações sobre a composição e a natureza das superfícies dos asteroides, auxiliando ainda mais na diferenciação entre distintas classes taxonômicas.

Observamos que os valores de albedo calculados para esses objetos estão de acordo com as expectativas de suas respectivas classificações. O asteroide (5638) Deikoon, classificado como tipo D, apresenta um baixo albedo, o que é característico dessa classe composta por uma mistura de gelo, silicatos anidros e matéria orgânica. O (12929) Periboea, classificado como tipo C, reflete as características mineralógicas esperadas para essa classe.

Quanto ao (58931) Palmys, embora sua classificação taxonômica ainda não esteja publicada, os valores de albedo calculados sugerem que ele pode ser relacionado às classes C ou D, de acordo com os achados deste estudo. Essa pesquisa, portanto, ilustra a importância do albedo na determinação das propriedades físicas e químicas dos troianos, contribuindo para a compreensão mais profunda de nossa vizinhança cósmica.

Um estudo mais detalhado das propriedades de superfície desses corpos pequenos é possível através da espectroscopia, mas observar espectroscopicamente esses objetos distantes é difícil devido à fraqueza de seus brilhos. No entanto, é possível utilizar a fotometria multibanda para investigar a composição de suas superfícies, por meio da análise das cores desses objetos.

Essas análises destacam a complexidade e diversidade dos objetos estudados, enriquecendo nosso entendimento sobre a formação e a evolução do Sistema Solar. O conhecimento físico e químico dos pequenos corpos desempenha um papel fundamental na expansão de nossa compreensão sobre o nosso sistema planetário, destacando a necessidade contínua de investigações e estudos interdisciplinares no campo da astronomia e das ciências planetárias.

Referências

- Assafin, M. 2023. ‘Differential aperture photometry and digital coronagraphy with PRAIA’, *Planetary and Space Science*, 105816.
- Assembly, I. G. 2006. Resolution b5: Definition of a planet in the solar system.
- Berthier, J., Vachier, F., Thuillot, W., Fernique, P., Ochsenbein, F., Genova, F. & Arlot, J. E. 2006. ‘SkyBoT, a new VO service to identify Solar System objects’, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, vol. 351, p. 367.
- Carruba, V., Camargo, J. I., Aljbaae, S., Ferreira, F. S., Lin, E., Figueiredo-Peixoto, V. & (DES Collaboration). 2023. ‘Main belt asteroids taxonomical information from Dark Energy Survey data’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, stad3466.
- Dark Energy Survey Collaboration: Fermilab, University of Illinois at Urbana-Champaign, University of Chicago, Lawrence Berkeley National Laboratory, Cerro-Tololo Inter-American Observatory, & Flaugher, B. 2005. ‘The dark energy survey’, *International Journal of Modern Physics A*, vol. 20, no. 14, pp. 3121-3123.
- Dark Energy Survey Collaboration. 2016. ‘Dark Energy Survey’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 460, pp. 1270.
- DeMeo, F. E. & Carry, B. 2013. ‘The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys’, *Icarus*, vol. 226, no. 1, pp. 723-741.
- Desmars, J., Bancelin, D., Hestroffer, D. & Thuillot, W. 2013. ‘Statistical and numerical study of asteroid orbital uncertainty’, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 554, pp. 32.
- Fulchignoni, M., Belskaya, I., Barucci, M. A., De Sanctis, M. C. & Doressoundiram, A. 2008. ‘Transneptunian object taxonomy’, *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 181.
- Gaffey, M. J., Bell, J. F., Brown, R. H., Burbine, T. H., Piatek, J. L., Reed, K. L. & Chaky, D. A. 1993. ‘Mineralogical variations within the S-type asteroid class’. *Icarus*, vol. 106, no. 2, pp. 573-602.
- Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., Bouffleur, R. C., Rommel, F. L., Banda-Huarca, M. V. & Sicardy, B. 2022. ‘SORA: Stellar occultation reduction and

- analysis', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 511, no. 1, pp. 1167-1181.
- Hestroffer, D., Sánchez, P., Staron, L., Bagatin, A. C., Eggl, S., Losert, W. & Yano, H. 2019. 'Small solar system bodies as granular media', *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 27, pp. 1-64.
- Hughes, D. W. 2003. 'The absolute magnitude distribution of trans-Neptunian objects', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 345, no. 3, pp. 981-984.
- Kilic, Y., Braga-Ribas, F., Kaplan, M. U. R. A. T., Erece, O., Souami, D., Dindar, M. & Gomes-Júnior, A. R. 2022. 'Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 515 no. 1, pp. 1346-1357.
- Morbidelli, A., Jedicke, R., Bottke, W. F., Michel, P., & Tedesco, E. F. 2002. 'From magnitudes to diameters: The albedo distribution of near Earth objects and the Earth collision hazard', *Icarus*, vol. 158, no 2, pp. 329-342.
- Roig, F. F., Nesvorný D., Gil-Hutton R., Lazzaro D. 2008. 'V-type asteroids in the middle main belt', *Icarus*, v. 194, n. 1, p. 125-136.
- Rossi, A. P. 2018, *Planetary geology*. Springer International Publishing, Cham.
- Sheppard, S. S. 2006. 'Small bodies in the outer solar system', *New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium*, vol. 352, pp. 3.
- Szabó, G. M., Ivezić, Ž., Jurić, M., & Lupton, R. 2007. 'The properties of jovian Trojan asteroids listed in SDSS Moving Object Catalogue 3', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 377, no. 4, pp. 1393-1406.
- Tsiganis, K. 2010. 'Dynamics of small bodies in the solar system', *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 186, pp. 67-89.
- Vita-Finzi, C. 2013, *Planetary geology: an introduction*. Dunedin Academic Press Ltd.
- Yada, T., Abe, M., Okada, T., Nakato, A., Yogata, K., Miyazaki, A. & Tsuda, Y. 2022. 'Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu', *Nature Astronomy*, vol. 6, no. 2, pp. 214-220.

Zhang, Y., & Michel, P. 2021. 'Shapes, structures, and evolution of small bodies', *Astrodynamics*, vol. 5, pp. 293-329.

Main belt asteroids taxonomical information from Dark Energy Survey data

V. Carruba,^{1,2} J. I. B. Camargo,^{3,2} S. Aljbaae,⁴ F. S. Ferreira,^{3,2} E. Lin,⁵ V. Figueiredo-Peixoto,^{3,6,2} M. V. Banda-Huarca,^{3,2} A. Pieres,² R. C. Bouffeur,^{3,2} L. N. da Costa,² T. M. C. Abbott,⁷ M. Agüena,² Sahar S. Allam,⁸ O. Alves,⁵ P. H. Bernardinelli,⁹ E. Bertin,^{10,11} D. Brooks,¹² A. Carnero Rosell,^{13,2,14} J. Carretero,¹⁵ M. E. S. Pereira,¹⁶ T. M. Davis,¹⁷ J. De Vicente,¹⁸ S. Desai,¹⁹ P. Doel,¹² I. Ferrero,²⁰ D. Friedel,²¹ J. Frieman,^{8,22} J. García-Bellido,²³ M. Gatti,²⁴ G. Giannini,¹⁵ D. Gruen,²⁵ R. A. Gruendl,^{21,26} K. Herner,⁸ S. R. Hinton,¹⁷ D. L. Hollowood,²⁷ D. J. James,²⁸ S. Kent,^{8,22} K. Kuehn,^{29,30} O. Lahav,¹² J. L. Marshall,³¹ J. Mena-Fernández,¹⁸ R. Miquel,^{32,15} A. Palmese,³³ A. A. Plazas Malagón,^{34,35} M. Rodríguez-Monroy,³⁶ E. Sanchez,¹⁸ B. Santiago,^{37,2} M. Schubnell,⁵ M. Smith,³⁸ E. Suchyta,³⁹ M. E. C. Swanson,⁴⁰ G. Tarle,⁵ A. R. Walker,⁷ N. Weaverdyck,^{5,41} and P. Wiseman³⁸

(DES Collaboration)

¹ São Paulo State University (UNESP), School of Natural Sciences and Engineering

² Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA, Brazil

³ Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ - 20921-400, Brazil

⁴ National Space Research Institute (INPE), Division of Space Mechanics and Control, C.P. 515, 13227-310, São José dos Campos, SP, Brazil

⁵ Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

⁶ IGeo - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos 274, Rio de Janeiro, RJ - 21941-916, Brazil

⁷ Cerro Tololo Inter-American Observatory, NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory, Casilla 603, La Serena, Chile

⁸ Fermi National Accelerator Laboratory, P. O. Box 500, Batavia, IL 60510, USA

⁹ Astronomy Department, University of Washington, Box 351580, Seattle, WA 98195, USA

¹⁰ CNRS, UMR 7095, Institut d'Astrophysique de Paris, F-75014, Paris, France

¹¹ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7095, Institut d'Astrophysique de Paris, F-75014, Paris, France

¹² Department of Physics & Astronomy, University College London, Gower Street, London, WC1E 6BT, UK

¹³ Instituto de Astrofísica de Canarias, E-38205 La Laguna, Tenerife, Spain

¹⁴ Universidad de La Laguna, Dpto. Astrofísica, E-38206 La Laguna, Tenerife, Spain

¹⁵ Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB, 08193 Bellaterra (Barcelona) Spain

¹⁶ Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg, Gojenbergsweg 112, 21029 Hamburg, Germany

¹⁷ School of Mathematics and Physics, University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia

¹⁸ Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spain

¹⁹ Department of Physics, IIT Hyderabad, Kandi, Telangana 502285, India

²⁰ Institute of Theoretical Astrophysics, University of Oslo, P.O. Box 1029 Blindern, NO-0315 Oslo, Norway

²¹ Center for Astrophysical Surveys, National Center for Supercomputing Applications, 1205 West Clark St., Urbana, IL 61801, USA

²² Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

²³ Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, Spain

²⁴ Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA

²⁵ University Observatory, Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-Universität, Scheinerstr. 1, 81679 Munich, Germany

²⁶ Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 W. Green Street, Urbana, IL 61801, USA

²⁷ Santa Cruz Institute for Particle Physics, Santa Cruz, CA 95064, USA

²⁸ Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA

²⁹ Australian Astronomical Optics, Macquarie University, North Ryde, NSW 2113, Australia

³⁰ Lowell Observatory, 1400 Mars Hill Rd, Flagstaff, AZ 86001, USA

³¹ George P. and Cynthia Woods Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy, and Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

³² Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, E-08010 Barcelona, Spain

³³ Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15312, USA

³⁴ Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, P. O. Box 2450, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

³⁵ SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA

³⁶ Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, CNRS Université Paris-Saclay, Bât. 100, Faculté des sciences, F-91405 Orsay Cedex, France

³⁷ Instituto de Física, UFRGS, Caixa Postal 15051, Porto Alegre, RS - 91501-970, Brazil

³⁸ School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK

³⁹ Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831

⁴⁰ Independent Researcher

⁴¹ Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

ABSTRACT

While proper orbital elements are currently available for more than 1 million asteroids, taxonomical information is still lagging behind. Surveys like SDSS-MOC4 provided preliminary information for more than 100,000 objects, but many asteroids still lack even a basic taxonomy. In this study, we use Dark Energy Survey (DES) data to provide new information on asteroid physical properties. By cross-correlating the new DES database with other databases, we investigate how asteroid taxonomy is reflected in DES data. While the resolution of DES data is not sufficient to distinguish between different asteroid taxonomies within the complexes, except for V-type objects, it can provide information on whether an asteroid belongs to the C- or S-complex. Here, machine learning methods optimized through the use of genetic algorithms were used to predict the labels of more than 68 000 asteroids with no prior taxonomic information. Using a high-quality, limited set of asteroids with data on *gri* slopes and *i* – *z* colors, we detected 409 new possible V-type asteroids. Their orbital distribution is highly consistent with that of other known V-type objects.

Key words: Minor planets, asteroids: general, catalogues, celestial mechanics.

1 INTRODUCTION

Currently, we know more than 1 million asteroids for which synthetic proper elements can be reliably obtained using the method of Knežević & Milani (2003). Unlike osculating elements, proper elements are constants of motion on timescales of Myr, which allows for the identification of asteroid families. Our knowledge of the physical properties of asteroids is, however, much more limited. A full spectral classification of asteroids is available in various surveys for slightly more than 2000 objects (Bus & Binzel 2002; Lazzaro et al. 2004; DeMeo et al. 2009). Preliminary taxonomical information can be obtained from surveys like the SDSS-MOC4 (Ivezić et al. 2001), using the method described in DeMeo & Carry (2013), for more than 100,000 asteroids. More recent works on the matter are those of Popescu et al. (2018) on the taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors, and the new 3D machine learning classification scheme based on SDSS-MOC4 data of Roh et al. (2022). Yet, many objects, especially those at higher magnitudes and smaller diameters, lack any physical information. This limits studies on asteroid families, which are assumed to be mostly uniform in physical properties.

Asteroids can be classified into three main taxonomical groups based on their reflectance spectra. Asteroids belonging to the C-complex are typically dark in color and have low albedos (reflectivity), while S-complex asteroids are typically brighter and more reflective. In the DeMeo & Carry (2013) taxonomy, the X class is divided into three classes, E, M, and P, which are distinguished solely by their albedo ($P < 0.075$, $0.075 < M < 0.30$, $E > 0.30$). V-type asteroids are characterized by a deep absorption band around 1 micrometer, which is thought to be caused by the presence of the mineral olivine. They are thought to originate from the mantle of differentiated parent bodies.

The Dark Energy Survey (DES; Flaugher 2005, see also Dark Energy Survey Collaboration et al. (2016)) is used here to provide additional information on a set of more than 60,000 asteroids. DES is a collaborative effort that covered 5000 square degrees of the sky in the *grizY* bands from 2013 to 2019, primarily in the southern celestial sphere, aiming

at investigating the dark energy. It is clear, however, its importance as also a Solar System survey. In fact, among its contributions, DES discovered and characterized a large and distant scattered disk object (Gerdes et al. 2017), improved predictions of stellar occultations by numerous TNOs and Centaurs (Banda-Huarca et al. 2019), made hundreds of discoveries in the TNO region (Bernardinelli et al. 2022), provided a detailed photometric analysis of a large sample of Jupiter Trojans (Pan et al. 2022), produced the largest TNO color and light curve catalog, facilitated the development of techniques to obtain optimal measurements of fluxes, colors, binarity, and variability for these slow-moving objects (Bernardinelli et al. 2023), and even discovered a messenger from the outskirts of the Solar System (Bernardinelli et al. 2021).

We used two sets of data from DES photometric measurements, a high-quality set with *gri* slopes and *i* – *z* colors, where the classification method of DeMeo & Carry (2013) can be applied, and a much larger (*g* – *r*, *g* – *i*) database. We then cross-referenced the DES data with taxonomical, SDSS-MOC4, and albedo information, to understand how asteroid taxonomies are mapped in the new dataset. Based on the distribution of known asteroid taxonomies, predictions on unlabeled bodies can then be made, using machine learning methods, optimized by the use of genetic algorithms (Chen, P. W. and Wang, J. Y. and Lee H. 2004). Special attention is then given to more robust taxonomical classification for asteroid taxonomies that showed a good performance in DES data, such as the important V-type asteroids.

In section 2, we describe how the data was obtained from the DES database and organized. In section 3, we describe the use of the DeMeo and Carry taxonomy. Studies using the (*g* – *r*, *g* – *i*) data are done in section 4. Section 5 presents DES candidates for V-type asteroids, and conclusions are given in section 6.

2 OBTAINING DES DATA

All colors presented in this study were obtained through observations and measurements conducted by DES.

To search for known Solar System objects, we queried the entire DES database (Abbott et al. 2021a) using keywords from image headers like pointing coordinates, date and time of observations (Diehl et al. 2023), exposure time, and filter (Flaugher et al. 2015). We used an SQL-based tool called *easyaccess* (Carrasco Kind et al. 2018) for all queries of the DES database.

Having those pieces of information in hand, we identify the single-epoch CCDs that could have captured the image of a small Solar System body using the Sky Body Tracker (SkyBoT; Berthier et al. (2006)). SkyBoT, among other functionalities, yields a list of all known Solar System objects within a given field of view (FOV) when pointing coordinates, UTC date and time of observation, observing site coordinates, and FOV angular size are provided. We selected objects whose dynamical classification, as provided by the SkyBoT, were Hungaria, MB>Inner, MB>Middle, MB>Outer, MB>Cybele, MB>Hilda, or Jupiter Trojan, where MB stands for Main Belt.

We obtained positions, magnitudes and other pieces of information of the selected objects from the Year-6 (Y6) list of objects so-called Y6A1_FINALCUT_OBJECTS. The respective zero-points of each CCD were added to the magnitudes using the Forward Global Calibration Method (Burke et al. 2018), prepared by the collaboration (refer to Sects. 1 and 4.8 in Morganson et al. 2018, for more details about the finalcut catalog).

Methods for improved photometry, applied to outer Solar System objects present in the images of DES, have been recently developed (Bernardinelli et al. 2023). However, the Y6 catalog has features that make it an extremely attractive and valuable source to a variety of photometric studies, the one presented here in particular: (i) the same methods/procedures are used to derive flux measurements over the whole survey area, allowing us to coherently correlate colors of objects from different sky regions and (ii) readily available (upon password) data, thus saving a lot of CPU time, in addition to (iii) high quality single epoch photometry.

Table 1 shows the total number of asteroids that SkyBoT identified as belonging to a DES frame. We selected objects classified as Hungaria ($1.0 < a < 2.0$ au and $a(1 - e) > 1.666$ au), Inner Main Belt ($2.0 \leq a < 2.5$ au), Middle Main Belt ($2.5 \leq a < 2.82$ au), Outer Main Belt ($2.82 \leq a < 3.27$ au), (Main Belt) Cybele ($3.27 \leq a < 3.7$ au), Hilda ($3.7 \leq a < 4.6$ au) and Trojan ($4.6 \leq a < 5.5$ au) according to the SkyBoTclassification¹. However, not all of them were detected, often due to a faint magnitude that is difficult to observe in a single-epoch image or to a very large (many degrees in some cases) positional uncertainty. A brief description of the task and tools used to find known Solar System objects in DES images can be found in the work by Banda-Huarca et al. (2019). All positions and magnitudes were obtained from the Y6 final cut DES catalogs and were queried using the *easyaccess* tool.

It is important to note that the DES observational cadence may not always be suitable for determining the colors of small objects, since observations of a same object in different filters may be separated by long periods of time and

Table 1. Known Main Belt, Hungaria and Trojan objects in DES images as indicated by the SkyBoT. Note that the number of objects effectively present in the images is smaller.

Class	Number of objects
Hungaria	12 199
Main Belt - Inner	102 979
Main Belt - Middle	134 277
Main Belt - Outer	125 823
Cybele	1 876
Hilda	1 751
Trojan	1 684

we do not have accurate enough rotational information to correct for rotational effects. As a result, we formed colors for a given object using only observations that were obtained within 10 minutes of each other (Abbott et al. 2021b).

If we were to conduct an observational run specifically dedicated to measuring the colors of small objects, 10 minutes would be a reasonable estimate for obtaining magnitudes in different filters, taking into account the exposure time, readout and filter change. However, a very fast rotator would likely require simultaneous observations in the different filters.

The ALCDEF (Asteroid Light Curve Data Exchange Format, see Stephens & Warner 2018; Warner et al. 2011; Stephens et al. 2010) website displays a plot² indicating that most asteroids have rotational periods longer than 2 hours, with many falling between 4 and 10 hours. If we consider the shortest period of 2 hours, 10 minutes of observations corresponds to a rotation of 30 degrees, while for a 7-hour period, we have a rotation of only 8.6 degrees. Therefore, our decision to group observations of the same object that were acquired within 10 minutes appears to be a good compromise between minimizing the impact of rotational effects on colors while keeping a sample as large as possible.

We can estimate the maximum error caused by neglecting pure rotational effects (i.e., considering a surface with homogeneous albedo) in our database. If we simplify the asteroid light curves as a double-peaked triangle wave and assume a large amplitude, of 0.5 mag for a 4-hour rotation period, a 10-minute separation between observations corresponds to a magnitude change of approximately $10/(4 \cdot 60/4) \cdot 0.5 \simeq 0.083$. For a 10-hour rotation period, the magnitude change would be only 0.033. Fast-rotating asteroids ($\simeq 4$ hr period) would generally have smaller amplitudes because elongated objects are more prone to breaking (see Figure 9 in Chang et al. (2019)). In most cases, the rotational effect on color should be of the order of 10^{-2} , and should not exceed 0.1.

Albedo variations, however, do exist and have statistical significance on color variations (see discussion in Szabó et al. (2004)). Its overall impact can be inferred from table (2). The color of a given object (e.g., $g - r$) is determined by the mean value of multiple measurements of that color and its uncertainty is represented by the respective standard deviation. One might reasonably anticipate that color uncertain-

¹ <https://vo.imcce.fr/webservices/skybot/?documentation>

² https://alcdef.org/php/alcdef_aboutLightcurves.html

Table 2. DES $(g-r)$ colors for inner main belt asteroids. We report the standard deviations of measurements in $(g-r)$, the number of colors recorded per object, and the total count of $(g-r)$ measurements used to calculate the mean value. Additionally, we present the total count of objects with a $(g-r)$ color, regardless whether they were utilized in this study.

Stand. Dev in $(g-r)$	# of $(g-r)$ colors per object	Total number of $(g-r)$ colors used
0.041	1 to 3	20825
0.058	4 to 6	403
0.059	7 to 9	30
0.064	10 to 12	32
0.051	13 to 15	7
0.028	16 to 18	10
0.044	19 to 21	5
0.042	22 or more	7

ties in color depend on the number of measurements under the influence of a variable albedo (the smaller the average over a rotation, the more probable it is to obtain a large uncertainty). Table (2) shows that this is not the case. Based on this analysis, it can be concluded that albedo variations on the surface of asteroids are not likely to introduce significant systematic effects on our results.

Finally, in order to compare our data with known sources in the literature on asteroid taxonomy (see Sects. 3 and 4), we transformed DES colors into SDSS (Sloan Digital Sky Survey) ones using the transformation equations from [Abbott et al. \(2021a\)](#).

However, instead of using individual equations for each filter, we used their differences. In this context, to provide the necessary photometric information for section 3 and 4, we only needed the following colors from DES: $(g-r)_{\text{DES}}$, $(g-i)_{\text{DES}}$, $(r-i)_{\text{DES}}$ and $(i-z)_{\text{DES}}$. Solar apparent magnitudes and central wavelengths in the SDSS, where necessary, were taken from [Willmer \(2018\)](#). More specifically, the DES to SDSS color transformations used were

$$\begin{aligned}
 (g-r)_{\text{SDSS}} &= (g-r)_{\text{DES}} + 0.060 \times (g-i)_{\text{DES}} \\
 &\quad - 0.150 \times (r-i) - 0.019 \\
 (g-i)_{\text{SDSS}} &= 1.060 \times (g-i)_{\text{DES}} - 0.167 \times (r-i)_{\text{DES}} \quad (1) \\
 &\quad + 0.022 \\
 (i-z)_{\text{SDSS}} &= (i-z)_{\text{DES}} + 0.113 \times (r-i) - 0.003
 \end{aligned}$$

, where the first members of Eqs. 1 are SDSS colors and colors in the second members are from DES. The variances (σ^2) in SDSS colors are given by the error propagation of these equations, added quadratically the root mean square of the respective band transformations from [Abbott et al. \(2021a\)](#) used to determined each of the color equations above.

3 DES DATABASE: DEMEO AND CARRY TAXONOMY

As a preliminary step of our analysis, we selected asteroids from the DES database for which both gri slopes and $i-z$ colors are both available. The color indices contain information that can be used to derive a very low-

resolution reflectance spectrum denoted as Rf . We calculate Rf using the equation $Rf = 10^{-0.4(M_f - M_{\odot f})}$, where M_f is the magnitude of the asteroid and $M_{\odot f}$ is the magnitude of the Sun in the same filter. To normalize Rf to 1 at a given wavelength we use the relationship $Rf_{\lambda,v} = 10^{-0.4[(M_f - M_v) - (M_{\odot f} - M_{\odot v})]}$. The spectral gradient, or slope, is then given by (with λ in nanometers, see also [Sabater et al. \(2009\)](#)):

$$S(\lambda_1, \lambda_2) = 10^4 \frac{Rf_{\lambda_2,v} - Rf_{\lambda_1,v}}{|\lambda_2 - \lambda_1|}. \quad (2)$$

In our case, v is the SDSS g filter.

This slope, as given above, is expressed as a percentage per 100 nanometers. To calculate the $Rf_{\lambda,v}$ value for each asteroid, we used the Sloan g , r , and i magnitudes and the effective wavelengths (see [Willmer 2018](#)) of each of these filters and then fit a straight line to the pairs (λ, Rf, v) . The angular coefficient from this adjustment gives the gri slope in % / 100nm.

These parameters are necessary to classify the asteroid taxonomies according to the method of [DeMeo & Carry \(2013\)](#), which is based on data from the Sloan Digital Sky Survey-Moving Object Catalog data (SDSS-MOC4; [Ivezić et al. \(2001\)](#)). Our objective here is to identify asteroids present in both catalogs and to infer what taxonomical properties can be obtained from DES data. Given their temporal constraints, 17154 asteroids with gri slopes and $i-z$ colors are present in the DES database. To eliminate outliers, we only consider asteroids within the 0.15 to 0.85 quantile interval for both parameter distributions³. This corresponds to intervals in gri slope between -34.738 and 43.466, and in $i-z$ between -0.627 and 0.612. Outliers are displayed as blue full transparent circles in figure (1). For statistical reasons, we will exclude outliers from our analysis, hereafter, yielding a sample of 17135 asteroids, 10685 of which are numbered, and the rest multi-opposition asteroids. Most of the outliers are data points beyond the range for which the [DeMeo & Carry \(2013\)](#) method applies, shown as a dashed blue box in figure (1), and most of them are not shown in figure (1). Therefore, removing these objects does not cause any significant loss of information⁴. The range of absolute magnitudes for the data set without outliers goes from 9.0 to 20.5. On the top and right side of figure (1), we display histograms of gri slope and $i-z$ colors for the population of asteroids without outliers. While there is a single peak for the $i-z$ distribution, neither distribution is normal. If we compute the skewness, which is a measure of the symmetry or asymmetry of a distribution, and the kurtosis, which measures whether the data are heavy-tailed or light-tailed

³ Quantiles are cut points that divide the range of a probability distribution into continuous intervals with equal probabilities. The median value of a distribution would correspond to a quantile of 0.50. More information on the procedure to compute quantiles can be found in [Blitzstein & Hwang \(2019\)](#).

⁴ Other quantile intervals were also considered. For a distribution within the 0.10 to 0.90 quantile interval only 2 outliers were found. This number increases to 42 if we consider distributions within 0.20 and 0.80. However, for such distributions, some data points within the range for which the classification method proposed by [DeMeo & Carry \(2013\)](#) applies were also excluded. For these reasons, we decided to work with the 0.15 to 0.85 quantile interval.

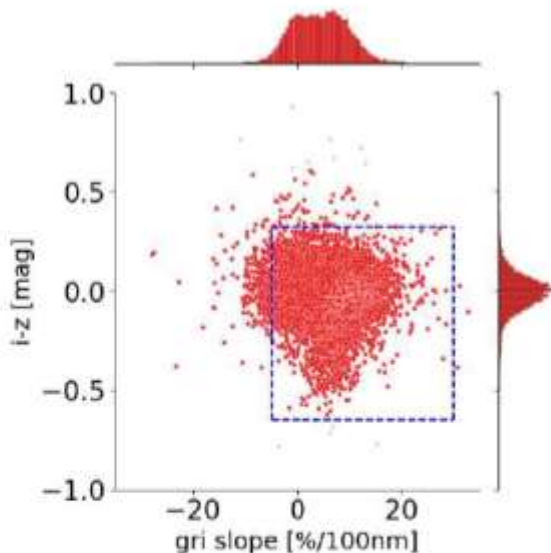


Figure 1. A joint plot of asteroids with available DES data, showing their gri slope, $i - z$ values (blue transparent full circles). The full red circles represent asteroids with values of the two parameters within the 0.15 to 0.85 quantile interval in the gri slope and $i - z$ color distributions. The dashed blue box displays the interval for which the DeMeo & Carry (2013) classification scheme applies. The top and right side of the figure show histograms of the gri slope and $i - z$ colors distributions without outliers, respectively.

relative to a normal distribution, both distribution moments are significantly different from 0, which is the expected value for a Gaussian distribution. Both are skewed, one toward the right and one toward the left flank, with values of skewness of 0.14 and -0.53, respectively. Both are leptokurtic distributions, with heavier tails than a normal distribution. The values of kurtosis are 3.31 and 6.45, respectively. These results show that neither of the distributions can be modelled as Gaussian distributions, and that more complex models should be used for this data.

Having obtained the data set of asteroids in the $(gri$ slope, $i - z$) plane, it may be important to check how properties like the asteroids' absolute magnitudes may correlate with these data. While the size of an asteroid also depends on its albedo, objects with small absolute magnitudes tend to have larger sizes, and vice versa. In the main belt, more than 40% of the asteroid population belong to asteroid families (Milani et al. 2014), and the distribution of large and small objects tends to be not significantly different in proper element domains (Granvik et al. 2017). This is also observed in the $(gri$ slope, $i - z$) plane, as shown in the left panel of figure (2), where the distributions of large and small objects are fairly similar. While smaller objects cover a larger area than the larger ones, this is likely due to their greater number. Regions with a high number density of asteroids are inhabited by both small and large objects. Also, DES data observed fainter objects than previous surveys, like the Sloan Digital Sky Survey-Moving Object Catalog data (SDSS-MOC4 or SDSS, for brevity; Ivezić et al. (2001)). The right panel of figure (2) shows histograms of absolute magnitude distributions for the two surveys. Absolute mag-

nitude H were obtained from the Asteroid Families Portal AFP (["http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/index.php"](http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/index.php), Radović et al. (2017), accessed on June 2023). Nominal errors on H are of the order of one decimal digit (Pravec et al. 2012)⁵. We expect that the new data on fainter objects observed by DES could provide new insights on the physical properties of small asteroids.

To begin, we aim at finding location of asteroids with known taxonomies in this new data set. For this purpose, we refer to the asteroid taxonomical data available in the surveys of Bus & Binzel (2002), Lazzaro et al. (2004), and DeMeo et al. (2009). For asteroids with more than one entry in the three surveys, we use a majority vote method to assign the most likely spectral type. There were 14 asteroids with taxonomical data in our selected DES data: 5 C-type, 3 S-type, and 6 X-type. Their location in the $(gri, i - z)$ diagram is shown in figure (3). Apart from two X-type asteroid, there is no indication that the DES parameters are inconsistent with the classification scheme of DeMeo & Carry (2013). However, small number statistics prevent us from reaching more compelling conclusions. Most of the errors that we observed are in the horizontal axis, which are associated to errors in the gri slopes.

To increase the number of asteroids with taxonomical information, we turned our attention to the Sloan Digital Sky Survey-Moving Object Catalog data (SDSS-MOC4; Ivezić et al. (2001)). Although the taxonomical information from the SDSS-MOC4 data has some limitations, as it is based on photometrical colors, it can still provide useful preliminary information on asteroids' physical properties. Firstly, we eliminate asteroids with large errors in gri slope (error larger than 10 %/100nm) and $i - z$ color (error larger than 0.1 mag). Then, we identify 950 asteroids for which the method of DeMeo & Carry (2013) can be used to obtain asteroid taxonomies. Results for the whole SDSS-MOC4 data are available at <https://sbn.psi.edu/pds/resource/sdsstax.html>. The identified asteroids include: 100 X-types, 54 D-types, 345 C-types, 151 L-types, 29 Q-types, 271 S-types, 5 A-types, and 32 V-types. We neglected subclasses like the CX, SQ, SV, LS and QV, since we will show that DES data does not have the resolution needed to perceive these subtle differences. SV and QV objects were classified as V-type since they are all found in regions of the $(gri$ slope, $i - z$) plane occupied by this class of objects. The left panel of figure (4) displays the position in the plane of $i - z$ color versus gri slope for all these asteroids.

The classification obtained from DES data does not always agree with that from SDSS-MOC4, also because the usually large uncertainties on DES gri slopes. To further check the validity of the DES taxonomy, we also performed correlations with the Carvano et al. (2010) and (Popescu et al. 2018) data sets. Table (3) presents the classification accuracy for asteroids in various spectral types for

⁵ The same authors found that there is a systematic negative offset of absolute magnitudes in catalogs, which reaches a peak of -0.5 around $H = 14$. We are not correcting for these biases in this work, since our focus is on larger values of H . However, it is important to alert the reader to these biases for data around $H \approx 14$.

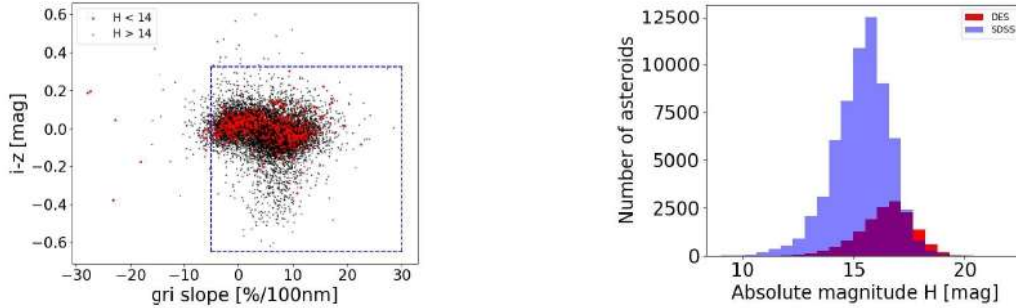


Figure 2. Left panel: a projection in the $(gri\ slope, i - z)$ plane of DES large ($H < 14$) and small ($H > 14$) asteroids. The distribution of the two populations is not significantly different. In the right panel, we show the absolute magnitude distribution of asteroids in the SDSS-MOC4 database and in the DES data set, for which gri slope and $i - z$ colors are available. The DES survey covers fainter objects than those reached by the SDSS one.

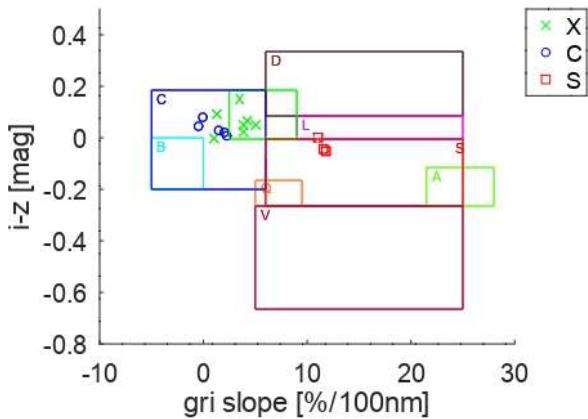


Figure 3. $i - z$ colors versus gri slope for asteroids with taxonomical data present in the DES database. The colored boxes represent the boundaries of the DeMeo & Carry (2013) taxonomical classes.

cross-correlations with the three data sets: C-types and V-types can be classified by DES data with purities, defined as the fraction of DES taxonomic labels correctly classified as such, as of 50% or higher, while the other types have low purity percentages. Interestingly, 44.4% of the misclassified V-type are found in the central and outer main belt, while no confirmed V-type has been found in these regions. This suggests that V-type candidates identified from DES data in these areas should be approached with caution. SV types can be easily misclassified as V-types using DES data, and none of the A-types were classified correctly. Based on this analysis, we propose a limited DES taxonomical classification consisting of three groups, the C- and S-complex, and the V-types. The C-complex will include X, D, and C-types, while the S-complex will encompass the remaining A, L, Q, K, and S-types. The V-types will remain as a separate class.

The new results for DES data are presented in the right panel of figure (4) and table (4). The purities for both complexes are now above 75.0%, suggesting that this simplified scheme could be applied more successfully. Following the analysis of Ivezić et al. (2002), we also plot in figure (5) the orbital distribution of C-complex, S-complex, and V-type objects as identified in both DES and SDSS-MOC4. Proper elements were obtained from *AFP*. As expected, C-complex asteroids are more common in the outer main belt,

while S-complex asteroids are mostly found in the inner main belt, with some mixing of the two complexes. We can easily identify single asteroid families, like the S-complex Eunoimia family in the central main belt, roughly at $a \simeq 2.6$ au, $\sin(i) \simeq 0.25$, or the Koronis family in the pristine region, at $a \simeq 2.9$ au, $\sin(i) \simeq 0.05$. V-type asteroids are mostly associated with the Vesta family at $a \simeq 2.35$ au, $\sin(i) \simeq 0.12$, but are also found in the central and outer main belt. Because of the importance of V-type asteroids for early scenarios of the Solar System formation, we will further discuss their orbital distribution in section (5).

Finally, we searched for objects in the DES dataset with albedo data in the WISE and NEOWISE, AKARI, or IRAS databases (Masiero et al. 2012; Usui et al. 2011; Ryan & Woodward 2010), and we identified 1573 asteroids, as shown in figure 6. Albedo data correlates rather well with the position of asteroids in the plane of $i - z$ color vs gri slope: 81.5% of objects identified as C-complex have values of $p_V < 0.12$, and 94.6% of S-complex asteroids (we include V-type asteroids as S-complex bodies for albedo purposes) have $p_V > 0.12$, as expected for these bodies. The lower value of C-complex asteroids with low albedo data, in contrast to the higher percentage of S-complex asteroids with high albedos can be attributed to the fact that C-complex asteroids include X-type, which, as discussed in section (1), also include the M- and E-types, which have high albedos. Table (5) summarizes our findings.

What predictions can be made based on these results? Based on the results of the SDSS-MOC4 analysis, we can train machine learning (ML) algorithms. In order to select the best-performing ML methods and the combination of its free parameters, or hyper-parameters, that work best for our dataset, we use genetic algorithms (Chen, P. W. and Wang, J. Y. and Lee H. 2004), according to the procedure described in Carruba et al. (2021). We run the genetic algorithm procedure on a subset of asteroids with both DES and SDSS-MOC4 data three times, using a validation set corresponding to 20% of the training data. The use of a validation set is recommended to avoid the issue of overfitting, which happens when the model is overly sensitive to the fine details of the training set, but may perform poorly when dealing with other sets of data. The best-performing algorithm was a Gaussian Naive Bayes (GNB) estimator (Chan et al. 1979). GNB is a classification technique used in ML based on the probabilistic approach and Gaussian

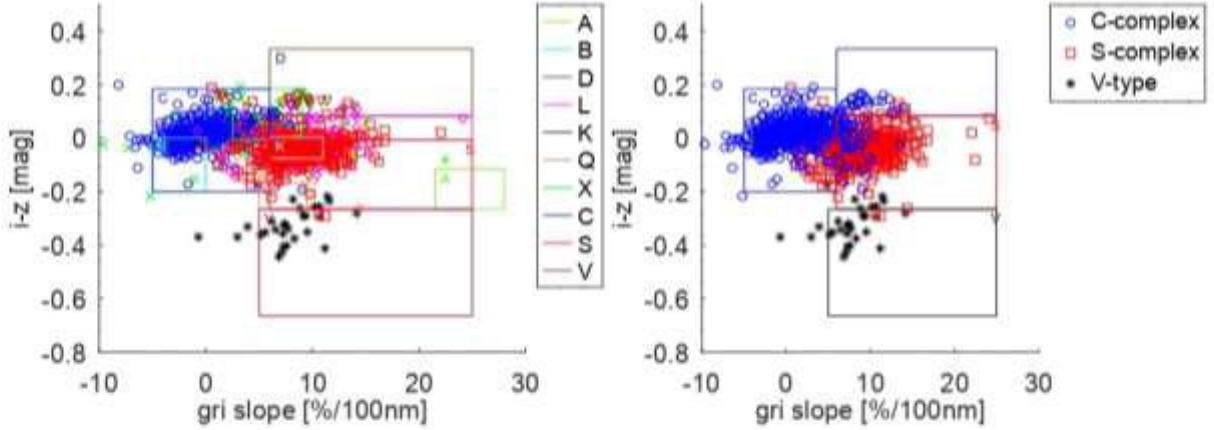


Figure 4. $i - z$ color versus gri slope of asteroids with data in both the SDSS-MOC4 and DES database. The boundaries of the DeMeo & Carry (2013) taxonomical classes are identified by the colored boxes. The left panel displays the positions of these asteroids for all DeMeo & Carry (2013) available classes, while the right panel shows a simplified classification scheme that only identifies C-complex, S-complex asteroids, and V-type objects.

Table 3. Percentage of consistent taxonomic classifications, or purity, for asteroids in both the DES and SDSS-MOC4, the DES and the Carvano et al. (2010), and the DES and the MOVIS databases.

Ast. type	# of asteroids	Percentage of SDSS-MOC4 cons. classification	# of asteroids	Percentage of Carvano et al. (2010) cons. classification	# of asteroids	Percentage of MOVIS cons. classification
X	100	41.0	91	40.7	9	22.2
D	54	37.0	40	30.0	8	12.5
C	345	63.8	335	64.2	21	66.7
A	5	0.0	5	0.0	65	0.0
L	151	19.2	150	18.8	28	32.0
Q	29	34.5	33	30.3	0	-
S	268	38.8	270	38.5	55	34.5
V	32	65.6	25	64.0	21	52.4

Table 4. Percentage of consistent taxonomic classifications (purities) for asteroids in both the DES and SDSS-MOC4 databases for a revised taxonomical scheme.

Asteroid complex	# of asteroids	Percentage of cons. classification
C	499	94.2
S	454	80.0
V	32	65.6

Table 5. Percentage of asteroids with C and S-complex classifications with geometric albedo $p_v < 0.12$ and $p_V > 0.12$, respectively.

Asteroid complex	# of asteroids	Percentage of albedo values
C	1188	81.5
S	385	94.6

distribution. GNB assumes that each parameter (also called features or predictors) has an independent capacity of pre-

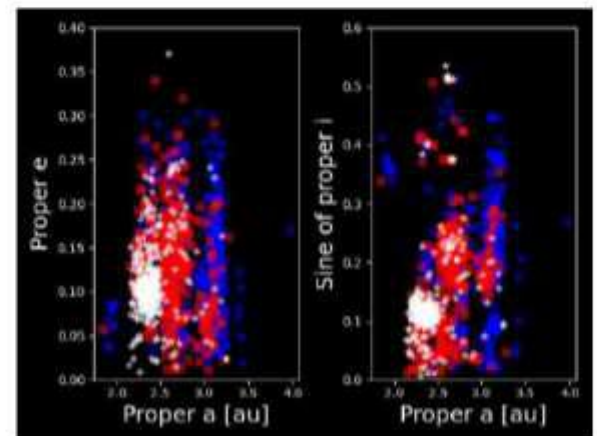


Figure 5. Projections in the proper (a, e) and proper $(a, \sin(i))$ of the C-complex (blue circles), S-complex (red squares) and V-type objects (white asterisks), identified in both the DES and SDSS-MOC4 databases, and as listed in table (4). Proper elements were obtained from *AFP*.

dicting the output variable. The combination of the prediction for all parameters is the final prediction, that returns a probability of the dependent variable to be classified in each group. The final classification is assigned to the group with

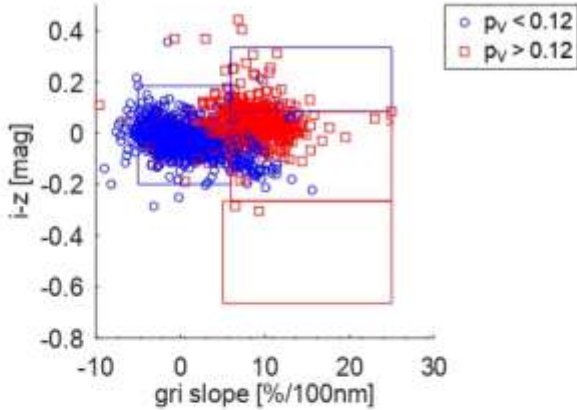


Figure 6. $i - z$ color versus gri slope for asteroids with albedo data and present in the DES database.

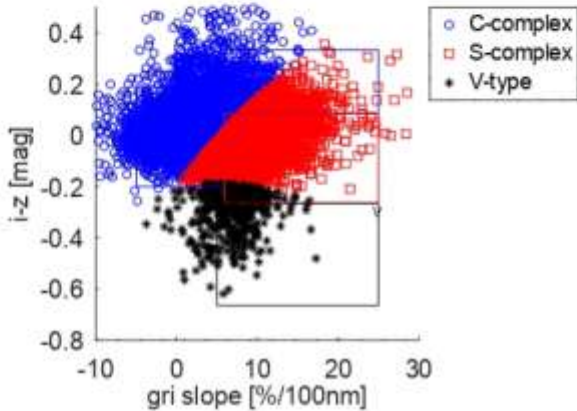


Figure 7. $i - z$ color versus gri slope of the ML predicted data for asteroids in the DES database with no SDSS-MOC4 data.

the higher probability. Finally, since we are dealing with a multi-classification problem, the use of a f_1 score, defined as a harmonic of precision and recall ($f_1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$), is more appropriate to correctly estimate the efficiency of the algorithm, rather than the more commonly used accuracy. The model had an f_1 score of 91.6%.

Figure (7) displays the results of a prediction for 16516 asteroids with no previous labels. Predictions were made separately for numbered and multi-opposition asteroids, using the same training data. The diagonal line in figure (7) is caused by the presence of D-type objects that extends the boundaries of C-complex upward and rightward. In the ML model, this causes the boundary between C-complex and S-complex to be a diagonal line. Our classifier predicts that 10213 of the asteroids are likely to be C-complex, 5890 are likely S-complex asteroids, and 410 are new possible V-type objects.

4 DES DATABASE: (G-R,G-I) PLANE

The number of asteroids with DES data increases significantly if we consider the $g - r$ and $g - i$ colors instead of the $i - z$ and gri slope, passing from 17078 to 61493. Their distribution in the $(g - r, g - i)$ plane is shown in figure 8, with g, r, i being the photometric bands of the SDSS ‘*ugriz*’ sys-

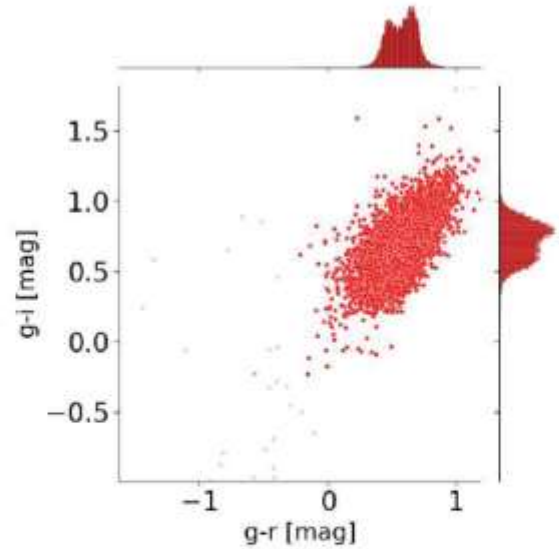


Figure 8. A joint plot of the $(g - r, g - i)$ colors for asteroids with available DES data. The blue full transparent circles indicate outlier data in the distributions of both colors. The histograms of the two colors distributions, without the outliers, are displayed on the top and right sides, respectively.

tem. While some of the brightest objects can have negative values of these colors, most asteroids are found in an interval from 0.2 to 1.2 in both quantities. To eliminate these outliers, we again only consider asteroids within an interval of quantiles of 0.15 to 0.85 for both color distributions, which corresponds to the interval $-0.266 < g - r < 1.393$ and $-0.326 < g - i < 1.746$. Outliers are displayed as blue full circles in the figure, while red full circles show the positions of the rest of the dataset. We will exclude outliers from our analysis, henceforth. After removing the outliers, we ended up with a dataset of 61142 asteroids. Figure 8 shows a joint plot and histograms of $g - r$ and $g - i$. Both distributions are single-peaked, slightly skewed, with skewness of -0.17 and -0.16, respectively, and leptokurtic, with kurtosis values of 3.37 and 3.08.

First, we investigate where asteroids in this new data set with known taxonomies could be located. Our results are shown in figure 9. We identified 71 asteroids with taxonomical data: 4 B-, 14 C-, 3 D-, 15 X-, 29 S-, 2 L-, and 3 V-types. B, C, D, and X asteroids are darker objects, associated with the so-called C-complex, while the other types are brighter objects associated with the S-complex. Our data show that the two complexes are fairly separated in this domain, with C-complex asteroids located in the left part of the ellipsoidal distribution of $(g - r, g - i)$ values, and S-complex asteroids concentrating in the right part. However, different taxonomies inside these complexes overlap with each other. While DES data could help discriminate between C- and S-complexes, we do not have enough resolution in the $(g - r, g - i)$ domain to perform a more in-depth taxonomical analysis, including the V-type asteroids.

To further confirm this hypothesis, we use the method of DeMeo & Carry (2013) to obtain taxonomical information for asteroids listed in the Sloan Digital Sky Survey-Moving Object Catalog data (SDSS-MOC4, Ivezić et al. 2001). Re-

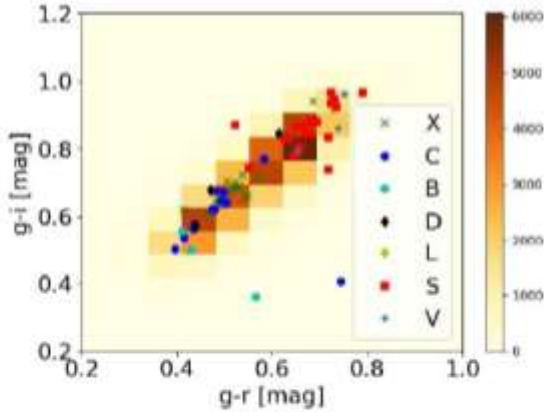


Figure 9. A 2D histogram in the $(g-r, g-i)$ plane of the asteroids with DES data. The color symbols are objects for which taxonomical information is available in the [Bus & Binzel \(2002\)](#), [Lazzaro et al. \(2004\)](#), and [DeMeo et al. \(2009\)](#) surveys, according to the color and size code shown in the legend.

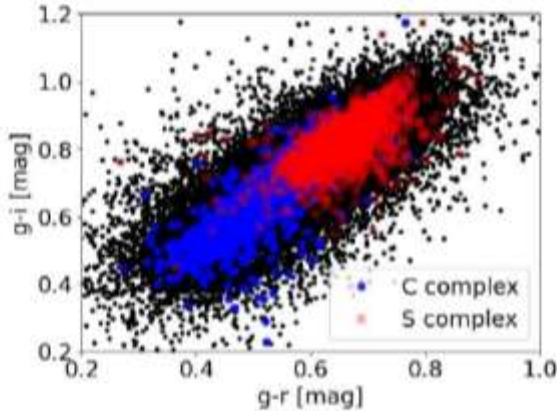


Figure 10. Projection in the $(g-r, g-i)$ plane of the asteroids with DES data and SDSS-MOC4 taxonomies. Blue circles identify asteroids likely to belong to the C-complex, while red squares display asteroids with more likely to belong to the S-complex. Black points are asteroids with no SDSS-MOC4 data.

results for the [Carvano et al. \(2010\)](#) and [Popescu et al. \(2018\)](#) data sets are similar and will not be presented or discussed for the sake of brevity. We identify 3347 asteroids having data in both databases, of which 1514 are within the C-complex, and 1833 are within the S-complex. Figure 10 shows the $(g-r, g-i)$ distribution of these objects, which confirms the results from the spectroscopical surveys data: there is a clear separation between C-complex and S-complex asteroids in this domain. Again, the data resolution is not sufficient to distinguish between different asteroid types, as previously observed, and this is not shown in figure 10 for simplicity.

Finally, while the distribution of albedo values may vary among a single spectral type, C-complex asteroids tend to have lower values of geometric albedos p_V , while S-complex ones have larger p_V . We searched for objects in the DES dataset with albedo data in the WISE and NEOWISE, AKARI, or IRAS databases, and identified 5122 asteroids, as

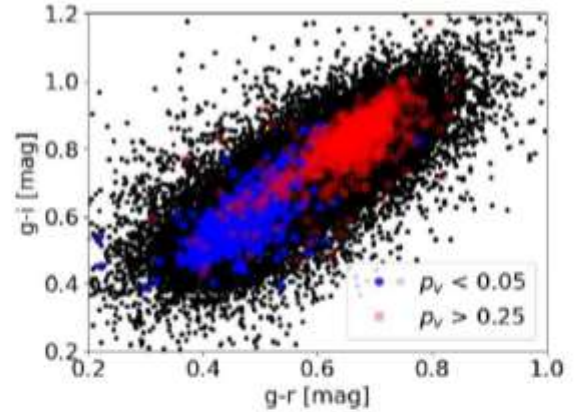


Figure 11. Projection in the $(g-r, g-i)$ plane of the asteroids with DES data and albedo values. Blue circles identify asteroids with albedo p_V lower than 0.05, while red squares display asteroids with $p_V > 0.25$.

shown in figure 11. While asteroids with intermediate albedos ($0.05 < p_V < 0.25$) cover the $(g-r, g-i)$ domain more or less uniformly, very dark ($p_V < 0.05$) and very bright ($p_V > 0.25$) asteroids are quite separated in the $(g-r, g-i)$ domain, which confirms the trends observed for taxonomic data.

Using taxonomic information obtained from the SDSS analysis, we utilized genetic algorithms to determine the optimal ML methods for predicting the complex type of asteroids based on the $(g-r, g-i)$ DES data. Our analysis found that the Linear Support Vector Classifier (Linear SVC, ([Cortes & Vapnik 1995](#))) performed the best.

Linear SVC is a type of machine learning algorithm used for classification tasks, where the goal is to assign each input to one of a set of predefined categories or classes. Linear SVC is a variant of the Support Vector Machine (SVM) algorithm that uses a linear kernel function. In Linear SVC, the algorithm tries to find the hyperplane that separates the different classes with the largest possible margin. The hyperplane is defined as the set of points in the feature space where the decision boundary between classes lies. The margin is the distance between the hyperplane and the closest points from each class. The larger the margin, the more robust the classification will be to noise and outliers.

For our model, we used a C parameter, which controls the trade-off between achieving a low training error and a low testing error, of 0.1. a penalty parameters equal to $l1$, which uses the $l1$ regularization method, and a tolerance parameter, which specifies the tolerance for stopping the optimization algorithm, of 0.0001. Other parameters were the standard choices for the Linear SVC algorithm. Our model achieved an accuracy of 90.9% on the validation set, which, as in the previous section, was 20% of the original training set.

Figure (12) shows predictions for 58118 new asteroids with no prior complex information. Our analysis suggests that 28871 of these objects belong to the C-complex, while 29247 are more likely to be S-complex asteroids. The higher fraction of S-complex asteroids, as opposed to C-complex in the $(g-r, g-i)$ domain with respect to the $(gri \text{ slope}, i-z)$ plane can be explained by the fact that, in the $(g-r, g-i)$

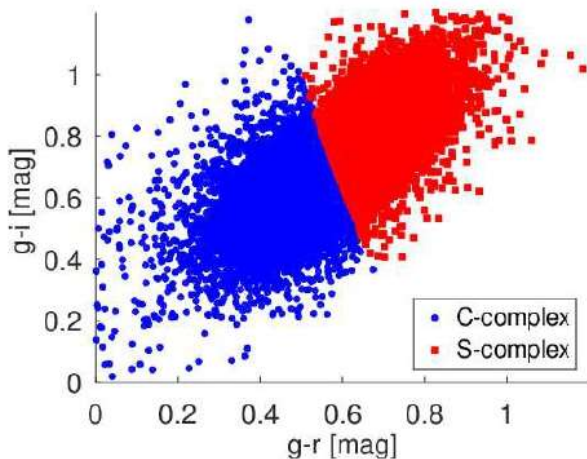


Figure 12. $(g-r, g-i)$ colors of the ML predicted data for asteroids in the DES database.

domain V-type asteroids are considered as part of the S-complex.

5 V-TYPE ASTEROIDS: DES CANDIDATES

In section (3), we observed that the accuracy of predicting V-type objects in the gri slopes and $i-z$ color plane was higher (65.6%) than for other classes. V-type objects are important because of their association with differentiated parent bodies and basaltic composition. Identifying their orbital location and physical properties may provide insights about the early phases of our Solar System formation. To date, asteroid 4 Vesta is the only confirmed differentiated body in the main belt, but other possible differentiated parent bodies have been suggested in the past. Using the DES data in the gri slopes and $i-z$ color plane, we identified 410 new potential V-type objects with available proper elements from the Asteroid Family Portal AFP, <http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/> (Novaković et al. 2022), 85 of which are located in the central and outer main belt.

Figure (13) displays their projection onto a proper $(a, \sin(i))$ plane. The dynamical evolution of V-type objects suggests that there may be six possible regions where injected material, either from a local or remote source, can evolve due to non-gravitational forces. Carruba et al. (2014) identified three such regions in the central main belt, named after three possible local differentiated bodies: Hansa, Eunomia, and the Agnia/Merxia parent body. A similar analysis by Huaman et al. (2014) found three comparable dynamical regions in the outer main belt: the Dembowska, Eos, and Magnya regions. DES V-type candidates are primarily located where they are expected, near the Vesta family and in the densely populated Eunomia and Eos regions. Further investigation of their physical properties and understanding their dynamical evolution will remain a challenge for future studies.

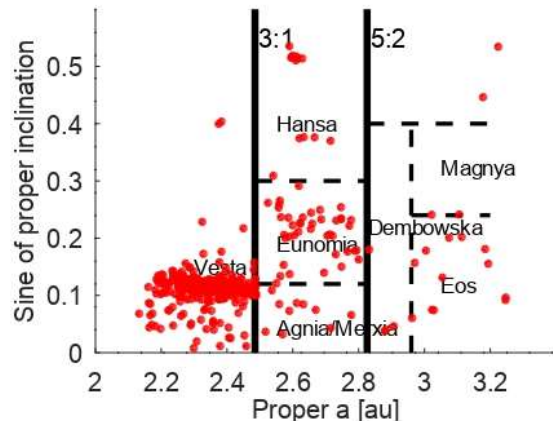


Figure 13. A proper $(a, \sin(i))$ projection of the V-type candidate asteroids identified using DES data. Vertical full lines identify the dynamical boundaries of the inner, central and outer main belt. The dashed lines show the location of the dynamical regions associated with possible local sources of V-type materials, as identified by Carruba et al. (2014) and Huaman et al. (2014).

6 SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this study, we aimed to explore the feasibility of using DES data to infer physical properties of main belt asteroids. We initially focused on using the gri slopes and $i-z$ colors of asteroids, as this plane allows us to employ the taxonomic classification scheme of DeMeo & Carry (2013). After removing outliers, we identified a population of 17135 asteroids. However, with the exception of V-type and possibly C-type asteroids, DES data in this plane is insufficient to identify all the DeMeo & Carry (2013) taxonomies. Nonetheless, we can still distinguish between C- and S-complex taxonomies. We utilized machine learning approaches, optimized using genetic algorithms, to predict complex labels for 10213 asteroids that previously had no taxonomic information.

A much larger sample of objects is available if we consider the $(g-r, g-i)$ plane, with a sample of 61493 asteroids with such data obtained after outlier removal. We employed machine learning algorithms to predict the complex labels of 58118 new asteroids with no prior taxonomic information, using the asteroids with SDSS-MOC4 known taxonomies as a training sample.

Lastly, we used DES data to identify 410 possible new V-type objects. Their distribution in the proper $(a, \sin(i))$ domain is consistent with the location of known V-type bodies. Future research could concentrate on further examination of the physical characteristics and dynamical evolution of the asteroids identified in this study.

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to an anonymous reviewer for insightful and constructive comments that greatly improved the quality of this work. We would like to thank the Brazilian National Research Council (CNPq, grant 304168/2021-1). J.I.B.C. acknowledges grants 305917/2019-6, 306691/2022-1 (CNPq) and 201.681/2019 (FAPERJ). This research used computational resources from the Interinstitucional Laboratory of e-Astronomy (LIneA) with financial support from the

INCT of the e-Universo (Process number 465376/2014-2). F.S.F. acknowledges the support of Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. V.F. acknowledges a CNPq support, PIBIC/ON (process 143944/2022-3). Funding for the DES Projects has been provided by the U.S. Department of Energy, the U.S. National Science Foundation, the Ministry of Science and Education of Spain, the Science and Technology Facilities Council of the United Kingdom, the Higher Education Funding Council for England, the National Center for Supercomputing Applications at the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Kavli Institute of Cosmological Physics at the University of Chicago, the Center for Cosmology and Astro-Particle Physics at the Ohio State University, the Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy at Texas A&M University, Financiadora de Estudos e Projetos, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico and the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, the Deutsche Forschungsgemeinschaft and the Collaborating Institutions in the Dark Energy Survey.

The Collaborating Institutions are Argonne National Laboratory, the University of California at Santa Cruz, the University of Cambridge, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-Madrid, the University of Chicago, University College London, the DES-Brazil Consortium, the University of Edinburgh, the Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Fermi National Accelerator Laboratory, the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Institut de Ciències de l'Espai (IEEC/CSIC), the Institut de Física d'Altes Energies, Lawrence Berkeley National Laboratory, the Ludwig-Maximilians Universität München and the associated Excellence Cluster Universe, the University of Michigan, NSF's NOIRLab, the University of Nottingham, The Ohio State University, the University of Pennsylvania, the University of Portsmouth, SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, the University of Sussex, Texas A&M University, and the OzDES Membership Consortium.

Based in part on observations at Cerro Tololo Inter-American Observatory at NSF's NOIRLab (NOIRLab Prop. ID 2012B-0001; PI: J. Frieman), which is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with the National Science Foundation.

The DES data management system is supported by the National Science Foundation under Grant Numbers AST-1138766 and AST-1536171. The DES participants from Spanish institutions are partially supported by MICINN under grants ESP2017-89838, PGC2018-094773, PGC2018-102021, SEV-2016-0588, SEV-2016-0597, and MDM-2015-0509, some of which include ERDF funds from the European Union. IFAE is partially funded by the CERCA program of the Generalitat de Catalunya. Research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) including ERC grant agreements 240672, 291329, and 306478. We acknowledge support from the Brazilian Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) do e-Universo (CNPq grant 465376/2014-2).

This manuscript has been authored by Fermi Research

Alliance, LLC under Contract No. DE-AC02-07CH11359 with the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of High Energy Physics.

7 DATA AVAILABILITY

The taxonomical complexes data, as well as the data on DES V-type candidates, are available at the NASA Planetary Data System (PDS): Carruba, V., Camargo, J. I. B., Aljbaae, S, and the Dark Energy Survey Team (2024). Taxonomy, colors, and slope parameters for asteroids from the Dark Energy Survey V1.0. [urn:nasa:pds:gbo.ast.des.taxonomy::1.0](https://doi.org/10.26033/m95p-bn08). NASA Planetary Data System; <https://doi.org/10.26033/m95p-bn08>.

8 CODE AVAILABILITY

All codes are available from the authors, upon reasonable request.

REFERENCES

- Abbott T. M. C., et al., 2021b, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 255, 20
- Abbott T. M. C., et al., 2021a, *ApJS*, 255, 20
- Banda-Huarcá M. V., et al., 2019, *AJ*, 157, 120
- Bernardinelli P. H., et al., 2021, *ApJ*, 921, L37
- Bernardinelli P. H., et al., 2022, *ApJS*, 258, 41
- Bernardinelli P. H., et al., 2023, *arXiv e-prints*, [p. arXiv:2304.03017](https://arxiv.org/abs/2304.03017)
- Berthier J., Vachier F., Thuillot W., Fernique P., Ochsenbein F., Genova F., Lainey V., Arlot J. E., 2006, in Gabriel C., Arviset C., Ponz D., Enrique S., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 351, Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*. p. 367
- Blitzstein J. K., Hwang J., 2019, *Introduction to Probability*. CRC press
- Burke D. L., et al., 2018, *AJ*, 155, 41
- Bus S. J., Binzel R. P., 2002, *Icarus*, 158, 146
- Carrasco Kind M., Drlica-Wagner A., Koziol A., 2018, *easyaccess: SQL command line interpreter for astronomical surveys*, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1812.008 ([ascl:1812.008](https://ascl.net/1812.008))
- Carruba V., Huaman M. E., Domingos R. C., Santos C. R. D., Souami D., 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439, 3168
- Carruba V., Aljbaae S., Domingos R. C., 2021, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 133, 24
- Carvano J. M., Hasselmann P. H., Lazzaro D., Mothé-Diniz T., 2010, *A&A*, 510, A43
- Chan T. F., Golub G. H., LeVeque R. J., 1979, Technical report, *Updating Formulae and a Pairwise Algorithm for Computing Sample Variances*. Stanford University, Stanford, CA, USA
- Chang C.-K., et al., 2019, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 241, 6
- Chen, P. W. and Wang, J. Y. and Lee H. 2004, in 2004 IEEE international joint conference on neural networks (IEEE Cat No04CH37541). pp 2035–2040
- Cortes C., Vapnik V., 1995, *Machine learning*, 20, 273
- Dark Energy Survey Collaboration et al., 2016, *MNRAS*, 460, 1270
- DeMeo F. E., Carry B., 2013, *Icarus*, 226, 723

- DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J., 2009, *Icarus*, 202, 160
- Diehl H. T., et al., 2023, Technical Report FERMILAB-TM-2720-AE, The Dark Energy Survey and Operations: Year 6 – The Finale, <https://www.osti.gov/biblio/1596042/>. Fermi National Accelerator Lab. (FNAL), Batavia, IL (United States), <https://www.osti.gov/biblio/1596042/>
- Flaugher B., 2005, *International Journal of Modern Physics A*, 20, 3121
- Flaugher B., et al., 2015, *The Astronomical Journal*, 150, 150
- Gerdes D. W., et al., 2017, *ApJ*, 839, L15
- Granvik M., Morbidelli A., Vokrouhlický D., Bottke W. F., Nesvorný D., Jedicke R., 2017, *A&A*, 598, A52
- Huaman M. E., Carruba V., Domingos R. C., 2014, *MNRAS*, 444, 2985
- Ivezić Ž., et al., 2001, *AJ*, 122, 2749
- Ivezić Ž., et al., 2002, *AJ*, 124, 2943
- Knežević Z., Milani A., 2003, *A&A*, 403, 1165
- Lazzaro D., Angeli C. A., Carvano J. M., Mothé-Diniz T., Duffard R., Florczak M., 2004, *Icarus*, 172, 179
- Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., Bauer J. M., Cutri R. M., Nugent C., Cabrera M. S., 2012, *ApJ*, 759, L8
- Milani A., Cellino A., Knežević Z., Novaković B., Spoto F., Paolich P., 2014, *Icarus*, 239, 46
- Morganson E., et al., 2018, *PASP*, 130, 074501
- Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D., 2022, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 134, 34
- Pan J., et al., 2022, *The Planetary Science Journal*, 3, 269
- Popescu M., Licandro J., Carvano J. M., Stoicescu R., de León J., Morate D., Boacă I. L., Cristescu C. P., 2018, *A&A*, 617, A12
- Pravec P., Harris A. W., Kušnirák P., Galád A., Hornoch K., 2012, *Icarus*, 221, 365
- Radović V., Novaković B., Carruba V., Marčeta D., 2017, *MNRAS*, 470, 576
- Roh D.-G., Moon H.-K., Shin M.-S., DeMeo F. E., 2022, *A&A*, 664, A51
- Ryan E. L., Woodward C. E., 2010, *AJ*, 140, 933
- Sabater J., Leon S., Verdes-Montenegro L., Sulentic J., Verley S., Boselli A., 2009, *A&A*, 494, 693
- Stephens R., Warner B. D., 2018, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, p. 417.03
- Stephens R. D., Warner B. D., Harris A. W., 2010, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, p. 39.14
- Szabó G. M., Ivezić Ž., Jurić M., Lupton R., Kiss L. L., 2004, *MNRAS*, 348, 987
- Usui F., et al., 2011, *PASJ*, 63, 1117
- Warner B. D., Stephens R. D., Harris A. W., 2011, *Minor Planet Bulletin*, 38, 172
- Willmer C. N. A., 2018, *ApJS*, 236, 47

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.

Year six astrometric and photometric measurements of known TNOs and Centaurs by DES

Felipe S. Ferreira^{1,2*}, J. I. B. Camargo^{1,2}, M. B. Huarca^{1,2}, R. C. Bouffleur^{1,2}, A. Pieres², V. F. Peixoto³, M. Assafin^{4,2}, R. Vieira-Martins^{1,2}, L.A.N. da Costa², A.R. Gomes-Júnior^{5,2}, F. Braga-Ribas^{4,1,2}

¹*Observatório Nacional, São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brazil*

²*Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA, Rio de Janeiro, Brazil*

³*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil*

⁴*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brazil*

⁵*Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brazil*

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ.

ABSTRACT

The Dark Energy Survey (DES) is an international, collaborative effort, aimed at investigating the nature of the mysterious dark energy. Among the many millions galaxies and stars recorded by the Dark Energy Camera, there are thousands of small Solar System bodies, Main Belt asteroids mainly. We searched the complete six-year DES catalogue (DES Y6) for known small Solar System Bodies and selected the Trans-Neptunian Objects (TNOs) and Centaurs. A taxonomical classification from the photometric measurements was first obtained to a set of 67 objects, later extended to 30 more. Most of these objects had no previous such classification. Correlations between orbital parameters and object color or dynamical class are also presented. The most significant correlation we found was between the colors of resonant objects, that spread over all taxonomical classes, and inclination. DES Y6 astrometric measurements were compared to independent accurate astrometry determined directly from the DES images. Positions from both cases have an average agreement down to the milliarcsecond and indicate the presence of offsets between ephemerides and observations. Overall, DES catalogues are by themselves a treasure trove to investigations about the Solar System.

Key words: Kuiper belt: general – minor planets, asteroids: general – surveys

1 INTRODUCTION

Small bodies are seen as fundamental pieces to understand the history and evolution of the Solar System. Transneptunian Objects (TNOs, located beyond the orbit of Neptune at ~ 30 AU from the Sun), in particular, are considered as collisional and dynamic remnants of an evolved planetesimal disk and relatively unaltered relics of the Solar System formation. These icy bodies can provide essential information about the evolution of the early solar nebula and hints about other planetary systems around young stars as well (Barucci et al. 2008).

Centaurs are objects characterized by highly chaotic orbit, with a dynamical lifetime from less than 1 to about 100 Myr (Tiscareno & Malhotra 2003) and their dynamical evolution mostly perturbed by the the Giant Planets. In fact, those authors claim that Centaurs have escaped from the transneptunian Kuiper Belt and constitute a transitional population between the Kuiper Belt and the Jupiter family comets. In this context, also according to Barucci et al. (2008), Centaurs can be considered as brighter proxies of the more distant TNO population.

Investigations of the surface properties of TNOs and Centaurs allow us to access rich information about the chemical processes of the outer proto-planetary disk formation as reported by Perna et al.

(2010), driving us to design theories about the birth and growth of our planetary system.

Because of their faint magnitudes, however, these objects are difficult to be observed. Spectroscopic observations, that could bring more detailed information of their surfaces, are successful only for a small number of them. As reported by Barucci & Peixinho (2005), even with the world's largest telescopes, most of the TNOs and Centaurs are too faint for spectroscopic observations. Only the brightest ones have been observed by spectroscopy. Multiband photometry, on the other hand provides access, even to faint objects, to all those pieces of information although less accurately.

The wide color diversity of TNOs can show some physical effects processing the surfaces of TNOs and/or some possible composition diversity. These icy bodies have been moved by the gravitational perturbations of the giant planets since their formation, thus their current locations have recorded years of interactions (Doressoundiram et al. 2008; Brown 2012). The current size distribution of these objects is an indicative of collision processes and orbital changes undergone during planetary migration. Larger objects appear to have a complex internal structure, such as a rocky core, a mantle and a surface crust with specific volatile materials, while smaller objects appear to be the result of the accretion of material (Husmann et al. 2006; Rambaux et al. 2017; Brown 2012).

Another characteristic that provides evidence that TNOs were

* E-mail: felipeferreira@on.br