



Observatório
Nacional

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DAS
OBSERVAÇÕES DO DARK ENERGY SURVEY E DE OCULTAÇÃO ESTELAR

FELIPHE DE SOUZA FERREIRA

RIO DE JANEIRO

2025

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Tese de Doutorado

ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DAS
OBSERVAÇÕES DO DARK ENERGY SURVEY E DE OCULTAÇÃO ESTELAR

por

Felipe de Souza Ferreira

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Doutor em Astronomia.

Orientador: Dr. Julio Camargo

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Julho de 2025

d837

de Souza Ferreira, Felipe

Estudo de pequenos corpos do Sistema Solar a partir das observações do Dark Energy Survey e de ocultação estelar [Rio de Janeiro] 2025.

xxii, 149 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Tese (doutorado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2025.

1. Pequenos Corpos. 2. Levantamentos Astronômicos. 3. Ocultações Estelares. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DAS
OBSERVAÇÕES DO DARK ENERGY SURVEY E DE OCULTAÇÃO ESTELAR”

FELIPHE DE SOUZA FERREIRA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Julio Camargo – Observatório Nacional
(Orientador)

Dr. Nome Sobrenome – Instituição

Profa. Nome Sobrenome – Instituição

Dra. Nome Sobrenome – Instituição

Prof. Nome Sobrenome – Instituição

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

10 DE JULHO DE 2025

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu pai
Sebastião Ferreira que, em vida,
sempre me apoiou e por mim
torceu. Agradeço a ele pelos
ensinamentos e valores passados.
Saudades eternas!*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram de realização deste trabalho, em especial:

À minha mãe, Ana Cristina, à minha irmã, Fernanda e ao Matheus por todo suporte que me deram durante o doutoramento. Se não fosse o apoio de vocês não sei se seria capaz vencer os desafios que tive durante esse período.

Ao meu orientador, Dr. Júlio Camargo, pela paciência, dedicação de seu tempo e toda ajuda fornecida para o desenvolvimento do trabalho ao longo do doutorado.

Aos colegas da Casa Branca, pelas incontáveis ajudas e experiências compartilhadas no dia a dia.

Ao grupo do Rio, Dr. Rodrigo Bouffleur e Dr. Bruno Morgado, por todo suporte e auxílio dado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao LIneA, pelo suporte de informática.

À colaboração DES, por toda a disponibilização de dados.

À Capes, pelo apoio financeiro durante o doutorado.

Ao Observatório Nacional, pela oportunidade de cursar a pós graduação e pelo crescimento profissional e pessoal.

Felipe de Souza Ferreira

ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DAS
OBSERVAÇÕES DO DARK ENERGY SURVEY E DE OCULTAÇÃO ESTELAR

RESUMO

Pequenos corpos são considerados remanescentes colisionais e dinâmicos da formação do Sistema Solar, carregando informações essenciais sobre as condições iniciais do disco protoplanetário. Assim, o estudo de suas diferentes populações trazem pistas sobre suas regiões de formação, permitindo compreender melhor os processos evolutivos que tenham ocorrido. Neste contexto, apresentamos nesta tese resultados do estudo de diferentes populações de pequenos corpos a partir de dados observacionais do Dark Energy Survey (DES) e da técnica de Ocultações Estelares. Mesmo que não tenha sido projetado para a astronomia do Sistema Solar, o DES possibilitou a observação de mais de 399.000 objetos que incluem desde asteroides próximos à Terra até aqueles situados na região além da órbita de Netuno em 5 filtros ópticos. A partir de suas cores, podemos obter informações taxonômicas para asteroides, Centauros e Objetos transnetunianos de forma a inferir sobre propriedades físicas de suas superfícies e compará-las com resultados da literatura. Para os dois últimos grupos, buscamos possíveis correlações entre suas cores e seus parâmetros orbitais.

Utilizando a técnica de ocultações estelares, estimamos o tamanho e forma 2D do troiano de Júpiter (2207) Antenor, não observado pelo DES. Além disso, a partir de uma detecção positiva de 2021, observou-se uma característica intrigante desse pequeno corpo que pode ser interpretada como um grande acidente topográfico ou como um possível objeto binário.

Apresentamos também resultados astrométricos dos Centauros e TNOs estudados bem como de (2207) Antenor.

STUDY OF SMALL BODIES IN THE SOLAR SYSTEM FROM OBSERVATIONS OF
THE DARK ENERGY SURVEY AND FROM A STELLAR OCCULTATION

ABSTRACT

Small bodies are considered collisional and dynamical remnants from the formation of the Solar System, carrying essential information about the initial conditions of the protoplanetary disk. Thus, the study of their different populations provides clues about their formation regions, allowing for a better understanding of the evolutionary processes that may have occurred. In this context, this thesis presents results from the study of different small-body populations using observational data from the Dark Energy Survey (DES) and the stellar occultation technique.

Although not originally designed for Solar System astronomy, DES enabled the observation of over 399,000 objects, ranging from near-Earth asteroids to those located beyond Neptune's orbit, using five optical filters. From their colors, we can obtain taxonomic information for asteroids, Centaurs, and trans-Neptunian objects to infer their surface physical properties and compare them with results from the literature. For the latter two groups, we seek possible correlations between their colors and orbital parameters.

Using the stellar occultation technique, we estimated the size and 2D shape of the Jupiter Trojan (2207) Antenor, which was not observed by DES. Additionally, based on a positive detection in 2021, an intriguing feature of this small body was observed, which could be interpreted as either a large topographic anomaly or a possible binary object.

We also present astrometric results for the studied Centaurs and TNOs, as well as for (2207) Antenor.

Lista de Figuras

1.1	Configuração do Sistema Solar	2
1.2	Modelo de migração Planetária	5
2.1	Descoberta de NEAs ao longo dos anos	11
2.2	Subgrupos de NEAs	11
2.3	Distribuição dos Asteroides do Cinturão Principal por densidade	13
2.4	Localização de algumas famílias de asteroides no Cinturão Principal	13
2.5	Espectros da taxonomia de Bus and Binzel (2002)	15
2.6	Espectros da taxonomia de DeMeo et al. (2009)	16
2.7	Distribuição de massa por taxonomia segundo DeMeo and Carry (2013)	16
2.8	A distribuição de massa fracionária por taxonomia segundo DeMeo and Carry (2013)	17
2.9	Fluxograma para a nomenclatura de pequenos corpos do sistema solar exterior	20
2.10	Distribuição de TNOs por elementos orbitais	21
2.11	Espectro de Reflectância médio para a taxonomia de Barucci et al. (2005)	25
2.12	Diagrama cor-cor para os alvos do Col-OSSOS	26
2.13	Projeção dos dois tipos de superfície de TNOs proposto por Fraser et al. (2023)	27
2.14	Agrupamento segundo a técnica PCA e k-means apresentado por Pinilla-Alonso et al. (2025).	28
2.15	Representação espectral das classes de TNOs apresentadas por Pinilla-Alonso et al. (2025).	29
3.1	Observatório Interamericano de Cerro Tololo	32
3.2	Disposição de DECam	33
3.3	Esquematização da DECam	34
3.4	Orientação no céu do mosaico de CCDs da DECam.	35
3.5	Banda passante do padrão DR1 do DES.	36
3.6	Janela Inicial da ferramenta <i>easyaccess</i>	37
3.7	Interface Web do serviço SkyBoT	40
4.1	Número de clusters pelo <i>PAM</i>	47

4.2	Clusters obtidos com <i>PAM</i>	49
4.3	Espectro de Reflectância médio para cada classe taxonômica	50
4.4	Diagrama cor-cor e curva de avermelhamento para cada classe taxonômica	51
4.5	Diagrama cor-cor com a distribuição das classes taxonômicas	52
4.6	Espectros de troianos apresentados por Markwardt et al. (2025)	53
4.7	Cor \times inclinações de fase para TNOs e Centauros	54
4.8	Distribuição das classes taxonômicas por classe dinâmica	56
4.9	Excentricidade em função do semieixo maior para os 144 TNOs e Centauros classificados	56
4.10	Cor \times excentricidade de TNOs e Centauros	57
4.11	Cor \times Inclinação de TNOs e Centauros	58
4.12	Distribuição cumulativa: excentricidade.	61
4.13	Distribuição cumulativa: inclinação.	62
4.14	Cor \times Inclinação de Objetos Ressonantes	63
4.15	Comparação dos diâmetros para objetos encontrado na literatura	64
4.16	Cor \times diâmetro para as classes <i>BB</i> (azul) e <i>RR</i>	65
4.17	Histograma das cores $H_g - H_r$, $H_g - H_i$ and $H_g - H_z$	67
5.1	Asteroides com dados disponíveis no DES com inclinações de fase <i>gri</i> e cores $i - z$	79
5.2	Cores $i - z$ por inclinações de fase <i>gri</i> para asteroides no DES com dados taxonômicos	79
5.3	Cores $i - z$ por inclinações de fase <i>gri</i> para asteroides presentes nos dados do DES e SDDS-MOC4	80
5.4	Cores $i - z$ por inclinações de fase <i>gri</i> para asteroides presentes nos dados do DES e SDDS-MOC4 para um esquema taxonômico simplificado com as classes C, S e V. As caixas coloridas representam os limites das taxonomias.	81
5.5	Distribuição de $a \times e$ e $a \times \sin(i)$ dos tipos C, tipo S e tipo V	82
5.6	Cor $(i - z) \times$ inclinação de fase (<i>gri</i>) para asteroides com dados de albedo e presentes nos dados do DES.	83
5.7	Cores $i - z \times$ inclinações de fase <i>gri</i> previstos pelo ML para asteroides no banco de dados DES sem dados do SDSS-MOC4.	84
5.8	Histograma 2D $(g - r, g - i)$ para asteroides com dados no DES	85
5.9	Projeção das cores para asteroides nos dados do DES e taxonomia no SDSS-MOC4	85
5.10	Projeção dos asteroides do DES com valores de albedo	86
5.11	Cores $g - r$ e $g - i$ dos dados previstos pelo ML para asteroides no banco de dados DES.	87

5.12	Projeção no plano de elementos próprios ($a, \sin(i)$) dos asteroides candidatos a tipo V com os dados do DES	88
6.1	Representação esquemática de uma ocultação estelar	90
6.2	Curvas de luz normalidas para a ocultação de 10 de Julho de 2021	97
6.3	Curvas de luz normalidas para a ocultação de 26 de agosto de 2021	98
6.4	Cordas projetadas no plano do céu para Antenor e suas respectivas incertezas	99
6.5	Ocultação de 12 de junho de 2021	101
6.6	Ajute da dupla-corda para ocultação de 12 de junho e elipses com suas respectivas regiões de 1σ	102
6.7	Magnitude aparente reduzida à unidade de distância em função do ângulo de fase solar	104
7.1	Precisão astrométrica por imagem single-epoch do DES	108
7.2	Posições Astométricas de TNOs e Centauros	110
7.3	Diferença entre as efemérides do JPL e Solução do NIMA em RA (painel esquerdo) e DEC (painel direito) considerando todos os dados disponíveis no MPC e posições astrométricas obtidas pelo OPD e OHP (pontos ciano), mais dados do GaiaFPR (pontos azuis). A região cinza delimita a incerteza de $1-\sigma$	112
7.4	Diferença entre efemérides do JPL e solução do NIMA com os dados presentes na figura 7.3 mais a posição astrométrica preferida apresentada na tabela 7.2 (pontos amarelos). Note que a região cinza que delimita a incerteza de $1-\sigma$ é menor do que a apresentada na figura 7.3 por um fator de ~ 2	112

Lista de Tabelas

3.1	Cracterísticas dos filtros da DECam.	34
3.2	Número de objetos do Sistema Solar identificados pelo SkyBoT que podem estar nas imagens do DES	40
4.1	Largura meia altura (FWHM) de Centauros em diferentes tempos de exposição	42
4.2	Largura meia altura (FWHM) de TNOs em diferentes tempos de exposição	43
4.3	Comprimento de onda central e magnitude solar adotado para os filtros do DES	48
4.4	Cores médias e desvio padrão para cada classe taxonômica.	50
4.5	Reflectâncias médias e desvios padrão em cada classe e cada filtro	52
4.6	Valores médios das inclinações de fase, desvios padrão das médias e desvios padrão das medidas (em parêntesis) para cada classe taxonômica e considerando apenas os objetos definidores de classe.	55
4.7	Média dos valores das inclinações de fase, desvios padrão das médias e desvios padrão das medidas (entre parêntesis) para cada classe taxonômica considerando todos os objetos.	55
4.8	Coluna 1. Seleção de objetos seguindo, da primeira à terceira linha, a mesma seleção apresenta na Fig. 4.10, da esquerda para a direita; coluna 2: $\text{MAX} (Fn_1(x) - Fn_2(x)) > 0$, onde Fn_1 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo azul (BB, BBBR) e Fn_2 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo vermelho (RR, IRRR); coluna 3: $\text{MAX} (Fn_2(x) - Fn_1(x)) > 0$, onde Fn_1 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo azul (BB, BB+BR) e Fn_2 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo vermelho (RR, IR+RR); coluna 4: medida de significância para rejeição da hipótese nula (i.e., ambas as amostras são provenientes da mesma distribuição) no teste K-S para duas amostras; coluna 5: medida de significância para rejeição da hipótese nula (i.e., ambas as amostras são provenientes da mesma distribuição) no teste A-D para duas amostras.	59
4.9	Veja Tabela 4.8.	60

4.10	Valores de albedos médios para diferentes classes dinâmicas presente em Müller et al. (2020)	63
4.11	TNOs com classificação segundo Fraser et al. (2023)	68
4.12	Objetos classificados segundo o esquema taxonômico de Pinilla-Alonso et al. (2025)	69
4.13	TNOs e Centauros a partir da fotometria do DES classificados segundo esquema taxonômico de Barucci et al. (2005)	73
5.1	Cores ($g - r$) do DES para asteroides do cinturão interno	77
5.2	Percentual de classificações taxonômicas consistentes, ou pureza, para asteroides nos dados do DESS e SDSS-MOC4, DES e Carvano et al. (2010) e DES e MOVIS database	81
5.3	Percentual de classificações consistentes (pureza) para asteroides nos dados o DES e SDSS-MOC4.	82
5.4	Percentual de asteroides do tipo C e S com albedo geométrico, $p_v < 0.12$ e $p_V > 0.12$, respectivamente.	82
6.1	Parâmetros da estrela ocultada para cada evento observado como obtido a partir do Gaia DR3.	94
6.2	Circunstâncias Observacionais para as ocultações por (2207) Antenor	95
6.3	Tempos obtidos ajustados para cada curva de luz com detecção positiva.	96
6.4	Parâmetros físicos para a elipse ajustada	99
6.5	Magnitudes aparentes de Antenor obtidas através do ZTF em datas próximas as observações das ocultações.	103
7.1	Resultados astrométricos das imagens do DES para TNOs e Centauros conhecidos.	111
7.2	Posição Astrométrica de (2207) Antenor	111

Sumário

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
2 Pequenos Corpos do Sistema Solar	7
2.1 Propriedades Físicas de Pequenos Corpos	8
2.2 Sistema Solar Interior	10
2.2.1 Objetos em Órbita Próxima da Terra (NEOs)	10
2.2.2 Cinturão Interno de Asteróides	11
2.2.3 Taxonomia de Asteroides	12
2.3 Sistema Solar Exterior	17
2.3.1 Troianos de Júpiter	17
2.3.2 Centauros	18
2.3.3 Objetos Transnetunianos (TNOs)	19
2.3.4 Taxonomia de TNOs e Centauros	23
2.3.5 Cometas	28
3 Obtenção de Dados do Dark Energy Survey	31
3.1 Dark Energy Survey	31
3.1.1 Dark Energy Camera (DECam)	31
3.1.2 Filtros	33
3.1.3 Processamento de Dados	33
3.1.4 Objetos do Sistema Solar através das Observações do DES.	36
3.1.5 Obtenção de Dados	37
3.1.6 Sky Body Tracker (SkyBoT)	38
4 Fotometria de TNOs e Centauros	41
4.1 Fotometria do DES para TNOs e Centauros	41
4.1.1 Taxonomia de TNOs e Centauros	45

4.1.2	Partition Around Medoids (<i>PAM</i>) como ferramenta para classificação taxonômica	46
4.1.3	Cores dos Objetos	48
4.1.4	Inclinações de fase	50
4.1.5	Cores e Parâmetros Orbitais	53
4.1.6	Testes estatísticos	59
4.1.7	Cores e Diâmetro	60
4.1.8	Algumas considerações a respeito do número de classes taxonômicas	65
5	Fotometria de Asteroides	75
5.0.1	Dados com inclinações de fase <i>gri</i> e cores <i>i - z</i>	78
5.0.2	Dados do DES: <i>g - r, g - i</i>	83
5.0.3	Asteroides do tipo V	87
6	Ocultações Estelares por (2207) Antenor	89
6.1	Ocultações Estelares	89
6.1.1	Seleção dos Objetos e Predições	90
6.1.2	Fotometria e Obtenção das Curvas de Luz	91
6.1.3	Reconstrução Geométrica	95
6.1.4	Ocultações Estelares em 10 de julho de 2021 e 26 de agosto de 2021	96
6.1.5	Ocultação Estelar de 12 de junho	99
6.1.6	Cálculo do Albedo de (2207) Antenor	102
7	Exploração de Dados Astrométricos	107
7.1	Astrometria de TNOs e Centauros	107
7.1.1	Astrometria do DES	107
7.1.2	PRAIA Astrometry	108
7.1.3	Resultados astrométricos	109
7.2	Astrometria de (2207) Antenor	110
8	Conclusões	113
	Referências Bibliográficas	117
A	Artigos Publicados	149

Capítulo 1

Introdução

Remanescentes da formação do Sistema Solar, os pequenos corpos carregam informações sobre as condições iniciais do disco protoplanetário (temperatura, composição, por exemplo) a diferentes distâncias heliocêntricas, oferecendo material essencial ao estudo de sua história e evolução. Em geral, eles são formados por materiais rochosos, metais e/ou gelo e possuem tamanhos que podem variar de poucos metros até centenas de quilômetros (Carry et al., 2021; de León et al., 2018; Lazzaro, 2024; Nuth et al., 2020). Devido às suas pequenas massas, eles sofreram pouca diferenciação após suas formações, diferente do que ocorreu aos planetas e grandes satélites, que carregam traços evidentes de evolução térmica, química e tectônica.

Asteroides, localizados entre a órbita de Marte e Júpiter, são corpos primitivos que contêm registros da composição original da nebulosa solar na qual os planetas se formaram. Michel et al. (2015b) apontam que eles são planetesimais remanescentes que estão intimamente relacionados aos corpos precursores que formaram tanto os planetas terrestres quanto os núcleos dos planetas gigantes. Além disso, a matéria orgânica e as propriedades da água em forma de gelo que alguns contêm nos fornecem pistas sobre como a vida começou na Terra. Objetos mais distantes, tais como Centauros e Objetos Transnetunianos (TNOs), são reconhecidos como os representantes mais primitivos e termicamente menos processados no Sistema Solar. De fato, devido às suas distâncias do Sol, melhor preservaram suas características iniciais (TNOs, em particular). Presume-se que sejam remanescentes da população de planetesimais da região mais externa do Sistema Solar (Barucci et al., 2005). Ainda, Morbidelli and Nesvorný (2020) destaca que a borda externa do cinturão clássico de Kuiper (~ 50 UA), juntamente com a massa da população fria (objetos dinamicamente não excitados), sugere que TNOs constituem fósseis da formação planetesimal na distância máxima onde tal processo de formação atuou. Ressalta-se também, conforme destacado por Peixinho et al. (2020) que Centauros são objetos intrigantes e surpreendentes, constituindo-se numa classe tão rica quanto à dos TNOs isoladamente. A figura 1.1 apresenta a configuração do sistema solar destacando as posições heliocêntrica do cinturão de asteroides e de Kuiper.

O primeiro asteroide descoberto foi 1 Ceres (hoje classificado como planeta-anão) em 1801 pelo astrônomo italiano Guiseppe Piazzi que o considerou inicialmente como um novo planeta entre Marte e Júpiter (Cunningham et al., 2009). Anos seguintes, Pallas, Juno e Vesta também foram descobertos nessa região, e mais tarde novos objetos também foram observados. Assim, com o crescente número de objetos nessa área, essa região passou a ser referida como cinturão principal de Asteroides¹. Até a data da escrita dessa tese, o Minor Planet Center (MPC) têm registrado mais de 1.300.000 asteroides do Cinturão Principal².

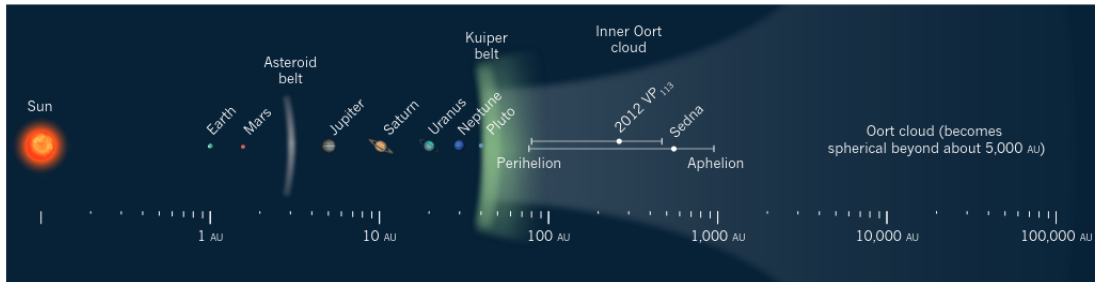


Figura 1.1: Configuração do Sistema Solar destacando as posições heliocêntricas do cinturão principal de asteroides e cinturão de Kuiper (Schwamb, 2014).

Por outro lado, o estudo de objetos mais distantes, região além de Netuno, veio em foco pela primeira vez em 1930 com a descoberta de Plutão, designado inicialmente como o nono planeta (Tombaugh, 1946). Cerca de 2 décadas mais tarde, Gerard Kuiper postulou a existência de um cinturão de objetos menores que se estendiam além da órbita de Netuno até aproximadamente 50 UA, que mais tarde fora nomeado em sua homenagem (Prialnik et al., 2019). Vale destacar que a hipótese de uma nebulosa primordial fora apresentada já por Kant e Laplace entre os séculos XVIII e XIX (Edgeworth, 1949). Destaca-se também o trabalho de Fernandez (1980), no qual um cinturão cometário, localizado entre 35-50 UA, é apresentado para dar conta dos cometas de curto período observados e predizendo o cinturão de Kuiper como um reservatório de objetos gelados (como se conhece modernamente). Assim, o cinturão de Kuiper, ou às vezes referido como o cinturão Edgeworth-Kuiper, passou a ser reconhecido como uma região povoada por um grande número de pequenos corpos. Caronte, lua de Plutão descoberta em 1978, foi o segundo objeto além de Netuno identificado (Bodifée, 1979). Só no início da década de 1990, o primeiro pequeno corpo no cinturão de Kuiper, designado por 1992 QB1, foi descoberto por David Jewitt e Jane Luu (Jewitt and Luu, 1993). Desde então o número de objetos do cinturão de Kuiper (KBOs) tem crescido exponencialmente e hoje estão distribuídos em diferentes classes dinâmicas (veja Gladman et al., 2008). Ressaltamos que neste trabalho

¹Ceres Exploration: <https://science.nasa.gov/dwarf-planets/ceres/exploration/>.

²Informação extraída de: <https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>. Última verificação em 08 de outubro de 2024.

todos os objetos além da órbita de Netuno serão referidos como TNOs, pertencentes ao cinturão de Kuiper ou além.

Muito além da órbita de Netuno, J. H. Oort propôs em 1950 a existência de uma nuvem esférica que circunda o sistema solar com um limite externo localizado além de 5.000 a 200.000 UA (Oort, 1950). Acredita-se que a nuvem de Oort surgiu muito cedo na história do Sistema Solar, há cerca de $4,6 \times 10^9$ anos, e que é feita de restos remanescentes do disco protoplanetário primordial. Essa vasta região é considerada a principal fonte de cometas de longo período de natureza heterogênea, possuindo diferentes propriedades físicas.

Assim, investigar e compreender a natureza física, distribuição, formação e evolução de pequenos corpos torna-se fundamental para o entendimento de formação do Sistema Solar. Além disso, pode nos trazer informações acerca de como os sistemas planetários são formados ao redor de outras estrelas.

No contexto da formação do Sistema Solar, segundo o modelo migração planetária (Gomes et al., 2005; Morbidelli et al., 2005; Tsiganis et al., 2005), também conhecido como modelo de Nice (veja ilustração dada pela figura 1.2), pressupõe-se que após a formação dos planetas gigantes e da dissipação da nebulosa circunsolar, o Sistema Solar era composto pelo Sol, os planetas e um disco de detritos de planetesimais. Os planetas gigantes se encontravam em órbitas quase circulares e coplanares entre aproximadamente 5,5 e 17 UA. Devido a interações gravitacionais entre eles e os planetesimais que os rodeavam, e pela conservação do momento angular, esses gigantes começaram a migrar para suas posições atuais (Morbidelli and Levison, 2003). Simulações numéricas mostram que Júpiter moveu-se levemente para regiões mais internas do Sistema Solar, alcançando 5,2 UA, enquanto Saturno, Urano e Netuno fizeram o caminho contrário (Tsiganis et al., 2005). Conforme os planetas migraram, eles interagem gravitacionalmente com os planetesimais além de suas órbitas. Sendo assim, a distribuição orbital dos TNOs é consequência provável dessa migração planetária e também sugere que Netuno provavelmente começou a migrar com distância heliocêntrica inferior a 20 UA enquanto o disco estendia-se até 30-35 UA. Durante a migração, as excentricidades e inclinações mútuas dos planetas foram amortecidas por conta de sua interação gravitacional com os planetesimais no processo de fricção dinâmica. O disco planetesimal além das órbitas dos planetas foi desestabilizado, causando uma entrega maciça e repentina de planetesimais para o Sistema Solar interno, tendo como consequência um intenso bombardeio de planetesimais sobre os planetas terrestres. O Cinturão de Asteroides também foi fortemente perturbado, contribuindo com uma fração importante dos objetos que colidiram contra os planetas (Gomes et al., 2005). Como consequência da migração planetária, o cinturão principal de asteroides foi moldado e modificado por perturbações gravitacionais pela migração de Júpiter e Saturno, justificando a diversidade de objetos observados nessa região (Walsh et al., 2011).

Grandes levantamentos astronômicos, com a coleta extensa e abrangente de dados, têm desempenhado um papel essencial para o estudo de pequenos corpos, contribuindo

para a compreensão de suas origens, evolução, composição, distribuição e características orbitais. Além disso, eles são essenciais para a detecção de novos objetos, aumentando significativamente o conjunto de propriedades físicas conhecidas e, por consequência, possibilitando uma melhor compreensão sobre a distribuição atual de pequenos corpos no Sistema Solar e sua evolução dinâmica. Com o levantamento de grandes amostras, pode-se estudar padrões de suas propriedades físicas como tamanhos, formas e composição, permitindo identificar diferentes populações e traçar histórias evolutivas. Eles podem também possibilitar o acompanhamento de suas órbitas levando a um melhor refinamento das mesmas e podem contribuir para identificação de objetos de interesses para futuras missões espaciais.

Neste contexto, podemos citar instrumentos como o Pan-STARRS (The Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, [Chambers and Pan-STARRS Team, 2017](#)), que realiza varreduras repetidas e detalhadas do céu revelando milhares de pequenos corpos, e a NEOWISE ([Grav et al., 2012](#)) que utiliza um telescópio infravermelho proporcionando informações relevantes sobre propriedades térmicas e tamanhos de pequenos corpos. Por outro lado, o SDSS (Sloan Digital Sky Survey), através do Moving Object Catalog ([Ivezic et al., 2001](#)), fornece dados fotométricos para objetos não fixos na esfera celeste. Sua quarta versão, SDSSMOC4³ inclui 471.569 objetos móveis de 519 execuções de observações obtidas até março de 2007.

Ainda neste cenário, o Dark Energy Survey (DES, [Dark Energy Survey Collaboration et al., 2005, 2016](#)) varreu 5.000 graus quadrados do hemisfério sul celeste entre de 2013 a 2019. O DES é um levantamento que visa investigar a natureza da energia escura responsável pela expansão acelerada do universo. No entanto, como um grande levantamento, ele possibilitou a observação de inúmeros objetos do Sistema Solar, fornecendo dados fotométricos em cinco bandas ópticas (*grizY*). Assim, este levantamento tem contribuído significativamente para análises fotométricas e astrométricas de pequenos corpos com distâncias heliocêntricas que vão desde o interior do Sistema Solar até sua periferia. Dentre suas contribuições, destacamos a descoberta do grande objeto do disco disperso (SDO) - 2014 UZ224 ([Gerdes et al., 2017](#)); do cometa proveniente da hipotética nuvem de Oort (C/2014 UN271 - [Bernardinelli et al., 2021](#)); e dos quatro troianos de Netuno no ponto L4 no qual um deles (2013 VX30) apresentou avermelhamento similar aos TNOs mais avermelhados, sugerindo um "elo-perdido" entre os troianos e a populações de TNOs ([Gerdes et al., 2016](#); [Lin et al., 2019](#)); um dos maiores catálogos de TNOs ([Bernardinelli et al., 2022](#)) e também o maior catálogo de cores e curvas de luz de TNOs ([Bernardinelli et al., 2023](#)).

No que diz respeito a determinação de forma e tamanho de pequenos corpos, uma das técnicas observacionais que oferece maior precisão é a de ocultações estelares. Este

³<http://faculty.washington.edu/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>. Veja também [Carry et al. \(2016\)](#) e [Sergeyev and Carry \(2021\)](#)

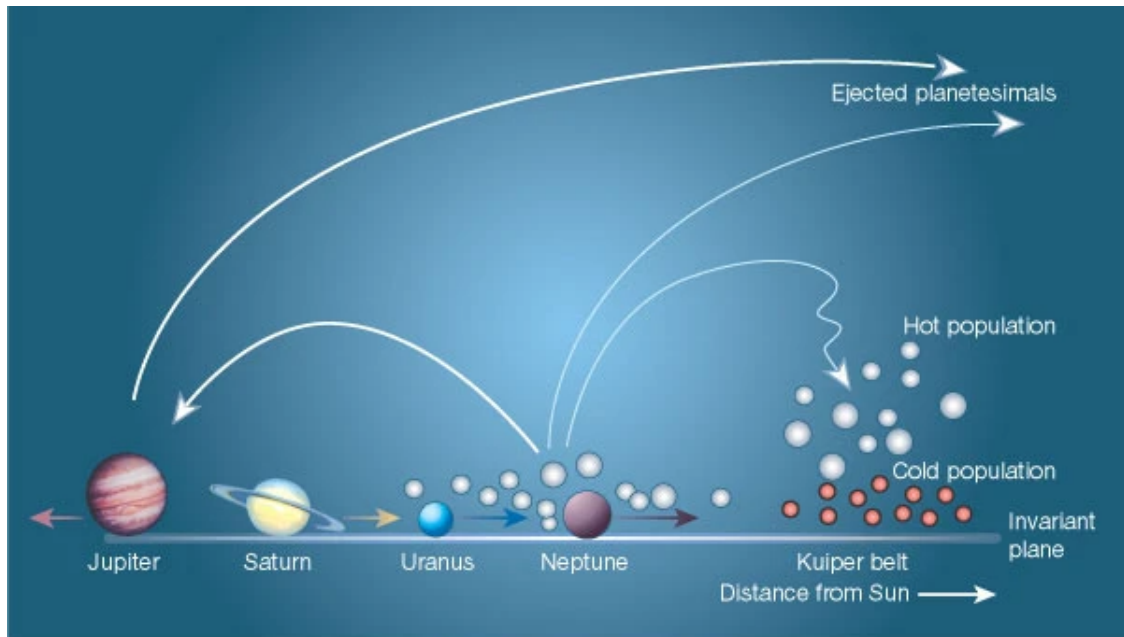


Figura 1.2: Esquemática do modelo de migração planetária (Modelo de Nice). Efeitos gravitacionais no Sistema Solar em desenvolvimento jogaram alguns corpos primordiais para fora; outros foram desviados em direção a Júpiter e Saturno antes de também serem ejetados. A migração de Netuno para longe do Sol (equilibrando o movimento interno dos planetesimais em direção a Júpiter e Saturno) prendeu alguns objetos que de outra forma teriam sido perdidos (Morbidelli and Levison, 2003).

fenômeno ocorre quando o brilho de uma estrela é bloqueado parcial ou totalmente pela passagem de um objeto do Sistema Solar pela linha de visada observador-estrela, no caso, um pequeno corpo (Elliot, 1979). Durante o evento, a sombra do corpo é projetada na Terra e a variação do fluxo da estrela pode ser observada no local onde a sombra é projetada. Essa técnica pode fornecer o tamanho e a forma do pequeno corpo com boa precisão e também revelar características físicas do corpo ocultante. Assim, ela tem permitido a determinação de características topográficas de TNOs (Dias-Oliveira et al., 2017); revelando limites para a presença de atmosfera em TNOs, como no caso do planeta anão Eris (Sicardy et al., 2011); e permitiu a detecção de sistema de anéis como observado para o centauro (10199) Chariklo (Braga-Ribas et al., 2014) e para o TNO candidato a planeta anão, (50000) Quaoar (Morgado et al., 2023; Pereira et al., 2023).

Neste contexto, este trabalho traz resultados para o estudo de pequenos corpos do Sistema Solar através da exploração do acervo fotométrico e astrométrico do DES e também utilizando a técnica de ocultações estelares. Apresentamos resultados para o estudo taxonômico de TNOs, Centauros e asteroides do cinturão principal e também informações astrométricas de TNOs a partir dos dados do DES; e utilizamos a técnica de ocultações estelares para o estudo de características físicas do troiano de Júpiter (2207) Antenor.

Na organização desta tese, apresentamos no capítulo 2 um panorama sobre o estudo de

pequenos corpos do Sistema Solar, dando um maior destaque para os quatro grupos abordados neste trabalho (TNOs, Centauros, Troianos de Júpiter e asteroides). No capítulo 3 é apresentado a metodologia utilizada neste trabalho para exploração dos dados do DES para o estudo de pequenos corpos. Os resultados fotométricos para o estudo de TNOs e Centauros a partir dos dados do DES são apresentados no capítulo 4, e no capítulo 5 apresentamos resultados fotométricos para asteroides do cinturão principal. No capítulo 6 são apresentados os resultados para o tamanho e forma do troiano de Júpiter Antenor a partir da técnica de ocultações estelares. Resultados astrométricos são apresentados no capítulo 7 e, por fim, apresentamos no capítulo 8 as considerações finais e perspectivas futuras deste trabalho.

Capítulo 2

Pequenos Corpos do Sistema Solar

Conforme estabelecido pela União Astronômica Internacional (IAU)¹, os objetos do Sistema Solar podem ser classificados em três grupos distintos, no qual pequenos corpos é o grupo de objetos, excetuando-se satélites, que não é caracterizado como planeta ou planeta anão. Estes são corpos que podem variar de tamanhos desde poucos metros até várias centenas de quilômetros formados por gelo, rocha ou metais com distâncias heliocêntricas que vão desde o interior do Sistema Solar, como os asteroides (localizados majoritariamente entre as órbitas de Marte e Júpiter), até regiões mais distantes, como os troianos dos planetas gigantes, Objetos Transnetunianos (TNOs) e cometas. Devido à condição de baixa auto-gravidade, os pequenos corpos apresentam uma grande variedade de formas, superfície e estrutura interna. Assim, os estudos das diferentes populações podem nos fornecer informações a respeito da origem e evolução do Sistema Solar e, em última análise, como a água e vida estão presentes na Terra (Vernazza and Beck, 2017). Atualmente, o Minor Planet Center (MPC)² tem o registro de aproximadamente 1,4 milhões de pequenos corpos e, mesmo que eles representem uma fração muito pequena da massa total dos planetas terrestres, seu grande número, diversidade de composição e as distribuições orbitais fornecem fortes vínculos para os modelos de formação planetária (Bottke et al., 2002). Abordaremos neste capítulo diferentes grupos de pequenos corpos, bem como suas distribuições em distâncias heliocêntricas desde o interior do Sistema Solar até regiões mais externas, como forma de contextualização. No entanto, serão abordados nos resultados desta tese, nos capítulos seguintes, apenas os pequenos corpos pertencente aos grupos dos Asteroides do Cinturão Principal, troianos de Júpiter, Centauros e Objetos Transnetunianos (TNOs).

¹Resolução B5/B6 de 2006 que estabelece a definição de planeta no Sistema Solar: https://iauarchive.eso.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf.

²<https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>

2.1 Propriedades Físicas de Pequenos Corpos

A compreensão das características físicas de pequenos corpos, tais como composição química, albedo, distribuição de massa e tamanhos, formas, densidade e período rotacional, pode nos fornecer informações sobre como eles evoluíram e se agruparam. A diversidade desses objetos em termos de composição excedem enormemente a variabilidade observada nos principais planetas e satélites. Dada sua ampla gama de tamanhos e composições de superfície, acredita-se que muitos se formaram em lugares diferentes e em momentos diferentes dentro da nebulosa solar (Michel et al., 2015a).

A observação da variação do brilho de um pequeno corpo possibilita a obtenção da curva de luz que, coletadas ao longo de um intervalo de tempo suficiente, permite a determinação do período rotacional e possivelmente a orientação do polo, e também uma estimativa aproximada da forma do objeto (Michel, 2014). Os períodos de rotação de asteroides cobrem uma ampla faixa que podem ser de vários dias ou de poucos minutos. Diversos trabalhos (Harris and Burns, 1979; Pravec and Harris, 2000; Pravec et al., 2002) têm demonstrado que o período de rotação de grandes objetos ($D > 30 - 40$ km) seguem a distribuição de Maxwell-Boltzmann (Maxwellian Distribution) enquanto objetos de tamanhos médios ($10 < D \leq 40$ km) e pequenos ($D < 10$ km) não seguem a mesma distribuição. Tal análise sugere que objetos maiores são primordiais, ou originais de colisões de corpos primordiais. Já objetos pequenos exibem excessos significativos de rotações lentas e rápidas, mostrando que eles são fragmentos derivados de colisões (Betzler and Borges, 2012). Suas rotações são conseqüências de eventos de fragmentação e por efeitos não gravitacionais, enquanto os corpos maiores preservaram a assinatura estatística do equilíbrio colisional original, ou seja, eles não foram destruídos nem reformados em colisões posteriores.

O albedo geométrico é a propriedade física de um pequeno corpo medida pela razão entre a luz por ele refletida pela luz que nele incide. Seu conhecimento é valioso para obtenção de informações sobre a composição de superfície, propriedades térmicas do objeto e diâmetro. A determinação do diâmetro de pequenos corpos a partir do conhecimento do albedo pode ser feita utilizando a equação demonstrada por Harris and Harris (1997); Russell (1916)³

$$D = \frac{2 \text{ AU} \times 10^{0.2(m_{\odot} - H)}}{\sqrt{p}}, \quad (2.1)$$

onde D é o diâmetro equivalente⁴ do corpo em km, m_{\odot} é a magnitude aparente do Sol numa determinada banda, H é a magnitude absoluta do objeto nessa mesma banda, ρ é o albedo geométrico também na mesma banda e AU é a unidade astronômica dada,

³Veja também <https://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2016/08/Jackpot.pdf>

⁴Diâmetro equivalente é o diâmetro de uma esfera com a mesma área do objeto.

por exemplo, em unidades de km (149.597.870,7 km). Se for considerada a banda V e a magnitude aparente do Sol também nesta banda ($m_{\odot} = -26.77$), podemos chegar na relação descrita pela equação 2.2 (D em km).

$$D = \frac{1324.206 \times 10^{-0.2H_V}}{\sqrt{\rho_V}}. \quad (2.2)$$

Uma hipótese simples sobre a Eq. 2.2 nos dá informações muito relevantes. A suposição é que H_V pode ser precisa para que sua incerteza, σ_{H_V} , possa ser negligenciada quando comparada à incerteza do albedo (σ_{ρ_V}) e do diâmetro (σ_D). Para este caso, a relação entre a incerteza do albedo e do diâmetro é dado pela equação 2.3.

$$\frac{\sigma_{\rho_V}}{\rho_V} = 2 \frac{\sigma_D}{D}. \quad (2.3)$$

Ou seja, a incerteza relativa do albedo é o dobro da incerteza relativa do diâmetro.

Em geral, a determinação do albedo e do diâmetro de um pequeno corpo é feita a partir de observações em comprimentos de onda no térmico (Gerdes et al., 2017; Müller et al., 2010; Usui et al., 2013). No entanto, uma técnica que permite a determinação direta do diâmetro e da forma de um pequeno corpo é a de ocultações estelares, que ocorre quando um pequeno corpo bloqueia temporariamente a luz de uma estrela. Dada a velocidade relativa do observador em relação ao corpo, a observação permite determinar o seu diâmetro conforme projetado no plano do céu (Gomes-Júnior et al., 2022). Esta técnica utiliza observações de campanhas bem organizadas por muitos participantes, incluindo astrônomos amadores (Braga-Ribas et al., 2014; Dias-Oliveira et al., 2017; Morgado et al., 2023; Ortiz et al., 2012; Sicardy et al., 2011).

Usui et al. (2013) apresenta relações entre albedo e tamanho de asteroides demonstrando que a diversidade de valores de albedo é maior para asteroides menores do que para asteroides maiores. Os mesmos autores também argumentam que a distribuição de albedo no cinturão de asteroides é fortemente bimodal separada em dois grupos em um valor de albedo de $\rho_V = 0,1$, presente não apenas na distribuição da população total, mas também nas distribuições do cinturão interno, médio e externo. Esse valor demarca asteroides tipo C de baixo albedo e tipo S de alto albedo. Em cada grupo, a distribuição de albedo é dependente do tamanho, e a variação nos valores de albedo é maior em tamanhos menores. Objetos além da órbita de Netuno apresentam uma diversidade de albedos e tamanhos, o que reforça a hipótese de que eles possuem diferentes regiões de formação (Delsanti et al., 2004; Marsset et al., 2019; Müller et al., 2020; Trujillo and Brown, 2002). Grundy et al. (2005) argumentam a existência evidente de uma ampla diversidade de albedos em objetos do disco disperso, ressonantes e clássicos (veja a seção 2.3.3), bem como entre objetos pequenos e grandes.

Portanto, pequenos corpos representam um reservatório de informação sobre uma grande parte da história, da química, dos processos físicos e da evolução do Sistema

Solar. Por serem vistos como remanescentes da formação planetária, incluindo fragmentos colisionais, a compreensão de suas propriedades físicas podem nos trazer informações sobre processos que estão escondidos nos planetas no que diz respeito à sua evolução geológica.

2.2 Sistema Solar Interior

2.2.1 Objetos em Órbita Próxima da Terra (NEOs)

Objetos em Órbita próxima da Terra (NEOs - *Near Earth Objects*) caracterizam um grupo de pequenos corpos, asteroides ou cometas, com periélio $q < 1,3$ AU cuja órbita se aproxima ou cruza a órbita da Terra ao redor do Sol (Barbee et al., 2020; Kokhirova and Babadzhanov, 2023). Quando nos referimos apenas a asteroides, usa-se NEAs - *Near Earth Asteroids*. Devido à sua proximidade com a órbita de nosso planeta, muitos NEAs atingem a Terra regularmente sem causar danos; alguns deles, com a dimensão de alguns metros, são capazes de criar assinaturas detectáveis na atmosfera sem causar consequências prejudiciais.

O primeiro asteroide em órbita próxima da Terra descoberto foi (433) Eros, em 1898 por Gustav Witt no Urania Observatory em Berlin (Pigatto and Zanini, 2002). Atualmente, sabe-se que (433) Eros é o segundo maior NEA conhecido, com 16,8 km de diâmetro, ficando atrás de (1036) Ganymed que tem o diâmetro de aproximadamente 37,7 km. A figura 2.1 mostra a distribuição cumulativa da descoberta de NEAs ao longo dos anos. Atualmente são conhecidos mais de 37000 asteroides em órbita próxima da Terra.

A partir de seus elementos orbitais, a população de NEAs é subdividida em quatro grupos (figura 2.2) conforme apresentado por Binzel et al. (2015):

- Amors - asteroides com periélio (q) maior que 1.017 AU e menor que 1,3 AU, estando com a órbita além da órbita da Terra.
- Apollos - asteroides que cruzam a órbita da Terra possuindo um semieixo maior $a > 1$ AU e periélio $q \leq 1,017$ AU.
- Atens - asteroides que cruzam a órbita da Terra "de dentro para fora" com $a < 1$ AU e afélio (Q , em que $Q = a[1 + e]$) > 0.983 AU
- Atiras - asteroides inteiramente interiores a órbita da Terra.

Alguns NEAs são caracterizados como PHA - *Potentially Hazardous Asteroids*. Este grupo é definido por aqueles objetos que possuem uma distância mínima de interseção com a Terra (*MOID* - *Minimum Orbit Intersection Distance*) menor ou igual a 0,05 UA e cuja magnitude absoluta não excede 22 (ou diâmetros $> \sim 140$ km) (Kokhirova and

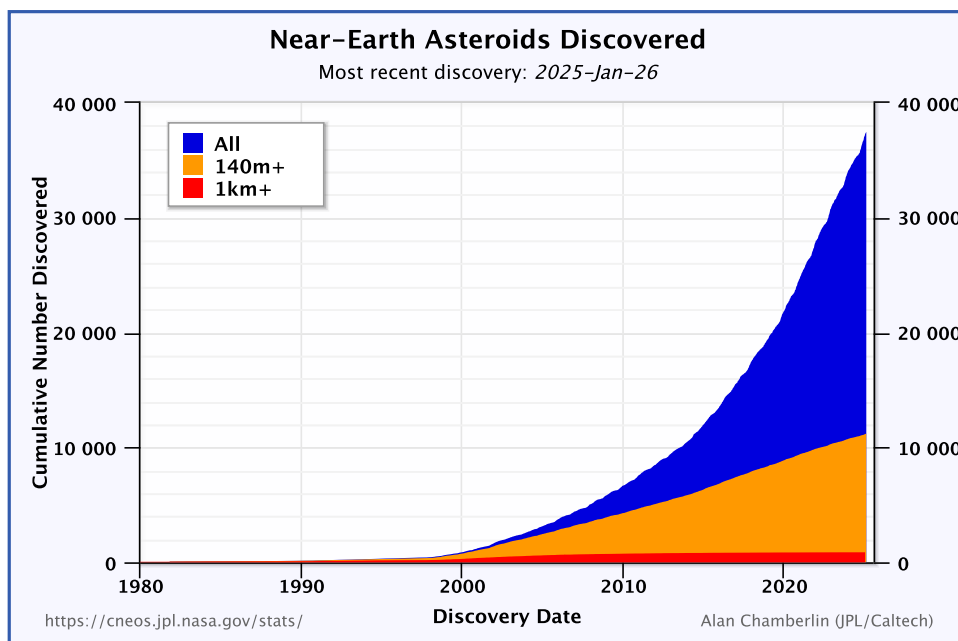


Figura 2.1: Descoberta de Asteroides em Órbita Próxima da Terra ao longo dos anos. Atualmente são conhecidos mais de 31000 NEAs. Fonte: <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>

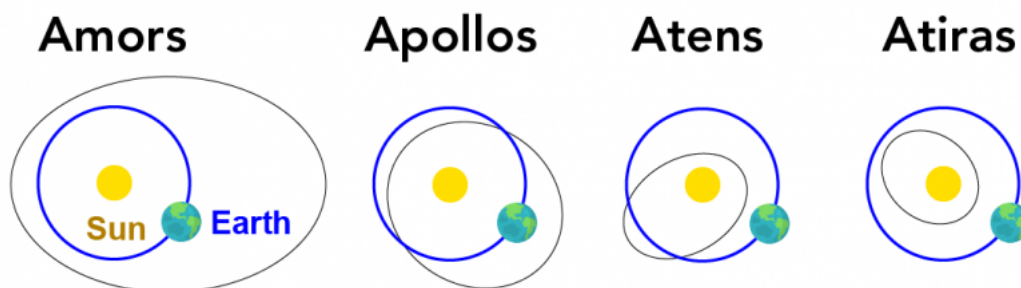


Figura 2.2: Representação orbital dos subgrupos da população de NEOs. A linha azul representa a órbita da Terra e a linha preta representa a órbita do NEA. Fonte: <https://letstalkscience.ca/>

(Babadzhanov, 2023). (99942) Apophis, um NEA do tipo Aten, é um dos PHAs mais notórios e espera-se que ele se aproxime a uma distância de $\sim 0,00025$ AU da Terra em abril de 2029 (Daly et al., 2020; Yu et al., 2014). A trajetória de PHAs é monitorada diariamente por observadores e teóricos para acompanhar cuidadosamente as mudanças em suas órbitas que possam afetar a Terra.

2.2.2 Cinturão Interno de Asteróides

Asteroides são pequenos corpos rochosos que, devido à sua baixa massa, possuem formato irregular não se caracterizando como planeta ou planeta-anão. Não há uma definição

formal estabelecida pela IAU que diferencie os asteroides dos demais pequenos corpos. Entretanto, eles são caracterizados como aqueles que estão em sua maioria localizados entre as órbitas de Marte e Júpiter (entre 2,0 e 3,65 UA), região definida como Cinturão Principal de Asteroides. A figura 2.3 apresenta a estrutura do cinturão principal, bem como sua divisão a partir da distância heliocêntrica. Autores como [Hartmann et al. \(1987\)](#) e [Weissman et al. \(2002\)](#) definem asteroides como corpos interplanetários que não apresentam uma fração substancial de gelo, não possuindo voláteis necessários que possibilitem o desenvolvimento de coma. Destaca-se que para um cenário mais completo dessa nomenclatura deve-se levar em conta Asteroides em Órbitas Cometárias (ACOs, da sigla em inglês), que apresentam órbitas cometárias típicas mas que nunca mostraram qualquer tipo de atividade ([Licandro et al., 2018](#)), e também Asteroides Ativos, que são caracterizados como um conjunto de pequenos corpos dinamicamente semelhantes a asteroides, mas que perdem massa, como cometas ([Jewitt, 2012](#)). Entretanto, não nos aprofundaremos nesses dois subgrupos de objetos.

Compreender a distribuição espacial das composições de asteroides do cinturão principal se faz interessante visto que este é o maior reservatório de pequenos corpos do sistema solar ([Novaković et al., 2022](#); [Usui et al., 2013](#)). Sendo eles remanescentes da formação planetária, muitos foram formados perto de suas localizações atuais, enquanto outros migraram de seus locais originais de nascimento durante o processo de migração planetária ([Levison et al., 2009](#)). Assim, devido a eventos cataclísmicos, os atuais asteroides são bem misturados e representam diferentes origens, podendo estar confinados e certas regiões por ressonância e/ou quebrados ou segmentados por colisões ([Bourdelle de Micas et al., 2022](#); [Delbo' et al., 2017](#); [Usui et al., 2013](#)).

Os asteroides podem ser classificados de acordo com suas características dinâmicas/orbitais e propriedades físicas. No que diz respeito às suas características orbitais, podemos classificá-los em grupos e famílias. Um grupo de asteroides é caracterizado pela população de pequenos corpos que compartilham órbitas semelhantes, dos quais os membros não são necessariamente relacionados entre si. Famílias são grupos de asteroides que supostamente têm uma origem comum a partir de um evento colisional que dividiu um corpo maior. Elas são geralmente determinadas pela identificação de aglomerados de objetos próximos no domínio de elementos próprios, como semieixo maior (a), excentricidade (e) e $\sin(i)$ ([Carruba et al., 2013](#); [Zappalà et al., 1995](#)). A figura 2.4 apresenta algumas famílias de asteroides como Vesta, Flora, Nysa-Polana, Eunomia, Maria, Adeona, Dora, Gefion, Hoffmeister, Koronis, Eos, Themis, Hygiea e Veritas.

2.2.3 Taxonomia de Asteroides

A classificação taxonômica nos permite agrupar objetos que possuam similiaridades de superfície. Assim, asteroides tem sido agrupados por exemplo a partir da semelhanças em

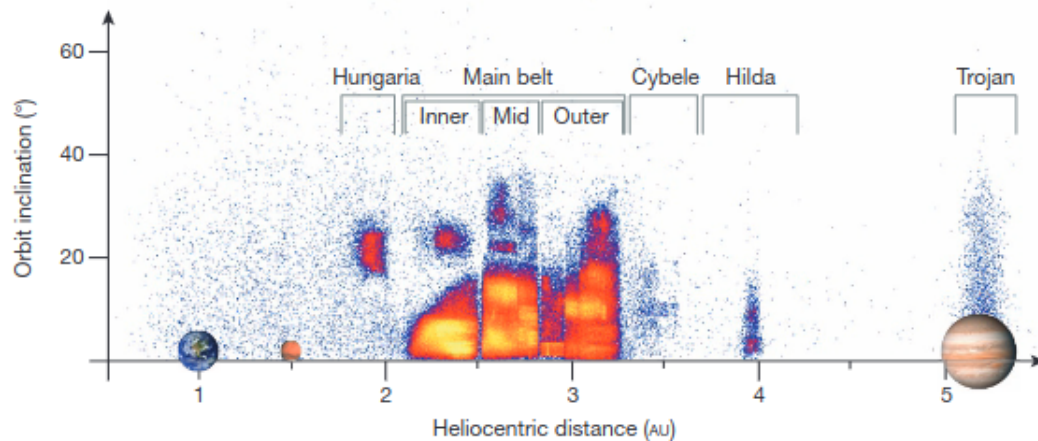


Figura 2.3: Localização do cinturão principal de asteroides com respeito aos planetas e o Sol. Estrutura orbital da inclinação dos objetos e densidade de objetos. A estrutura do cinturão principal é dividida por regiões instáveis, as quais estão destacadas entre 2,5 UA e 2,8 UA (locais onde a órbita de um asteroide está em ressonância com órbita de Júpiter), que separam as seções interna, intermediária e externa do cinturão principal. Os asteróides da família Hungaria estão localizados a distâncias heliocêntricas menores do que o cinturão principal e têm inclinações orbitais centradas perto de 20° . Os Hildas estão localizados próximos de 4 UA e os Troianos de Júpiter estão nos pontos L4 e L5 de Lagrange da órbita de Júpiter.

Fonte: DeMeo and Carry (2014).

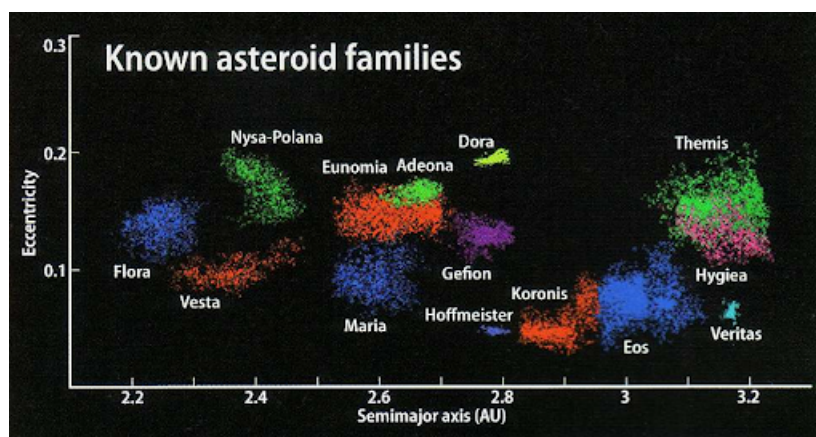


Figura 2.4: Distribuição de algumas famílias de asteroides por semieixo maior e excentricidade. As cores representam asteroides que pertencem a uma mesma família. Fonte: Astronomy Magazine. Ilustração criada por Roen Kelly baseado no trabalho de Ivezic et al. (2002). Uma distribuição das famílias asteroides juntamente com os asteroide de fundo (background) também pode ser encontrada em Nesvorný et al. (2006).

seus espectros de reflexão, albedos e índices de cor. Taxonomia por si só não nos permite obter características detalhadas a respeito da mineralogia e/ou composição individual de um asteroide. Entretanto, conforme destacado por Carvano et al. (2010), a análise da

distribuição de classes no cinturão principal pode, pelo menos, fornecer características coletivas e destacar regiões e objetos que merecem investigação mais aprofundada. Vale dizer que famílias de asteroides fornecem uma oportunidade única de sondar o interior de um corpo pai fragmentado e a taxonomia de asteroides tem sido usada nesses estudos para indicar o grau de homogeneidade entre os membros da família (Tholen, 1984). Assim, diferentes estudos em torno de classificações taxonômicas de asteroides vêm sendo desenvolvidos.

Baseado na fotometria do Eight Colors Asteroids Survey (ECAS), com observações de 405 asteroides obtidas através de 9 filtros e com os albedos obtidos pelo Infrared Astronomical Satellite (IRAS), Tholen (1984) obteve um esquema taxonômico cujas classes foram denominadas por A, C, D, S, T e X. A classe C, com composição rica em carbono, além de rochas e minerais, é subdividida em B, F e G. Os tipo B são considerados os "C-brilhantes" com albedo visual em torno de 0,1 (Mahlke et al., 2022), enquanto os asteroides do tipo F e G são caracterizados pelo seus comportamentos na região do UV (o primeiro neutro, o último mostrando forte comportamento de absorção). A classe X possui as subclasses E (alto albedo), M (albedo médio) e P (baixo albedo). Para representar três asteroides que possuíam espectros incomuns - (1862) Apollo, (249) Dembowska e (4) Vesta - foram criadas as classes Q, com superfícies semelhantes às dos condritos ordinários, R, ricos em piroxena e olivina e V, ricos em basalto, respectivamente. Os objetos da classe A são asteroides com superfície rica em olivina, enquanto a classe D está entre as classes mais primitivas e carbonáceas com uma grande quantidade de carbono e compostos orgânicos. Os asteroides da classe S são compostos principalmente de silicatos e minerais de ferro e magnésio. A classe X inclui asteroides que não se encaixam perfeitamente nas outras categorias.

Baseado nos espectros de asteroides obtidos pela campanha Small Main Belt Asteroid Spectroscopy II (SMASSII), Bus and Binzel (2002) propõem um esquema taxonômico que agrupa as classes S, X e C em três grandes complexos, conforme pode ser observado na figura 2.5. O complexo S é composto por asteroides de silicato, com uma banda de absorção com comprimentos de onda maiores que $0,7 \mu m$. O complexo C são asteroides carbonáceos, com absorção de UV fraca a média, abaixo de $0,55 \mu m$, com espectro geralmente plano ou ligeiramente avermelhado. O complexo X inclui asteroides metálicos e outros que não se enquadram nas classes anteriores. Esta classe possui um espectro com inclinação leve a moderadamente avermelhada. As classes Q, R, V, D e T do sistema de Tholen (1984) mantiveram-se inalteradas.

Com observações do NASA Infrared Telescope Facility (IRTF), DeMeo et al. (2009) apresentam um sistema de classificação taxonômica com base nos espectros de reflectância de 371 asteroides na faixa de comprimento de onda de $0,45$ a $2,45 \mu m$. Quase todas as classes de taxonomia de Bus and Binzel (2002) são preservadas, sendo criada uma nova subclasse (Sv) para o complexo S, uma classe intermediária entre os asteroides tipo S

e V, com espectro semelhante aos asteroides do tipo S, mas com traços de absorção de piroxeno. As classes Ld, Sk e Sl foram eliminadas. As figuras 2.5 e 2.6 comparam os espectros de reflectância para as classes definidas pelos dois esquema.

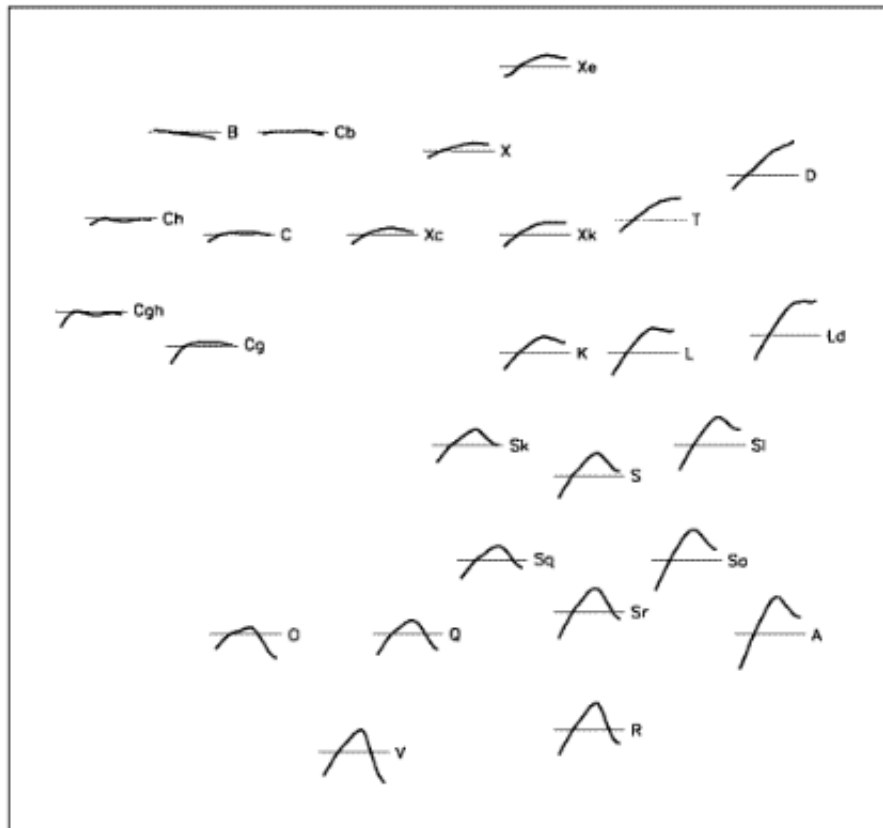


Figura 2.5: Esquema de espectros médios das classes definidas por [Bus and Binzel \(2002\)](#) a partir do SMASSII

Ainda neste contexto, [DeMeo and Carry \(2013\)](#) classificam taxonomicamente a população de asteroides observada pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS - [Ivezić et al., 2001](#)) por meio de um método proposto pelos autores para corrigi-la de bias de acordo com tamanho, distância e albedo. Através desse método, que corrige bias do levantamento nos corpos mais distantes/tênuos, é então obtida uma classificação taxonômica consistente com os dados de [Bus and Binzel \(2002\)](#) e [DeMeo et al. \(2009\)](#). Assim, é confirmada a presença do complexo S no cinturão principal externo, porém não se encontram evidências nos grupos dos troianos e Hildas. Os asteroides do tipo S e V representam a maior parte do cinturão interno. Asteroides do tipo C, P e D dominam do cinturão externo aos troianos. Encontram-se evidências de asteroides tipos D no cinturão principal interno, onde eles são inesperados de acordo com modelos dinâmicos de migração planetária. As classes mais massivas no cinturão principal são, em ordem decrescente, C, B, P, V e S. Excluindo os quatro asteroides mais massivos, (1) Ceres, (2) Pallas, (4) Vesta e (10) Hygiea que distorcem fortemente os valores, o material primitivo (tipos C, P) é responsável por mais

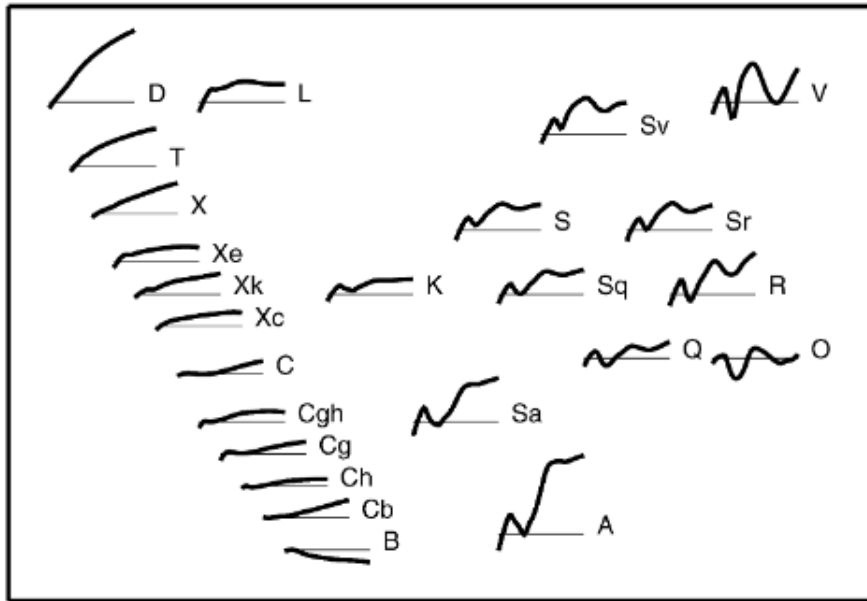


Figura 2.6: Espectros das 24 classes taxonômicas definidas por [DeMeo et al. \(2009\)](#)

da metade dos asteroides do cinturão principal e dos troianos, a maior parte da massa restante sendo do tipo S. Todas as outras classes são contribuintes menores para o material entre Marte e Júpiter. As figuras 2.7 e 2.8 mostra a distribuição de massa por classe taxonômica no cinturão principal segundo [DeMeo and Carry \(2013\)](#).

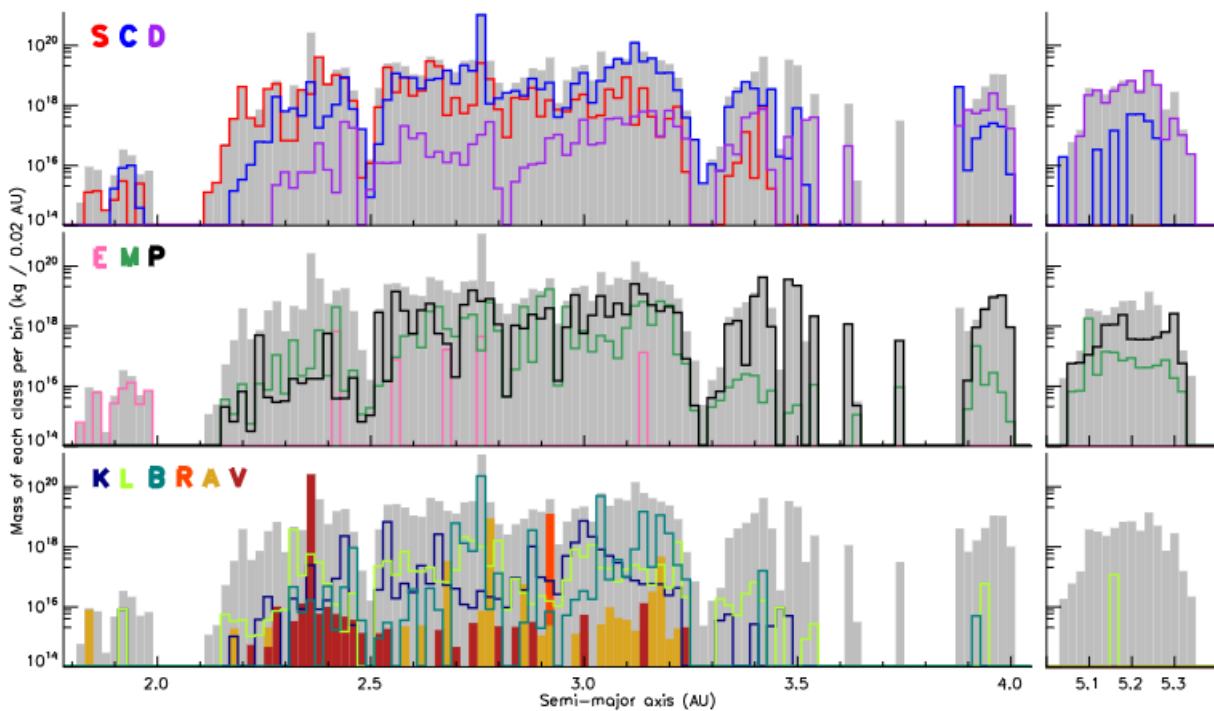


Figura 2.7: A massa (kg) de cada classe taxonômica em cada bin de 0,02 UA apresentado por [DeMeo and Carry \(2013\)](#). Todos os objetos têm 5 km ou mais.

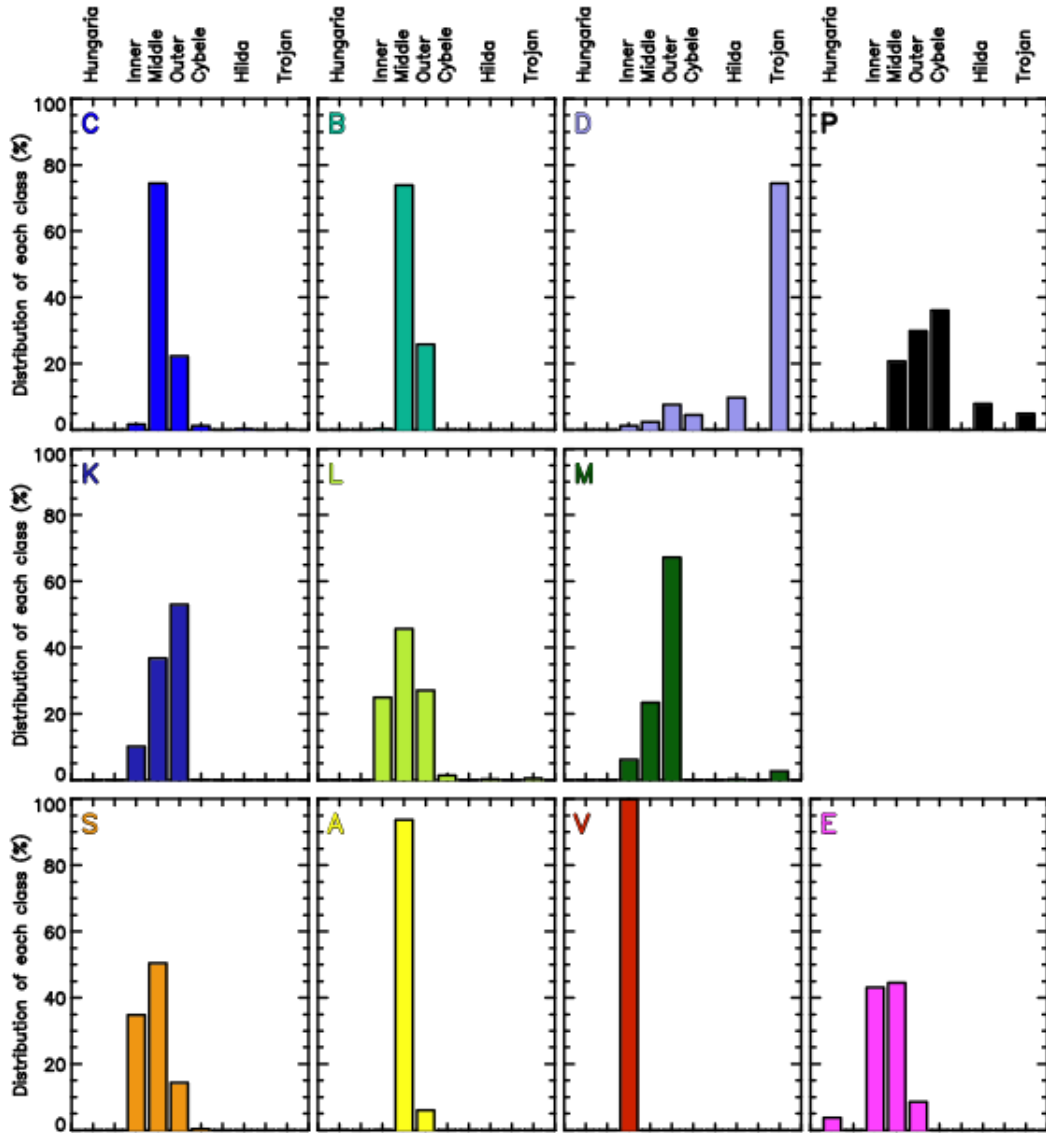


Figura 2.8: A distribuição de massa fracionária de cada classe através do cinturão segundo DeMeo and Carry (2013). O total de cada classe através de todas as zonas soma 100%.

2.3 Sistema Solar Exterior

2.3.1 Troianos de Júpiter

Os troianos de Júpiter são uma população de pequenos corpos que compartilham a órbita do gigante ao redor do Sol (figura 2.3). Eles estão agrupados em torno de dois pontos de equilíbrio do problema restrito de três corpos, conhecidos como pontos L4 e L5 de Lagrange, em ressonância de movimento médio 1:1 com Júpiter. As primeiras observações de troianos foram entre os anos de 1906 e 1907, com a observação de três pequenos corpos que mais tarde foram nomeados de Achilles, Patroclus e Hektor (Nicholson, 1961). Desde

então mais de 7.500 troianos e 5.800 candidatos a troianos (objetos cuja órbita não é bem definida, mas os parâmetros orbitais sugerem que ele pode ser um troiano) são conhecidos⁵.

A origem dos troianos de Júpiter segue sendo uma questão em aberto. Acredita-se que sejam planetesimais que foram capturados de uma população maior que existia na região planetária quando Júpiter se formou e/ou migrou (Bottke et al., 2023; Morbidelli et al., 2005; Nesvorný et al., 2013). Sendo assim, a origem natural desses objetos seria a população de planetesimais nascidos em um disco transnetuniano massivo e então eles devem compartilhar propriedades físicas dos TNOs (Hanus et al., 2023). Estudos de Emery et al. (2011), analisando espectros do visível e infravermelho próximo, sugerem a existência de uma bimodalidade de cor na população desses objetos. Assim, a maioria deles é pertencente aos grupos chamados de RED (associados a classe D do esquema taxonômico de Bus and Binzel (2002)) e LESS RED (associados às classes C e P do esquema taxonômico de Bus and Binzel (2002), sendo P subclasse do complexo X). Tal bimodalidade sugere uma relação entre as propriedades espectrais das populações de troianos, cometas e TNOs. Vale destacar que DeMeo and Carry (2013) também apontam forte presença da classe D no grupo dos troianos (figura 2.8).

Pertencente a esse grupo, destaca-se neste trabalho (2207) Antenor, descoberto em 1977. (2207) Antenor está entre os maiores troianos de Júpiter e orbita no ponto Lagrangiano L5⁶. Trabalhos anteriores apresentam para ele um diâmetro próximo de 100 km (Grav et al., 2012; Hanus et al., 2023; Stephens et al., 2016). Curvas de luz para rotação deste corpo têm sido observadas ao longo dos anos, apresentando um período rotacional próximo a $7,964 \pm 0,001$ horas (Mottola et al., 2011; Stephens and Coley, 2017; Stephens and Warner, 2019), sendo também fortemente sugerido como um candidato a binário (Stephens et al., 2018).

2.3.2 Centauros

Centauros são pequenos corpos que possuem órbitas dinamicamente instáveis, com semi-eixo maior localizado entre Júpiter e Netuno. Eles são caracterizados por órbitas altamente caóticas, com uma vida útil dinâmica que varia de menos de 1 a cerca de 100×10^6 anos (Tiscareno and Malhotra, 2003) e com evolução dinâmica perturbada principalmente pelos planetas gigantes. O primeiro objeto dessa população, Chiron, foi descoberto em 1977 (Kowal, 1989).

Trabalhos têm mostrado que os Centauros experimentam encontros próximos frequentes com os planetas gigantes, fazendo com que suas órbitas se tornem fortemente caóticas e, eventualmente, resultando em órbitas hiperbólicas, colidindo com planetas ou evoluindo para cometas da família de Jupiter (JFC) (Liu and Ip, 2019). Acredita-se que muitos Cen-

⁵Página do Minor Planet Center: <https://www.minorplanetcenter.net/>, última verificação em maio/2024

⁶<https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/JupiterTrojans/>

tauros podem ser provenientes do Cinturão de Kuiper (KBO) e do Disco Disperso (SDO) (Tiscareno and Malhotra, 2003). Assim, é amplamente aceito que eles representam uma população transitória entre os TNOs, distantes e frios, e os JFCs de rápida sublimação (Dobson et al., 2024; Liu and Ip, 2019). Neste contexto, concordando com Fernández et al. (2002), podemos considerá-los como representantes mais próximos da população mais distante, os TNOs.

Observações têm demonstrado atividades cometárias em Centauros sugerindo perda de massa causada por um processo diferente da sublimação do gelo de água mesmo em distâncias relativamente grandes do Sol (Chandler et al., 2020; de la Fuente Marcos et al., 2021; Hsieh et al., 2023; Jewitt, 2009). Estudos demonstram que essa atividade pode ser induzida termicamente e a perda de massa seja um processo relacionado à temperatura (Jewitt, 2009). Diversos Centauros, como 2060 Chiron e 174P/Echeclus, já apresentaram coma e cauda (Luu and Jewitt, 1990; Rousselot, 2008) desencadeada possivelmente pela cristalização do gelo amorfo de água (Guilbert-Lepoutre, 2012; Jewitt, 2009). Deste modo, o estudo desses processos é fundamental para compreender a evolução térmica e química de TNOs à medida que migram para regiões mais internas do Sistema Solar, reforçando o papel dos Centauros como precursores diretos de cometas ativos.

2.3.3 Objetos Transnetunianos (TNOs)

Objetos Transnetunianos (TNOs), como o nome sugere, são pequenos corpos localizados além da órbita de Netuno, a uma distância heliocêntrica maior do que 30 UA. Acredita-se que eles são restos colisionais e dinâmicos do disco planetesimal evoluído e, devido à suas grandes distâncias heliocêntricas, são relíquias pouco alteradas desde a formação do Sistema Solar. (Morbidelli and Nesvorný, 2020).

De modo geral, os TNOs são agrupados a partir de suas propriedades dinâmicas e orbitais. Conforme apresentado por Kavelaars et al. (2008), grande parte dos TNOs se encontram em configuração orbital ressonante de movimentos médios ou de primeira ordem com Netuno. Em geral, diferentes autores selecionam diferentes critérios para caracterizar os grupos dinâmicos. A seguir são apresentadas as principais classes dinâmicas para os TNOs e suas principais características (veja também a figura 2.9).

1. **Ressonantes** - São TNOs cujas órbitas estão em ressonância orbital média com Netuno. Eles formam estruturas verticais óbvias em um gráfico de semieixo maior (a) versus excentricidade (e), conforme pode ser observado na figura 2.10. Por convenção, é adotado $p : q$ para expressar a ressonância orbital p do período orbital do TNO e q de Netuno (Levison et al., 2008). Uma das ressonâncias mais conhecidas é dos objetos conhecidos como plutinos, 2:3, no qual o planeta anão Plutão se insere. Mas também podemos citar outras ressonâncias como 3:5, 4:7, 1:2, 2:5, etc.

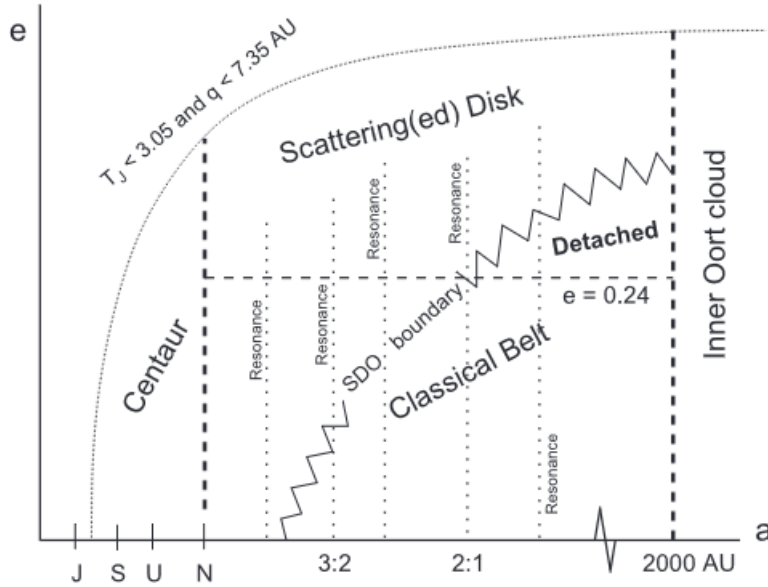


Figura 2.9: Fluxograma para a nomenclatura do sistema solar exterior. T_j refere-se ao parâmetro de Tisserand para Júpiter (Gladman et al., 2008).

2. **Objetos do Disco Disperso (Scattering(ed) Disk Objects - SDO)** - Os objetos pertencentes a este grupo são caracterizados por órbitas instáveis com alta excentricidade com periélio próximo a Netuno (entre 30 e 40 AU).
3. **Objetos Destacados (Detached Objects)** - São objetos com órbitas estáveis, em altas excentricidades ($e > 0,24$) e suficientemente distantes para serem pouco/moderadamente afetados por outros planetas do Sistema Solar, Netuno em particular. Possuem, assim, semieixos maiores desde poucas centenas de UA até ~ 2000 UA (veja Gladman et al., 2008, para maiores detalhes).
4. **Cinturão Clássico (Classical Belt)** - Embora seja formalmente considerado que todos os TNOs não-ressonantes de baixas excentricidades (e) pertençam a este grupo, é usual dividi-lo em cinturão clássico interno (semieixo maior $a < 39,4$ UA), cinturão clássico externo ($a > 48,4$ UA e $e < 0,24$) e cinturão clássico principal, também chamados de Cubewanos (Gladman et al., 2008). Com base em suas inclinações, os pequenos corpos deste grupo também podem ser subdivididos em cinturão clássico frio, com baixa excentricidade, baixa inclinação ($i < 5^\circ$) e na região $42,5 < a < 44,5$ AU, e cinturão clássico quente com $i > 5^\circ$ e se estendendo $35 < a < 47$ AU (Gladman et al., 2008; Kavelaars et al., 2008). Entretanto, utilizando valores de inclinação livre (I_{free}), Huang et al. (2022) e Marsset et al. (2023) identificam os TNOs clássicos frios como aqueles com semieixos maiores

$$42,5 < a < 45 \text{ AU e } I_{free} < 4^\circ \text{ ou } 45 < a < 47 \text{ AU e } I_{free} < 6^\circ{}^7.$$

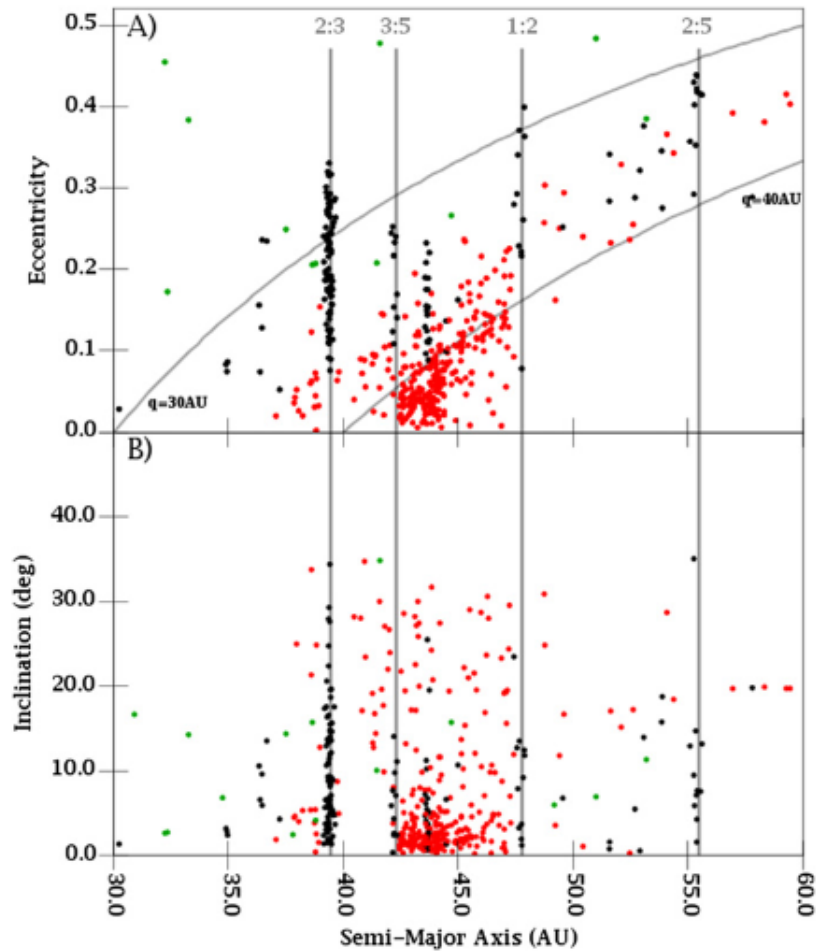


Figura 2.10: Distribuição de elementos orbitais observados para TNOs apresentados por [Levison et al. \(2008\)](#). Os pontos pretos representam objetos em uma das ressonâncias de movimento médio de Netuno, os pontos verdes são objetos passando por encontros com Netuno e os pontos vermelhos são objetos estáveis não ressonantes. (A) Excentricidade \times semieixo maior. As duas curvas correspondem a $q = 30$ UA e $q = 40$. (B) semieixo maior \times inclinação.

Cores de TNOs e Centauros

Estudos sobre as propriedades superficiais de TNOs e Centauros contribuem para obtenção de informações importantes acerca dos processos químicos da formação do disco protoplanetário externo. Neste sentido, espectroscopia pode ser vista como a técnica mais poderosa para a investigação de suas superfícies. Entretanto, devido à grande distância e brilho fraco desses corpos menores, ela é acessível para uma parcela muito pequena dessa

⁷A escolha por I_{free} à inclinação eclíptica é preferível, visto que ela se torna uma grandeza conservada independentemente do referencial adotado, visto que a inclinação eclíptica varia ao longo do tempo como um artefato referencial

população. Conforme destacado por [Barucci and Peixinho \(2006\)](#), mesmo com os maiores telescópios existentes, a maior parte dos TNOs é fraca para observações espectroscópicas, não havendo assim instrumentação disponível em solo para estudo composicional de boa qualidade ([Pinilla-Alonso et al., 2021](#)). Por outro lado, a fotometria multibanda nos permite estudar esses objetos fracos, mesmo que com menor precisão, nos permitindo inferir propriedades físicas desses objetos. Neste contexto, levantamentos fotométricos têm revelado uma diversidade de cores de TNOs e Centauros que, embora não forneçam informações precisas de composição mineralógica, permite um agrupamento útil desses objetos em grupos com similaridades de cores.

[Tegler and Romanishin \(1998\)](#) já apresentavam, após dois anos de observações fotométricas, resultados que demonstravam a existência de duas populações distintas de cores de TNOs. Uma consistia em objetos cujas cores superficiais são apenas ligeiramente mais vermelhas que a cor do Sol, enquanto a outra consiste nos objetos mais vermelhos conhecidos no Sistema Solar. Desde então, trabalhos posteriores vêm investigando possíveis cenários que possam explicar a origem das cores desses objetos distantes (por exemplo [Barucci et al., 2008](#); [Brown, 2012](#); [Nesvorný et al., 2020](#); [Peixinho et al., 2012, 2003](#); [Tegler et al., 2016](#)). Assim, autores têm desenvolvido diferentes estudos que possam demonstrar possíveis correlações entre seus parâmetros orbitais e suas cores superficiais.

[Tegler and Romanishin \(2000\)](#) e [Trujillo and Brown \(2002\)](#) evidenciaram a existência de correlação entre cor e inclinação orbital para a população clássica. Resultado similar é reportado por [Doressoundiram et al. \(2002\)](#) e [Perna et al. \(2013\)](#), demonstrando que a população de clássicos frios é predominantemente mais avermelhada, sendo os objetos quentes pertencentes a grupos mais neutros. [Perna et al. \(2013\)](#) também destaca não encontrar nenhum outro tipo de correlação entre cor e parâmetros orbitais para as demais classes dinâmicas. [Peixinho et al. \(2008\)](#) e [Fornasier et al. \(2009\)](#) não reportaram correlação entre cor e o limite de inclinação comumente estabelecido para as classes frias e quentes dos objetos clássicos. Tais autores reportaram uma quebra de cor superficial para inclinações próximas a 12° , onde objetos mais avermelhados tendem a se concentrar em inclinações abaixo de 12° . Mais tarde, [Peixinho et al. \(2015\)](#) reforça a existência de uma correlação significativa entre cor e inclinação para os clássicos e também destaca uma possível existência para as demais classes dinâmicas, apesar de mais fraca. [Marsset et al. \(2019\)](#), utilizando uma amostra de TNOs dinamicamente excitados ($i > 5^\circ$), não encontrou nenhuma evidência de correlação entre inclinação espectral e inclinação orbital para os objetos com inclinações no intervalo $5^\circ < i < 21^\circ$, onde objetos mais e menos avermelhados estão bem amostrados. Posteriormente, [Ali-Dib et al. \(2021\)](#) reportaram que os objetos mais avermelhados estão fortemente limitados para excentricidade abaixo de 0,42 e inclinações menores de 21° , apontando também uma escassez de objetos vermelhos no disco disperso. Sendo assim, é apresentada na literatura algumas tendências e possíveis correlações entre cor e parâmetros orbitais para TNOs e Centauros.

A ampla diversidade de cores de TNOs pode ser compreendida como o resultado de processos físicos que atuaram em suas superfícies e/ou possíveis diferenças de composição (Doressoundiram et al., 2008) ou diferentes de regiões de formação (Nesvorný et al., 2020). Estes corpos gelados são vistos como representações de um compilado de restos provenientes de diferentes regiões do Sistema Solar pela migração planetária. Acredita-se que a população dinamicamente fria tenha sido formada in situ e sobrevivido à migração de Netuno, enquanto os objetos dinamicamente quentes tenham sido perturbados/espalhados, trazendo memórias de anos de interação (Brown, 2012; Chen et al., 2022).

2.3.4 Taxonomia de TNOs e Centauros

Diferentes esquemas taxonômicos tem sido propostos para agrupar TNOs a partir de suas cores de superfície. Barucci et al. (2005) utilizando um processo de agrupamento G-mode (Coradini et al., 1977; Fulchignoni et al., 2000) encontrou a existência de quatro classes diferentes. Fraser and Brown (2012) e Fraser et al. (2015) propõem que os TNOs dinamicamente excitados podem ser agrupados em duas classes que exibem uma gama de cores ópticas. Posteriormente, Fraser et al. (2023) apresentaram uma nova interpretação para as cores de TNOs, novamente em duas populações, que ocupam diferentes regiões de cores no óptico - NIR seguindo uma curva de avermelhamento (Fraser et al., 2023; Marsset et al., 2023), curva com inclinação espectral constante no espaço de cores. Dalle Ore et al. (2013), a partir de uma técnica de agrupamento aplicada à fotometria multibanda e albedos ópticos, encontrou 10 tipos de cores superficiais diferentes. Pike et al. (2017) demonstrou a existência de três tipos distintos de superfícies que resultaram da fotometria nas bandas *grz*. Pinilla-Alonso et al. (2025) revelou a existência de três grupos espectrais principais de TNOs correspondentes a diferentes composições de superfície a partir de observações espectroscópicas do Telescópio Espacial James Webb (JWST). Conforme já mencionado, embora a classificação taxonômica, por si só, não seja o suficiente para fornecer informações significativas a respeito da composição mineralógica da superfícies de objetos individuais, ela nos permite inferir características coletivas através de agrupamentos desses objetos no espaço multicolor (Barucci et al., 2008; Carvano et al., 2010), ainda que não exista na literatura um consenso a respeito do número exato de grupos taxonômicos para TNOs e Centauros.

O esquema taxonômico proposto por Barucci et al. (2005) apresenta a discriminação de grupos de TNOs e Centauros a partir de uma análise estatística multivariada de um conjunto homogêneo e de alta qualidade de índices de cor baseada na fotometria nos filtros *BVR₁₁*. Utilizando uma amostra de 51 TNOs e Centauros com as cores *B-V*, *V-R*, *V-I* e *V-J*, e estendido para mais 84 objetos, os quais as cores *B-V*, *V-R*, e *V-I* também estavam disponíveis, aplica-se a técnica de agrupamento estatístico *G-mode* (Barucci et al., 1987) e análise de componentes principais (Tholen, 1984). As componentes principais, conforme

descrito por [Barucci et al. \(2005\)](#), são combinações lineares das variáveis originais, onde os coeficientes representam a importância relativa de uma variável dentro de um componente principal. Esses coeficientes são os autovetores da matriz de variância-covariância das variáveis. A soma dos autovalores dessa matriz é responsável pela variância total da amostra. Cada autovalor reflete a porcentagem de contribuição de cada componente principal para a variância total.

Conforme descrito no trabalho de [Barucci et al. \(2005\)](#), a técnica *G-mode* ([Coradini et al., 1977](#)) permite a obtenção de um agrupamento automático de uma amostra estatística contendo N objetos descritos por M variáveis em termos de grupos taxonômicos homogêneos sem critérios de agrupamento a priori e levando em conta os erros instrumentais na medição de cada variável. O método também fornece indicações quanto à importância relativa das variáveis na separação dos grupos. São agrupadas J classes homogêneas que são identificadas através de um processo iterativo baseado num teste de pertinência da j -ésima classe a uma "classe zero". Quatro grupos homogêneos foram obtidos usando um alto nível de confiança.

Com base nesses resultados, [Barucci et al. \(2005\)](#) propõem uma taxonomia de TNOs e Centauros com base em suas cores de superfície. É utilizada uma designação de duas letras para cada grupo para que se possa distinguir da taxonomia de asteroides. Assim, os classes são identificadas de cores desde neutra em relação ao Sol até mais avermelhada. Os objetos com uma cor neutra (também referidos como azuis) são identificados como grupo BB e aqueles com mais avermelhados (também referidos como vermelhos) são pertencentes a class RR. Os grupo intermediários são BR, que consiste em objetos com uma cor azul-vermelha intermediária, e grupo IR, objetos moderadamente vermelhos.

A partir da análise dos TNOs e Centauros por meio da diversidade entre os grupos busca-se compreender seus caminhos evolutivos e/ou efeitos de diferentes processos físicos em suas superfícies. Conforme destacado por [Barucci et al. \(2005\)](#) e também [Fulchignoni et al. \(2008\)](#) cada grupo contém objetos que apresentam características composicionais particulares da superfície.

O grupo RR apresenta os objetos mais vermelhos do Sistema Solar, sendo o segundo grupo que apresenta maior porção de gelo de água na superfície em comparação às demais classes ([Merlin et al., 2017](#)). O avermelhamento deste grupo pode ser ocasionado pela grande quantidade de complexos orgânicos conhecidos como tolinas (tholins). Esses materiais são formados por processos de radiação de raios ultravioleta e cósmicos, causando uma coloração avermelhada nesses corpos distantes ([Fernández-Valenzuela et al., 2021](#); [Khare et al., 1993](#); [Sagan and Khare, 1979](#)). O grupo BB representa os objetos com um espectro de reflectância neutro em relação ao Sol, sendo tipicamente planos e um tanto azulados no infravermelho próximo. Apresentam geralmente forte banda de absorção de H_2O em comparação com os demais grupos. O grupo IR é menos vermelho que o grupo RR, enquanto o grupo BR é um grupo intermediário entre BB e IR, mesmo que seu com-

portamento de cor seja mais próximo do grupo IR. A figura 2.11 apresenta o espectro de reflectância médio obtido para cada classe utilizando o grupo de objetos apresentados por Barucci et al. (2005).

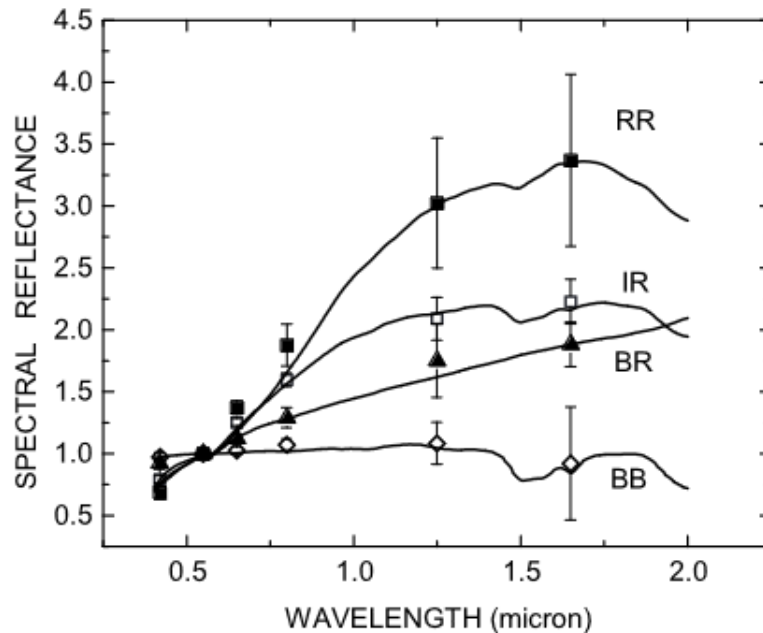


Figura 2.11: Espectro de reflectância normalizado para banda V (550 nm) para os quatro grupos taxonômicos reportados por Barucci et al. (2005)

Com base nos dados do Col-OSSOS (Schwamb et al., 2019), utilizando observações de 102 TNOs individuais, Fraser et al. (2023) relataram evidências de apenas duas classes de composição na população do cinturão de Kuiper (excluindo grandes TNOs e membros da família de Haumea) a partir de sua refletividade no infravermelho próximo (NIR). O Col-OSSOS adquiriu observações fotométricas no óptico e NIR de alta qualidade e quase simultâneas. O levantamento consiste em um conjunto de dados com observações principalmente nos filtros u , g e r do Sloan e no filtro J do Maunakea, adquiridos com o Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS, Hook et al., 2004) e Near Infrared Imager (NIRI, Hodapp et al., 2003) no Gemini-North e MegaPrime imager (Boulade et al., 2003) no Telescópio Canadá-França-Havaí. Ainda recebeu um pequeno número de observações suplementares com o Suprime-Cam imager (Miyazaki et al., 2002) no Subaru Telescope.

Nesta nova taxonomia proposta por Fraser et al. (2023), os TNOs são classificados em BrightIR ou FaintIR a partir de um sistema de projeção de cores dada pelos vetores paralelo (PC1) e perpendicular (PC2) ao longo da uma curva de avermelhamento, conforme observado pelas figuras 2.12 e 2.13. A curva de avermelhamento é uma curva de inclinação espectral constante no espaço de cores. Assim, em um gráfico cor-cor, um objeto localizado abaixo da curva tem um espectro côncavo, enquanto um objeto localizado acima é espectralmente convexo (Marsset et al., 2023).

Os objetos caracterizados como BrightIR possuem albedos grandes em comprimentos de onda no NIR com relação aos seus valores na região do óptico. Por outro lado, a classe designada como FaintIR tem albedos baixos no NIR quando comparados aos objetos do BrightIR com cores semelhantes no óptico (Marsset et al., 2023).

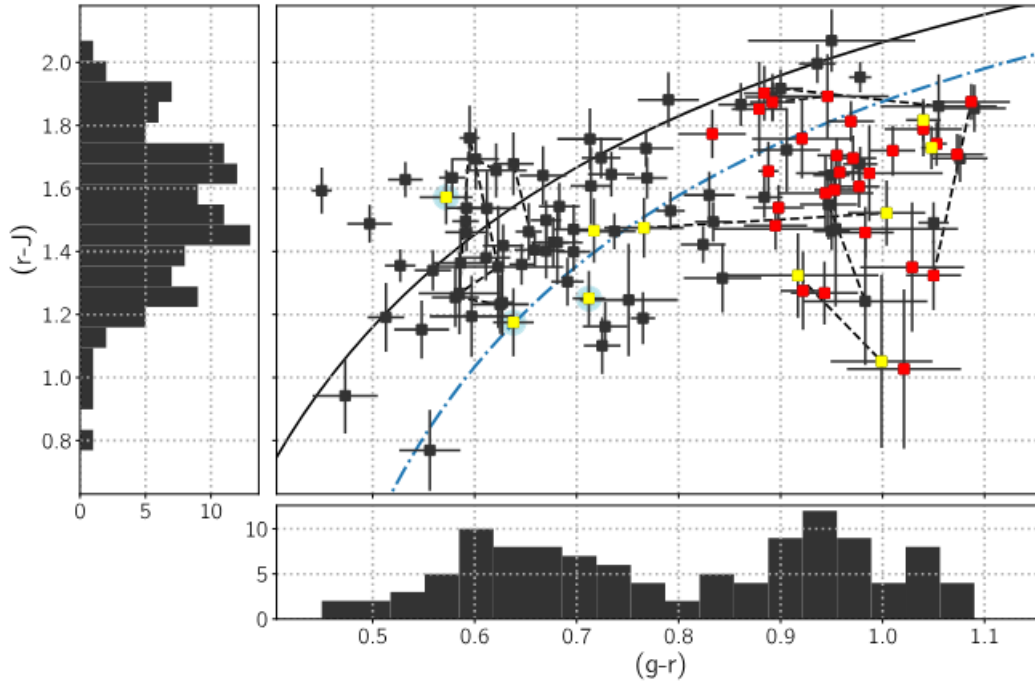


Figura 2.12: Cores $(g - r)$ e $(r - J)$ dos alvos do Col-OSSOS. A curva de avermelhamento é representado pela linha preta. Observações repetidas são conectadas por linhas tracejadas. Fonte: Fraser et al. (2023).

A partir das observações de 54 TNOs e cinco Centauros como parte do programa JWST Cycle 1 General Observers (2418) 'Discovering the Surface Compositions of Trans-Neptunian Objects', (DiSCo-TNOs) Pinilla-Alonso et al. (2025) revelou a existência de três grupos espectrais principais de TNOs. Da amostra foram excluídos Centauros pelo fato de suas superfícies poderem ser alteradas pela atividade cometária presente ou passada. Assim, a amostra contém objetos que abrangem a diversidade da população de TNOs em termos de tamanho, cores visíveis, albedo geométrico e propriedades dinâmicas e exclui os planetas anões ricos em voláteis, que são distintos por causa de seu tamanho, composição de superfície e processos geoquímicos.

Para investigar os grupos espectrais, foram aplicadas três técnicas (agrupamento k-means, agrupamento hierárquico e análise de componentes principais (PCA)) aos espectros de refletância. Todas as três técnicas indicaram consistentemente a existência de três grupos distintos dentro da população de TNOs - *bowl*, *double-dip* e *cliff* (figura 2.14), com base da forma da banda de absorção em $3\mu\text{m}$, cujo espectros podem ser observados na figura 2.15. Os espectros do tipo *bowl* são dominados por absorções características

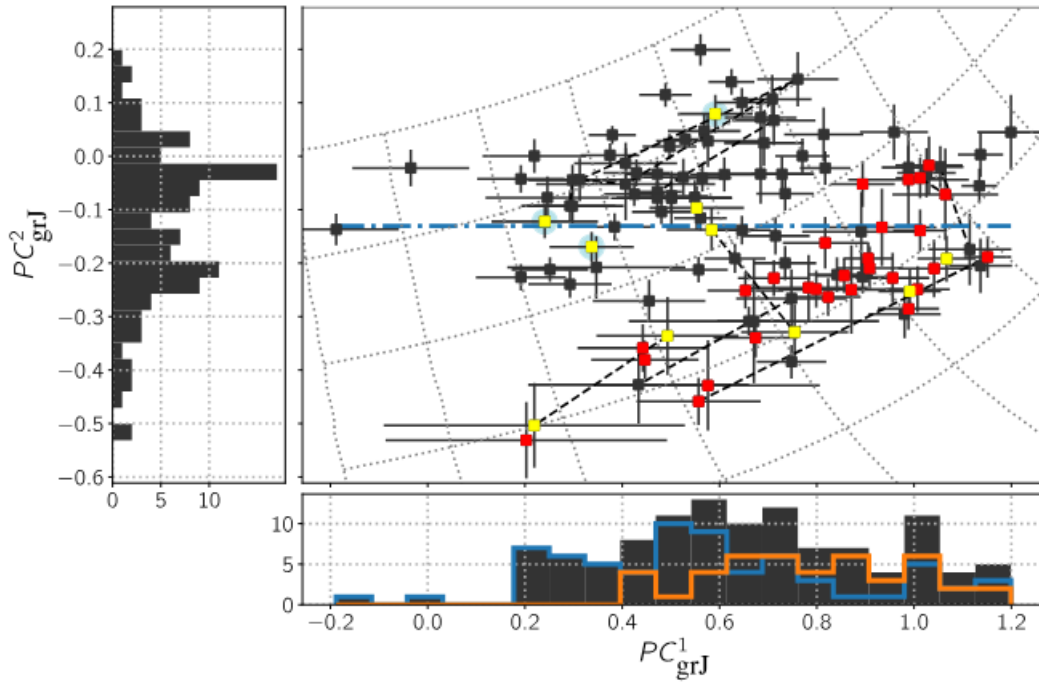


Figura 2.13: Projeção dos valores de PC1 e PC2 das cores $(g-r)$ e $(r-J)$. A curva de avermelhamento é uma linha horizontal com $PC2 = 0$. Hashes cinza mostram linha de cor constante $(g-r)$ ou $(r-J)$. A curva azul tracejada mada $PC2 = -0,13$, valor adotado para distinguir as classe FaintIR (inferior) e BrightIR (superior). Os paineis lateral e inferior mostram os histogramas do conconjunto de dados completo (preto) e dos objetos pertencentes as classes BrightIR (azul) e FaintIR (laranja). Vale notar que a curva de avermelhamento possui a componente perpendicular, $PC2$, igual a zero. Fonte: [Fraser et al. \(2023\)](#).

de gelo de água em $1,5$, $2,0$ e $3,0 \mu m$, incluindo uma ampla faixa de combinação que se estende de $3,9$ a $4,9 \mu m$. A absorção profunda em $3 \mu m$ tem um formato semelhante ao gaussiano, com uma refletância igualmente alta nas bordas direita e esquerda. O grupo espectral dos *double-dip* foi caracterizado por uma absorção profunda em $3,0 \mu m$ e uma banda mais rasa de $3,3$ a $3,7 \mu m$. A refletância aumenta de $3,0$ a $3,7 \mu m$ para aproximadamente 70% do valor do contínuo em $2,62 \mu m$. A absorção fundamental de CO_2 em $4,27 \mu m$ é delimitada por dois picos que se elevam notavelmente acima do contínuo circundante e uma absorção profunda em $4,06 \mu m$. Os TNOs do tipo *cliff* são objetos que revelaram muitas bandas de absorção. Todos os espectros mostram uma queda acentuada na refletância, começando em $2,7 \mu m$, um perfil plano de $2,9$ a $3,15 \mu m$ e, em seguida, uma elevação para um máximo local entre $3,7$ e $3,8 \mu m$, a um nível de aproximadamente 53% do contínuo de refletância de $2,62 \mu m$.

Neste trabalho, utilizamos o esquema taxonômico de [Barucci et al. \(2005\)](#) para classificar TNOs e Centauros e buscar possíveis correlações entre os grupos e características físicas e orbitais. Entretanto, diferente da técnica utilizada pelos autores, buscamos ou-

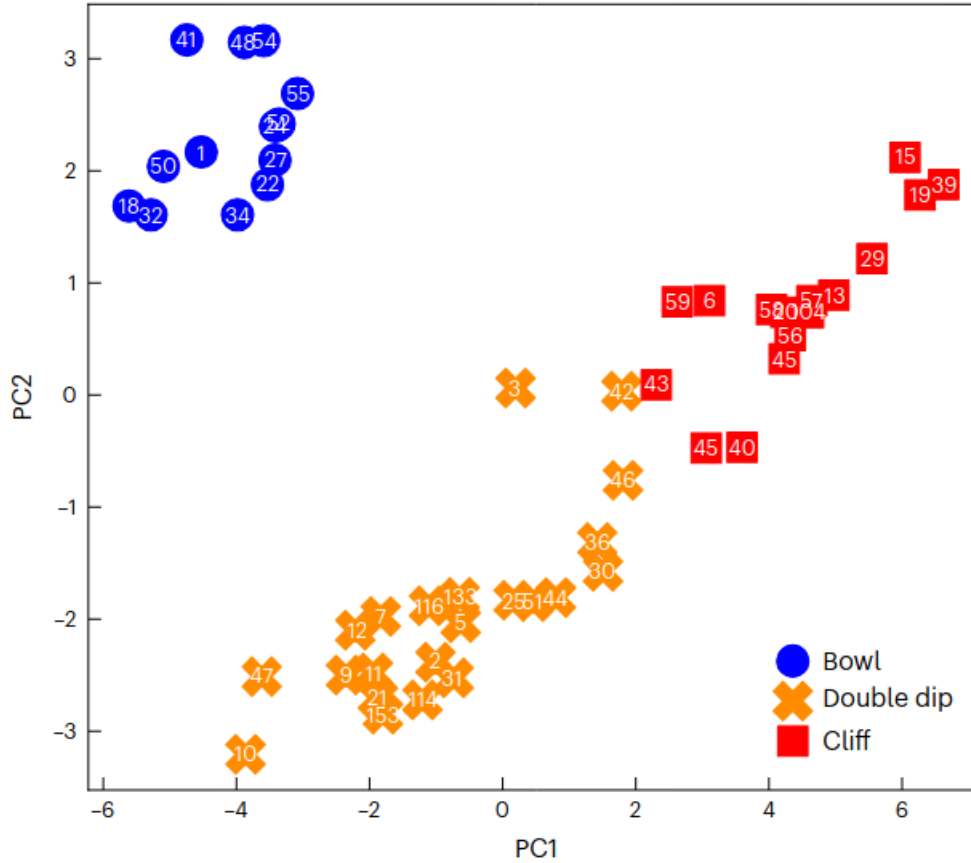


Figura 2.14: Resultados da técnica de agrupamento PCA e k-means. Os dois primeiros componentes do PCA do conjunto de dados DiSCo mostram as localizações dos três principais grupos espectrais detectados pelo agrupamento k-means independente. Os pontos de dados são coloridos de acordo com os k-means em vez de quaisquer cortes de componentes principais, fornecendo confirmação adicional da detecção dos clusters. A diferença espectral entre *bowl* e os outros dois aglomerados foi mais forte do que a diferença entre os *cliff* e os *double-dip*. Cada TNO foi rotulado por seu ID de observação conforme apresentado na tabela 1 de [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#).

tros algoritmos para agrupamento para serem aplicados sobre o conjunto de cores de nossos dados. Utilizamos um procedimento do pacote em R ([R Core Team, 2021](#)), o algoritmo *PAM* - Partition Around Medoids ([Kaufman and Rousseeuw, 2009](#)) para segregar TNOs e Centauros em grupos a partir de suas cores. Os procedimentos utilizados estão detalhados no capítulo 4 desta tese.

2.3.5 Cometas

Cometas são conglomerados de rochas e gelos de materiais voláteis. À medida em que se aproximam do Sol, eles são aquecidos e o gelo sublima desenvolvendo uma cauda (geralmente composta de duas partes: uma de poeira e outra de gás ionizado) a partir da coma (nuvem brilhante de gás e poeira que se forma em torno do núcleo do cometa),

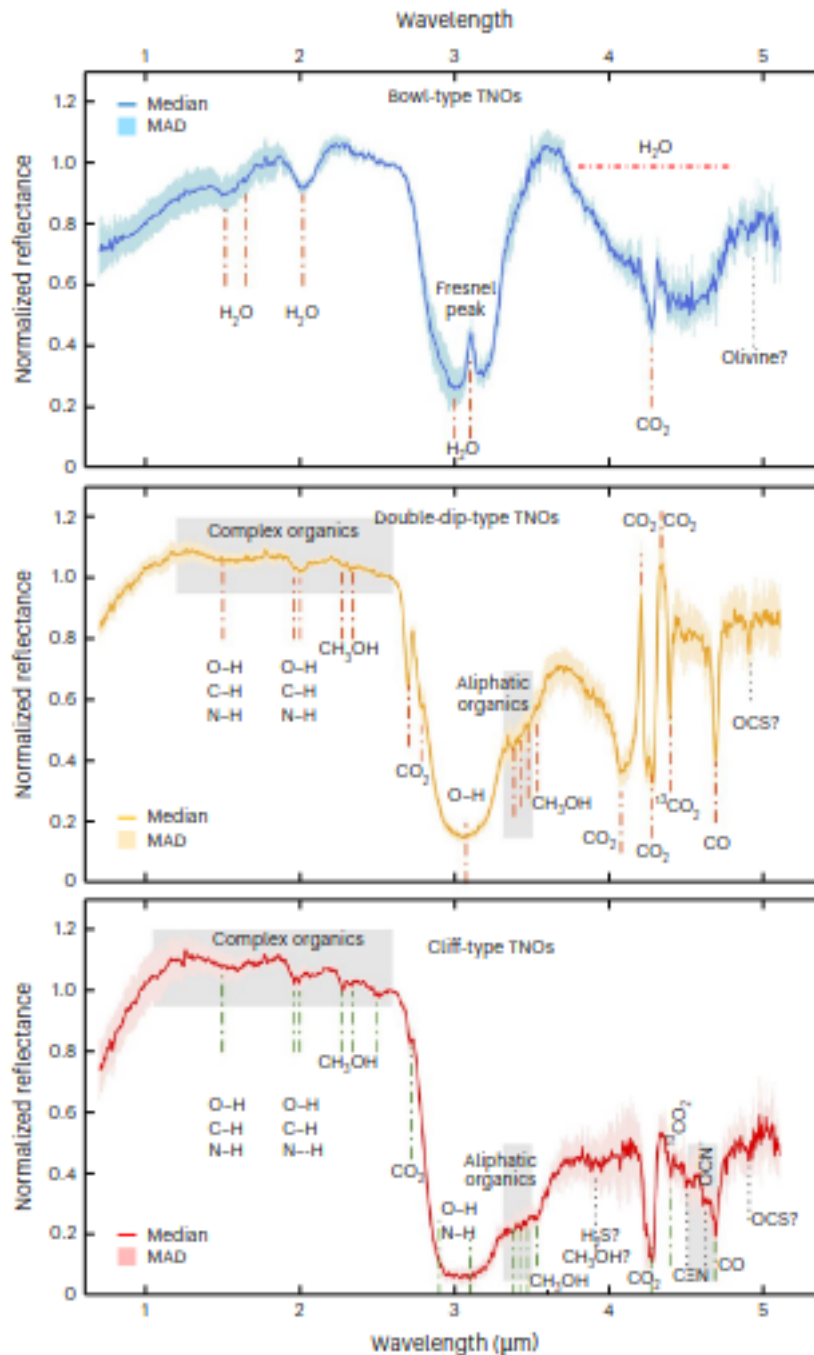


Figura 2.15: Espectros representativos de cada classe composicional de TNOs segundo Pinilla-Alonso et al. (2025). As linhas contínuas coloridas correspondem à mediana dos espectros em cada um dos grupos composicionais detectados na população transnetuniana. A região sombreada colorida correspondente ao desvio absoluto \pm mediano que representa a diversidade em cada grupo. As caixas cinzas destacam as detecções correspondentes a materiais contendo N–H, C–H e O–H e compostos orgânicos alifáticos; seus limites não representam nenhuma medida física.

que diminui à medida em que se afasta do Sol (Cochran et al., 2015; Whipple, 1950). Esses corpos são planetesimais remanescentes da formação do Sistema Solar e acredita-se

que eles se formaram na região mais externa. Muitos deles foram varridos e incorporados aos planetas gigantes. Aqueles remanescentes da formação planetária foram ejetados e perturbados gravitacionalmente para a nuvem de Oort ou permaneceram em regiões além da órbita de Netuno (Cochran et al., 2015; Królikowska and Dybczyński, 2010). Até janeiro de 2025, o MPC tem registrado a descoberta de 4568 cometas.

Os cometas podem ser caracterizados como aqueles que frequentemente retornam ao periélio, cometas de curto período (*SPC - Short-periodic Comets*), e aqueles que levam séculos, ou milhares de anos para retornar às regiões internas do Sistema Solar, os chamados cometas de longo período (*LPC - Long-periodic Comets*). Estes possuem afélio da ordem de 50.000 - 150.0000 UA (Królikowska and Dybczyński, 2010). Cometas de curto período orbitam ao redor do Sol em 200 anos ou menos. Halley, um cometa de curto período por exemplo, tem sua órbita de cerca e 76 anos. A maioria dos cometas com período orbital na ordem de 20 anos são frequentemente designados como cometas da família de Júpiter (*JFC - Jupiter-Family Comets*). Este grupo distinto possui baixa inclinação ($\leq 30^\circ$) e são originários do cinturão de Kuiper ou do disco disperso (Fernandez, 1980; Shober et al., 2024).

LPCs, ao contrário dos cometas de curto período, fornecem informações exclusivas sobre os primeiros estágios do Sistema Solar e sobre a arquitetura atual de sua região de origem. Eles podem ser caracterizados como cometas quase parabólicos, com excentricidade de $0,9 < e < 1$, cometas parabólicos $e = 1$ e cometas hiperbólicos $e > 1$ (Nabiyev et al., 2022).

Neste contexto, os cometas representam objetos importantes para determinar restrições adequadas para modelos da nebulosa solar primitiva. Além disso, o estudo de suas composições físico-química apontam que esses pequenos corpos podem ter sido importantes veículos de entrega das moléculas iniciais necessárias para a origem da vida como a conhecemos (Cochran et al., 2015). No entanto, visto que este trabalho não apresenta resultados sobre propriedades físicas de cometas, não aprofundaremos em torno do assunto.

Capítulo 3

Obtenção de Dados do Dark Energy Survey

3.1 Dark Energy Survey

O Dark Energy Survey (DES, [Dark Energy Survey Collaboration et al., 2005, 2016](#)) é um levantamento astronômico colaborativo projetado para mapear 5000 graus quadrados do hemisfério sul celeste em cinco filtros ópticos (*grizY*) com o objetivo de estudar a natureza da energia escura responsável pela expansão acelerada do universo. O DES iniciou sua operação em 31 de julho de 2013. Esta colaboração conta com a participação de mais de 400 cientistas de 26 instituições nos Estados Unidos, Reino Unido, Espanha, Brasil, Alemanha, Suíça e Austrália

Durante seis anos (2013 - 2019), este levantamento usou 575 noites de observação utilizando a Dark Energy Camera (DECam, [Flaugher et al., 2015](#)), uma câmera extremamente sensível instalada no telescópio Victor M. Blanco localizado no Observatório de Cerro Tololo (CTIO), Chile. Neste contexto, a colaboração obteve um mapa tridimensional de mais de 300 milhões de galáxias que estão a bilhões de anos-luz de distância, além de um catálogo de milhares de supernovas.

Sendo projetado para a ciência extragaláctica, o DES otimizou uma estratégia de observação obtendo imagens profundas de campos observados repetidamente ao longo dos anos em diferentes filtros. Assim, o levantamento possibilitou a detecção de objetos móveis em aproximadamente 1/8 do céu, tornando-o uma ferramenta poderosa para observação e identificação de objetos do Sistema Solar ([Dark Energy Survey Collaboration et al., 2016](#)).

3.1.1 Dark Energy Camera (DECam)

A DECam é uma câmera de 570 megapixel extremamente sensível, desenhada e construída pela colaboração DES com o objetivo principal de estudar a natureza da energia



Figura 3.1: Observatório Interamericano de Cerro Tololo. O domo maior é onde está localizado o telescópio Victor M. Blanco.

escura utilizando 4 estudos complementares: aglomerados de galáxias, lentes fracas, supernovas do Tipo Ia e oscilações acústicas de bárions (Flaugher et al., 2015). Ela foi montada no foco primário do telescópio Victor M. Blanco, que possui um espelho primário de 4 metros, localizado no Observatório de Cerro Tololo a 2200 metros de altitude a aproximadamente 500 km ao norte de Santiago, Chile (Figura 3.1). Sua construção foi iniciada em 2008 e finalizada em 2011. As figuras 3.2 e 3.3 mostram a DECam montada no foco primário do telescópio Blanco

Em troca da confecção da câmera, 105 noites por ano de tempo no telescópio foram reservadas exclusivamente para realização do projeto DES. Assim, o levantamento varreu 5.000 graus quadrados do hemisfério sul celeste em um total de 525 noites, com excelente qualidade de imagem, alta sensibilidade no infravermelho próximo e baixo ruído de leitura.

A DECam consiste em um mosaico de dispositivos de carga acoplada - CCDs (do inglês: charge-coupled device) extremamente sensíveis, em que 62 CCDs, de 2k x 4k, são para ciência e 12 CCDs menores, de 2k x 2k, para guiagem, foco e alinhamento do telescópio (Figura 3.4). Os 74 CCDs estão montados em uma placa de alumínio em um padrão hexagonal no plano focal da DECam, onde as imagens são tomadas. Os CCDs tem pixels de $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ com escala da placa de $0,263''$ por pixel. A DECam possui um sistema de posicionamento e alinhamento hexapod, que consiste em um conjunto de seis pistões acionados pneumaticamente para alinhar precisamente os elementos ópticos

entre as exposições para manter o foco da câmera, minimizando distorções e obtendo dados confiáveis (Flaugher et al., 2015). Além de seu uso para o DES, a câmera é um instrumento de instalação no telescópio Blanco, estando disponível para uso geral da comunidade astronômica.

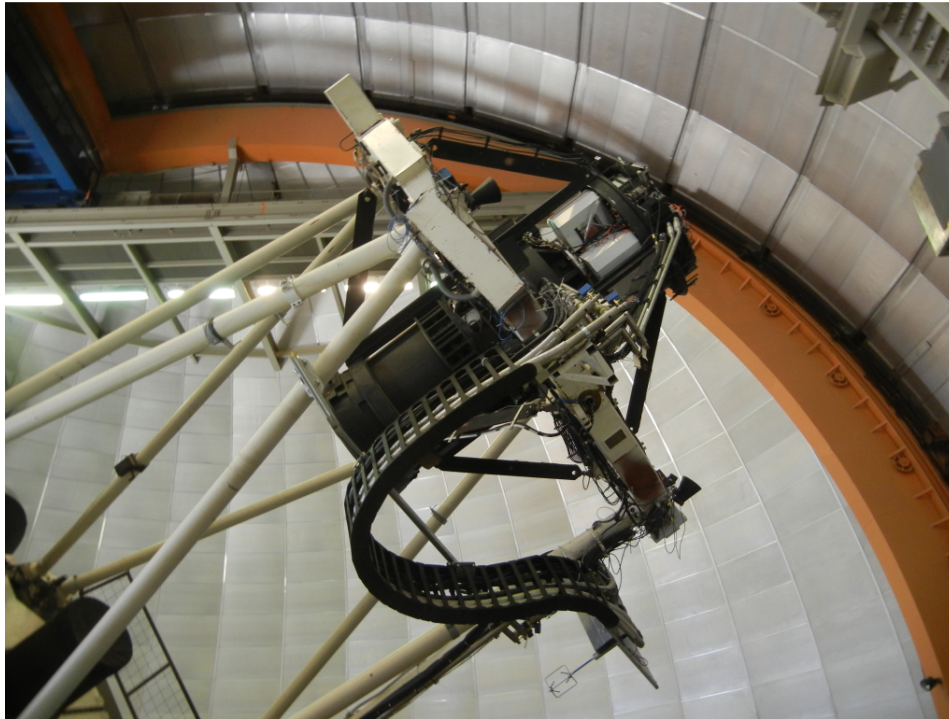


Figura 3.2: Dark Energy Camera montada no foco primário do telescópio Blanco (Flaugher et al., 2015).

3.1.2 Filtros

A colaboração DES fez observações utilizando cinco filtros que estão nas bandas *grizY*, com comprimento de onda indo de 400 até 1.065 nm. Cada filtro possui nominalmente 13mm de espessura e diâmetro de 62 cm. O sistema Hexapod fornece uma capacidade altamente precisa no alinhamento dos elementos óticos entre as exposições, mantendo o foco da câmera e possibilitando a obtenção de imagens mais nítidas possível. O mecanismo do obturador aciona um elemento de bloqueio de luz que protege o imageador da luz entre as exposições. A primeira luz oficial da DECam foi feita em 12 de setembro de 2012.

3.1.3 Processamento de Dados

O gerenciamento dos dados do DES é feito pela DES Data Management (DESDM) que é responsável por processar as imagens da DECam tomadas pelo DES e produzir dados

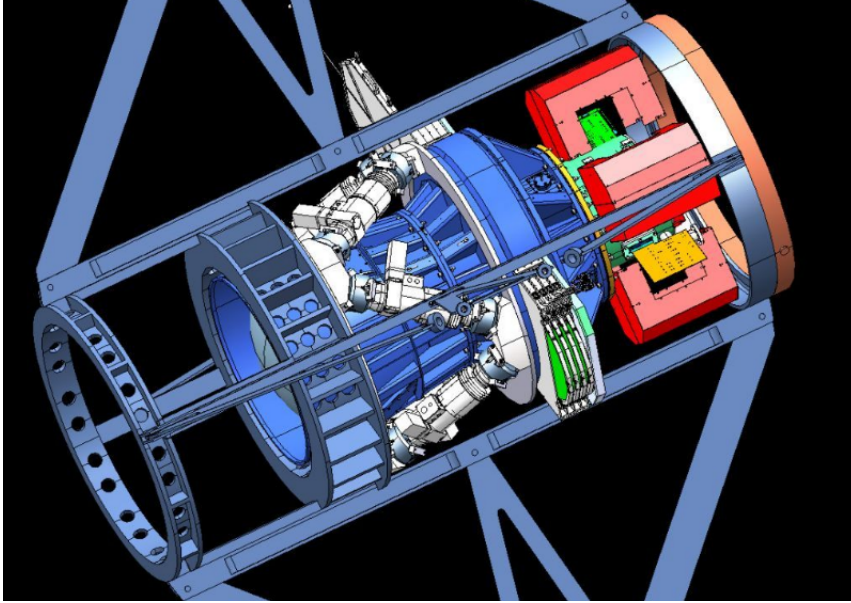


Figura 3.3: Dark Energy Camera montada no foco primário do telescópio Blanco (Flaughner et al., 2015).

Filtro	$\lambda(nm)$	FWHM (nm)	Transmissão (%)
DES g	398 - 548	150	91 - 92
DES r	568 - 716	148	90 - 91
DES i	710 - 857	147	96 - 97
DES z	850 - 1002	152	97 - 98
DES Y	953 - 1065	112	98 - 99

Tabela 3.1: Características dos filtros da DECam.

reduzidos para a ciência. Existem alguns níveis de processamento de dados definidos pelo sistema DESDM:

- **Processamento Single-Epoch:** Remove assinaturas instrumentais de exposições individuais e produz catálogos de objetos (single epoch). Para este processamento são definidos dois pipelines de processamento: (i) para avaliação da qualidade de dados em "tempo real", (ii) Produz dados científicos finais. Tais pipelines são diferenciados principalmente pelos arquivos de calibração e configuração de imagens que utilizam:

1. FIRST CUT: Tem como objetivo avaliar a qualidade de dados logo após as observações verificando se é necessário retomar uma exposição específica. Nele é utilizado arquivos de calibração de imagem produzidos durante o ano anterior de observação. Ele faz a redução das imagens brutas, calcula as soluções astrométricas, mascara regiões ruins e [modela a dispersão da luz de fontes pontuais](#) (*PSF - Point Spread Function*), aplica avaliações de qualidade e por fim produz o catálogo de objetos.

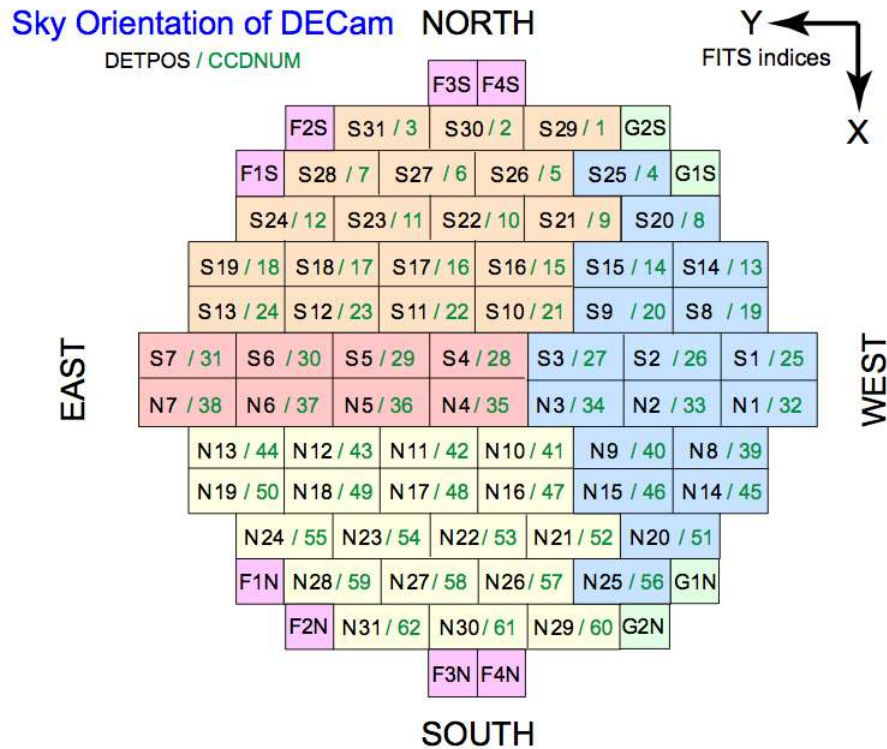


Figura 3.4: Orientação no céu do mosaico de CCDs da DECam. Os CCDs de 2k x 2k rotulados como "F" são usados para controle de foco e guiagem. Aqueles rotulados como "G" são usados para orientação. Os números de posição do detector (por exemplo, "S4" ou "N4" perto do centro do campo) são úteis para identificar CCDs específicos para observar nas imagens de várias extensões. A declinação decresce ao longo do eixo x, e a ascensão reta aumenta ao longo do eixo y. Vale mencionar que dois dos CCDs (S7 e N30) de ciência estão queimados (Flaugher et al., 2015).

2. FINAL CUT: executa as mesmas tarefas do FIRST CUT, porém ele deriva os arquivos de configuração e calibração da época durante a qual a observação é feita. Ele produz imagens que são utilizadas como entrada para o processamento Multi-Epoch e a geração dos catálogos co-adicionados do DES DR1. As imagens deste pipeline são mais adequadas para serem analisadas e para estudar objetos móveis.
- **Processamento Multi-Epoch:** Este processamento aumenta a profundidade do levantamento utilizando co-adições de imagens do FINAL CUT e produzindo catálogos de objetos co-adicionados. Ele utiliza o esquema de *tiles*, que divide o céu em regiões quadradas de 10.000 pixels (0,7305 graus) de lado. Co-adiciona as imagens sobrepostas através do esquema de combinação e ponderação "CHI-MEAN", projetada para minimizar discontinuidades entre regiões com diferentes números de exposições (Drlica-Wagner et al., 2018). O refinamento astrométrico é realizado como parte da co-adição das imagens. O Método Global de Calibração (Burke et al., 2018)

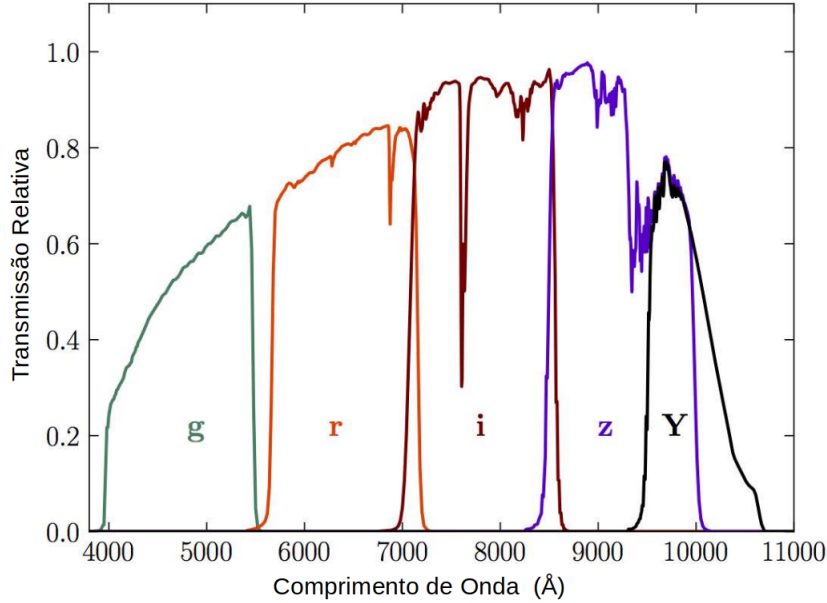


Figura 3.5: Banda passante do padrão DR1 do DES, tendo em conta o rendimento total do instrumento e a absorção atmosférica. Fonte: NOIRlab

é utilizado para calibração fotométrica das imagens individuais do FINAL CUT. O ponto zero das imagens co-adicionadas são ajustadas de forma que tenham o valor de 30 mag.

3.1.4 Objetos do Sistema Solar através das Observações do DES.

A exposição single epoch e cadência de observação, bem como a variação do movimento do objetos na área do levantamento, possibilita a identificação de objetos móveis. A redundância das observações permitiu extrair significativamente informações sobre cada fonte de descoberta a medida que determinado objeto pode ser observado muitas vezes ao longo dos seis anos de coleta de dados (Bernardinelli et al., 2023; Dark Energy Survey Collaboration et al., 2016). Embora não tenha sido desenvolvido prioritariamente para o estudo de objetos do Sistema Solar, são inegáveis as contribuições já feitas pelo DES através de análises fotométricas e astrométricas de pequenos corpos com distâncias heliocêntricas que vão desde o interior do Sistema Solar até a periferia. Dessas contribuições podemos destacar a descoberta do grande objeto do disco disperso (SDO) - 2014 UZ224 (Gerdes et al., 2017); do cometa proveniente da hipotética nuvem de Oort (C/2014 UN271 - Bernardinelli et al., 2021); e dos quatro troianos de Netuno no ponto L4 no qual um deles (2013 VX30) apresentou avermelhamento similar aos TNOs mais avermelhados, sugerindo um "elo-perdido" entre os troianos e a populações de TNOs (Gerdes et al., 2016; Lin et al., 2019); um dos maiores catálogos de TNOs (Bernardinelli et al., 2022) e o maior

catálogo de cores e curvas de luz de TNOs (Bernardinelli et al., 2023).

Neste contexto, para a identificação e estudo de objetos conhecidos do Sistema Solar observados durante os seis anos deste levantamento, nós utilizamos neste trabalho o serviço Sky Body Tracker (SkyBoT), o que é descrito detalhadamente abaixo.


3.1.5 Obtenção de Dados

Os membros da colaboração DES têm acesso a seu banco de dados podendo assim baixar, entre outros produtos, os metadados e as imagens CCD. O banco de dados do DES possui diversas tabelas onde seus metadados estão organizados. Conforme descrito em VALENTIN (2020), foi desenvolvida uma *query* para procurar, através da ferramenta *easyaccess*, todos os metadados do DES.

A ferramenta *easyaccess* (Kind et al., 2019) é um intérprete de linha de comando aprimorado e um pacote Python criado para facilitar o acesso a catálogos astronômicos armazenados em bancos de dados SQL. Ela foi projetada com comandos personalizados especificamente para acessar o banco de dados do DES, embora possa ser facilmente estendida para outras pesquisas ou banco de dados. A primeira liberação de dados dessa ferramenta foi em 17 de fevereiro de 2015 e, desde então, centenas de colaboradores do DES tem utilizado para acessar os dados deste levantamento.

Esta ferramenta é baseada em *termcolor* e no módulo central *cmd* Python. Ela utiliza a interface *cx_Oracle* para se comunicar com o Oracle, *requests* para solicitações de URL externas e outras bibliotecas externas de código aberto, como *NumPy*, *pandas*, *fitsio* e *h5py* para manipulação e transformação de dados de array. Para poder usar esta ferramenta é necessário pertencer à colaboração DES. A figura 3.6 mostra a janela inicial como vista para os usuários do DES.

```
Connecting to DB ** dessci ** ...
Loading metadata into cache...



DARK ENERGY SURVEY
DATA MANAGEMENT

easyaccess 1.4.5. The DESDM Database shell.
Connected as audreyk to dessci.
** Type 'help' or '?' to list commands. **

DESSCI ~> |
```

Figura 3.6: Janela Inicial da ferramenta *easyaccess*. Fonte: Kind et al. (2019).

Foi desenvolvido por VALENTIN (2020) um código Python para, a partir dos metadados baixados e sabendo os objetos que poderiam estar presentes nas imagens, fazer o download de todos os arquivos de imagens CCDs que contenham uma ou mais observações de objetos do Sistema Solar. Assim, identificamos neste trabalho todos os CCDs, adquiridos durante os seis anos de observações com a DECam dentro do DES, que poderiam conter a(s) imagem(ns) de um ou mais pequeno corpo conhecido do Sistema Solar. Foi então buscado, para cada CCD obtido dessa identificação, o catálogo DES correspondente contendo medições astrométricas e fotométricas. Tais catálogos são uma compilação sob o nome Year-6 (Y6) com nome completo Y6A1_FINALCUT_OBJECTS, conforme descrito por Morganson et al. (2018). Informações relevantes para este trabalho foram a identificação única do CCD, banda-passante, medições de fluxo e suas respectivas incertezas, posições ICRS, tempo de exposição e data e hora da observação.

3.1.6 Sky Body Tracker (SkyBoT)

Para indentificar todos os objetos conhecidos do Sistema Solar nas imagens CCD do DES durante os seis anos de observação, foi utilizado o serviço Sky Body Tacker (SkyBoT - Berthier et al., 2006) desenvolvido pelo *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides* (IMCCE, Observatório de Paris). Este projeto é um laboratório virtual que tem entre seus objetivos identificar objetos conhecidos do Sistema Solar em imagens astronômicas a partir do conhecimento do apontamento, data da observação, local da observação e campo de visada (FOV). Para cumprir esse objetivo foi criado um banco de dados de efemérides pré-computadas de todos os objetos conhecidos do Sistema Solar e foram desenvolvidos vários métodos descritos abaixo:

Cone-Search: Esse método identifica todos os objetos conhecidos do Sistema Solar em um campo de visão de um determinado tamanho (círculo ou caixa, de até 30 graus) em uma determinada época.

Resolver: A partir do Fornecimento do nome de um objeto e uma data, este método determina as coordenadas de posição (ascensão reta e declinação) desse objeto para a data fornecida.

getAsterClass: Identifica a classe dinâmica dos objetos do Sistema Solar.

Status: Fornece o status atual do banco de dados. Este método é útil para saber o período de tempo coberto pelo SkyBoT.

Availability: Fornece a disponibilidade do serviço web do SkyBoT.

Uma imagem da DECam contém 62 CCDs. Sendo assim, podemos aplicar o SkyBoT de duas maneiras:

- Fornecendo a área de cobertura de uma imagem CCD da DECam como FOV, sendo os objetos identificados correspondentes direto de uma imagem CCD específica. Sendo o procedimento adotado neste trabalho, ele requer mais de 4 milhões de consultas.
- Fornecendo uma área circular, dentro da qual se encontra uma imagem da DECam. Visto que só são necessárias pouco mais de 70 mil consultas (uma consulta por exposição), este é procedimento mais rápido. Entretanto, os objetos identificados numa imagem da DECam precisam ser distribuídos para cada uma das 62 imagens CCDs que a compõem.

É possível utilizar o serviço SkyBoT de duas formas: (i) através da interface web¹ (figura 3.7) ou (ii) por meio de uma interface de linha de comando e um programa de transferência de dados como `curl` ou `wget`. Em grande quantidade de dados, para o SkyBoT Cone-Search, é necessário desenvolver um código gerenciador das consultas por meio da linha de comando. Assim, é possível analisar dados obtidos por grandes surveys por meio das informações de apontamento, parâmetros de entrada (como data da observação, coordenadas de apontamento e dimensões do FoV, código de localização do observador pela IAU, formato do arquivo e parâmetros de saída) para buscar pequenos corpos do Sistema Solar nas imagens. Para facilitar o uso dessa ferramenta permitindo a análise dos apontamentos do Dark Energy Survey de forma mais rápido e eficaz, foi criado um espelho do SkyBot no LIneA.

SkyBoT cone-search fornece uma saída em formato de texto ou VOTable contendo, entre outros, coordenadas equatoriais J2000, nome e número do objeto (se numerado), magnitude V estimada e classificação dinâmica². O número de objetos conhecidos classificados por classe dinâmica apontados pelo SkyBoT por estarem nas imagens do DES utilizados neste trabalho estão apresentados na tabela 3.2.

Os parâmetros dinâmicos de asteroides no SkyBoT vêm do ASTORB (The Asteroidal Orbital Elements, Lowell Observatory). Se um objeto não estiver no ASTORB ou se o SkyBoT não foi atualizado quando um objeto foi incluído no ASTORB, então este objeto é desconhecido para o SkyBoT. Para evitar operações frequentes e demoradas relacionadas às consultas no banco de dados DES e no SkyBoT, o número de objetos do Sistema Solar apresentados aqui é o obtido em 31/MAI/2022, próximo à data em que este trabalho começou. Neste contexto, os números atuais de objetos conhecidos hoje são certamente maiores do que aqueles mostrados na tabela 3.2.

No capítulo 4 desta tese apresentamos resultados fotométricos para TNOs e Centauros observados pelo DES. Com um conjunto de três cores obtivemos a classificação taxonômica

¹SkyBoT Service: <https://vo.imcce.fr/webservices/skybot/index.php?forms=conesearch>

²A critérios de classificação dinâmica utilizada pelo SkyBoT pode ser acessado em: <https://ssp.imcce.fr/webservices/skybot/>.

Figura 3.7: Interface Web do serviço SkyBoT

Classe Dinâmica	Número
Cinturão Principal	366 706 objetos
Hungaria	12 199 objetos
NEAs	9 400 objetos
Mars-Crossers	8 213 objetos
TNOs	758 objetos
Centauros	129 objetos
Troianos (Júpiter)	1 684 objetos
Cometas	423 objetos
TOTAL	399 512 objetos

Tabela 3.2: Número de objetos do Sistema Solar identificados pelo SkyBoT que podem estar nas imagens do DES. Este número pode ser alterado cada vez que o SkyBoT é atualizado.

em quatro grupos e buscamos possíveis correlações entre as cores e propriedades orbitais. Apresentamos também, no capítulo 5, resultados fotométricos para asteroides do cinturão principal, trabalho feito em colaboração com o professor Dr. Valério Carruba da UNESP.

Capítulo 4

Fotometria do DES para TNOs e Centauros

Apresentamos neste capítulo resultados da exploração fotométrica das imagens do DES para o estudo da superfície de TNOs e Centauros. Os resultados aqui apresentados estão publicados na *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (MNRAS), cujo artigo pode ser consultado no apêndice A desta tese.

4.1 Fotometria do DES para TNOs e Centauros

Ao longo dos seis anos de observação do DES, o levantamento obteve medidas fotométricas em 5 bandas (*grizY*), porém em intervalos irregulares de tempo. Nós utilizamos dados fotométricos exclusivamente dos catálogos single epoch do DES, cujo o processamento de imagem e determinação das magnitudes é muito bem descrita por [Morganson et al. \(2018\)](#). Vale também ressaltar que tais medidas foram obtidas de um mesmo instrumento e passaram por um processo de redução bem definido. Para o estudo de TNOs e Centauros, utilizamos as medidas nas quatro primeiras bandas (*griz*). Devido ao número pequeno, as medidas na banda Y não foram utilizadas.

Considerando a cadência observacional do DES, torna-se difícil obter a curva de rotação de todos os objetos. Como consequência, cores não são obtidas de forma confiável pela combinação direta de medições fotométricas por não ser possível garantir que as observações em bandas diferentes tenham sido feitas na mesma (ou quase na mesma) fase rotacional. Assim, para superar este problema, uma abordagem simples envolve a determinação da magnitude absoluta, a inclinação da fase solar e a consideração da amplitude de uma curva de luz rotacional desconhecida.

As exposições únicas da DECam são processadas pelo DES Data Management, em um conjunto conhecido como "Final Cut". A fotometria utilizada neste trabalho é a fotometria PSF resultante do SourceExtractor em exposições únicas, com calibração aprimorada

Tempo de Exposição (s)	Centauros				#medidas
	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	
	Mediana FWHM				
$t \leq 90$	1.16	1.01	0.93	0.87	432
$t > 90$	1.07	1.17	1.15	0.92	254

Tabela 4.1: Coluna 1: intervalo de tempo de exposição; colunas 2 a 5: FWHM mediana obtida de todas as observações com intervalos de tempo de exposição fornecidos pela coluna 1. Os FWHM foram determinados com o pacote astrométrico PRAIA (Assafin, 2023a); coluna 6: número de medições usadas na determinação do FWHM mediano.

sobre "First Cut". As exposições únicas são tipicamente de 90 s (levantamento de área ampla) para das bandas *griz* e de 45 s para a banda *Y*. Informações sobre o seeing típico, magnitude limite e o brilho do céu podem ser acessadas da tabela 1 do artigo com a segunda liberação de dados do DES (DR2 Abbott et al., 2021), bem como detalhes sobre a fotometria em exposições únicas. Além do levantamento de área ampla, de onde vem a maior parte de nossos dados, este trabalho também se beneficia de observações do programa de supernovas, em que são utilizados tempos de exposições mais longos (até 400 s). O impacto do trailing de tempos de exposições longas pode ser estimado medindo a largura meia altura (FWHM) de alvos em diferentes tempos de exposição, que pode ser observado nas tabelas 4.1 e 4.2. Nota-se que os valores de FWHM são semelhantes, independentemente do tempo de exposição. No entanto, o Centauro 2009 HH36 exigiu uma atenção especial. Este objeto tem um período orbital de 45,58 anos e combina o menor período orbital com o maior tempo de exposição ao longo de nossos objetos (Tabela 4.13). Algumas centenas de segundos de tempo de exposição para ele implicam em um trailing com tamanho comparável à escala de pixels DECam (0,263" por pixel, Abbott et al., 2021). Todos os outros objetos foram verificados e seus deslocamentos diferenciais em relação às estrelas representam apenas uma pequena fração do tamanho do pixel durante seus respectivos tempos de exposição em cada filtro.

Para evitar a perda de fluxo no caso do 2009 HH36, devido ao uso de fotometria PSF, foram usados resultados de medições de fluxo de abertura circular de 5,84 segundos de arco de diâmetro (MAG_APER_8, see Abbott et al., 2018). Esta abertura é grande o suficiente para conter o fluxo do objeto. Neste contexto, todas as imagens que contribuíram para uma medição da magnitude de 2009 HH36 foram inspecionadas visualmente para procurar a presença de fontes contaminantes e nenhuma foi encontrada.

A determinação da magnitude absoluta pode ser feita utilizando a equação 4.1 (Hughes, 2003).

$$H = m - 5 \log(R\Delta) + 2.5 \log \phi(\alpha), \quad (4.1)$$

em que m é a magnitude aparente na data da observação, R é a distância heliocêntrica

Tempo de Exposição (s)	TNOs				#medidas
	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	
	Mediana FWHM				
$t \leq 90$	1.10	0.98	0.91	0.90	7110
$90 < t \leq 300$	1.21	1.10	1.02	0.99	1844
$t > 300$	1.01	1.03	0.99	0.91	1607

Tabela 4.2: Coluna 1: intervalo de tempo de exposição; colunas 2 a 5: FWHM mediana obtida de todas as observações com intervalos de tempo de exposição fornecidos pela coluna 1. Os FWHM foram determinados com o pacote astrométrico PRAIA (Assafin, 2023a); coluna 6: número de medições usadas na determinação do FWHM mediano.

do objeto, Δ é a distância do observador ao objeto e $\phi(\alpha)$ é a função de fase, para $\alpha = 0^\circ$ (oposição), $\phi(0) = 1$. A magnitude absoluta (H) equivale a magnitude observada para $\alpha = 0^\circ$ e $R = \Delta = 1 AU$

Tal determinação também feita utilizando a aproximação da função de fase linear também descrita por Santos-Sanz et al. (2009), dada pela equação 4.2.

$$H_f + \alpha\beta_f = m_f - 5 \log(R\Delta) \quad (4.2)$$

em que m_f é a magnitude observada para uma dada banda f , α é o ângulo de fase, β_f é o inclinação de fase H_f é a magnitude absoluta em determinado filtro. O segundo membro da Eq. 4.2 ($m_f - 5 \log(R\Delta)$) é denominado magnitude reduzida (magnitude do objeto a distância de 1 AU do observador e do Sol para um determinado ângulo de fase). Os ângulos de fase e distâncias (heliocêntricas e do observador) são determinadas a partir das efemérides de pequenos corpos provenientes do JPL.

Preferimos pela utilização de uma função linear mais simples do que modelos mais complexos, como ajustes de curva de fase, como por exemplo, o modelo $H-G$ (Bowell et al., 1989), $H - G_1 - G_2$ (Muinonen et al., 2010) ou $H - G_{12}$ (Muinonen et al., 2010; Penttilä et al., 2016), que descrevem o comportamento da magnitude reduzida em função do ângulo de fase. A utilização de modelos lineares mais simples, para casos similares ao nosso, foi também a opção de autores como Ayala-Loera et al. (2018); Ofek (2012); Sheppard and Jewitt (2002).

Para obter valores para magnitudes absolutas e inclinações de fase, além de incertezas realistas para elas, os efeitos devido a uma rotação desconhecida devem ser levados em consideração. Neste contexto, adotamos um procedimento semelhante ao descrito em trabalhos como Ayala-Loera et al. (2018) e Pan et al. (2022). Uma breve descrição de tal procedimento é dada a seguir:

1. Para cada objeto, em determinada banda, foi determinada sua respectiva magnitude reduzida.

2. Para cada magnitude reduzida o valor da função $y = A \times \sin(\phi)$ é determinada para ϕ randomicamente tomado no intervalo de $[0 : 2\pi[$ com $A = 0,15$ (Duffard et al., 2009; Lacerda and Luu, 2006) e adicionado à magnitude reduzida (isto é, um deslocamento ao longo do eixo y). Adotamos portanto uma onda senoidal como modelo para o formato de uma curva de luz rotacional desconhecida para os objetos deste trabalho. Os valores mais frequentes em tal distribuição são claramente aqueles próximos ao máximo/mínimo da onda senoidal
3. Um valor aleatório do intervalo $[-\sigma; +\sigma]$ é adicionado ao anterior, em que σ é a incerteza da magnitude observada conforme fornecido pelo catálogo do DES.
4. As magnitudes absolutas H_f , os slopes β_f e suas incertezas são determinados por mínimos quadrados ponderados e propagação de erro.
5. as etapas (b) e (c) foram repetidas 20000 vezes.
6. Os valores finais H_f e β_f de cada objeto são determinados pela média dos 20000 valores. As incertezas finais das magnitudes absolutas e inclinações são dadas pelos desvios-padrão das respectivas 20000 medições.

O valor adotado de 0,3 mag para a amplitude da distribuição senoidal é um número conservador, baseado no valor típico (0,22 mag) das amplitudes de rotação de TNOs e Centauros listados em Sheppard et al. (2008). As magnitudes absolutas e as inclinações de fase determinadas não devem ser afetadas por esse procedimento sob a hipótese razoável de que a fase rotacional e a data de observação não são correlacionadas. Optamos por esse procedimento devido ao baixo número de observações, normalmente de 3 a 8 em cada banda disponível para a maioria dos TNOs e Centauros apresentados neste trabalho. Este procedimento mais simples fornece incertezas que tendem a ser maiores do que aquelas que teriam sido obtidas se tivéssemos adotado a distribuição de probabilidade. A confiabilidade das medições obtidas aqui e suas respectivas incertezas podem ser inferidas a partir dos resultados que encontramos e de comparações com a literatura.

Nós iniciamos este trabalho com um total de 217 TNOs e Centauros com magnitudes nas bandas *griz*. No entanto, é feita uma filtragem extra cujos intervalos, embora um tanto arbitrários, visam manter um grande número de objetos. De início, apenas objetos com magnitudes absolutas nas bandas g , r , i e z com 3 ou mais observações foram utilizados. Como primeiro ato, foram eliminados objetos onde qualquer das cores ($H_g - H_r$, $H_g - H_i$ ou $H_g - H_z$) estivesse fora do intervalo $[-2.5, +2.5]$ e cuja inclinação de fase em qualquer uma das quatro bandas estiveram fora do intervalo $[-0.5, +0.5]$. Essas inclinações de fase referem-se às inclinações da reta de fase solar por magnitude reduzida. Após a aplicação de tais restrições, restaram-se 144 objetos. O intervalo de cores é amplo e inclui 95% da amostra não filtrada, pois valores fora de seus limites não são comuns. O

intervalo de inclinação de fase é mais restritivo (representa 78% da amostra) e privilegia principalmente a inclusão de inclinações de fase negativas. Seu limite superior pode ser considerado grande o suficiente a partir de diferentes trabalhos na literatura (veja, por exemplo, [Ayala-Loera et al., 2018](#); [Dobson et al., 2023](#); [Ofek, 2012](#))

É difícil encontrar uma explicação física para inclinações negativas, mas elas correspondem, muito provavelmente, à amostragem insuficiente do perfil da curva de fase (veja [Dobson et al., 2023](#)). No entanto, permitir objetos com inclinações negativas em nossa amostra final é importante para não descartar aqueles cujas inclinações, embora negativas, sejam menores que as respectivas incertezas.

Uma próxima etapa foi a determinação dos índices de cor de TNOs e Centauros que são importantes para a exploração e avaliação da fotometria oriunda do DES. Esses índices são comumente obtidos por meio de observações próximas do tempo, possibilitando a obtenção da cor do objeto a partir de uma mesma (ou suficientemente próxima) face do corpo. Entretanto, conforme já mencionado, devido à cadência observacional do DES, isso não pode ser assegurado. Por este contexto pareceu-nos razoável obter cores a partir das magnitudes absolutas. Um cenário parecido também é descrito por [Schemel and Brown \(2021\)](#) que, apesar de uma diferente abordagem, também obtém as cores a partir das magnitudes absolutas, levando em consideração a ausência de informação rotacional.

4.1.1 Taxonomia de TNOs e Centauros

A determinação dos índices de cor possibilita a segregação dos objetos em classes taxonômicas. Como já mencionado no capítulo 2, quando falamos de taxonomia, destacamos que ela por si só não é suficiente para fornecer informações significativas sobre as propriedades mineralógicas das superfícies dos objetos individualmente. No entanto, ela é útil para inferir sobre distribuição geral de composições em diferentes classes dinâmicas, conforme detalhado por [Barucci et al. \(2008\)](#); [Carvano et al. \(2010\)](#). Neste contexto, as cores dos TNOs e Centauros desempenham um papel importante na obtenção de informações sobre as propriedades da superfície e/ou diferentes processos físicos que afetam a evolução desses corpos primitivos. Neste trabalho optamos pela utilização do esquema taxonômico proposto por [Barucci et al. \(2005\)](#) que classifica TNOs e Centauros em quatro classes (*BB*, *BR*, *IR* e *RR*) com cores que vão desde neutra até a mais avermelhada com relação ao Sol.

[Barucci et al. \(2005\)](#) e [Fulchignoni et al. \(2008\)](#) apresentam um esquema taxonômico para discriminar grupos de TNOs e Centauros com base na fotometria nos filtros BVRIJ. Assim, para quatro cores ($B - V$, $V - R$, $V - I$ e $V - J$), uma mesma técnica de análise estatística para classificar população de asteroides é aplicada para uma amostra de TNOs e Centauros: análise G-mode ([Barucci et al., 1987](#)) e análise de componentes principais ([Tholen, 1984](#)). Os componentes principais, conforme descrito por [Barucci et al. \(2005\)](#),

são combinações lineares das variáveis originais, onde os coeficientes representam a importância relativa de uma variável dentro de um componente principal. Esses coeficientes são os autovetores da matriz de variância-covariância das variáveis. A soma dos autovalores dessa matriz é responsável pela variância total da amostra. Cada autovalor reflete a porcentagem contribuída por cada componente principal para a variância total.

Assim, para segregar de objetos em quatro classes taxonômicas, seguindo [Barucci et al. \(2005\)](#) e [Fulchignoni et al. \(2008\)](#), requer um algoritmo de agrupamento. Para este trabalho, utilizamos um procedimento no pacote R ([R Core Team, 2021](#)), o algoritmo *PAM* - Partition Around Medoids ([Kaufman and Rousseeuw, 2009](#)) para o agrupamento dos TNOs e Centauros de nossa amostra a partir dos índices de cor. As incertezas nas cores não foram usadas e a eliminação de outliers para determinar os limites dos clusters foi feita iterativamente, conforme será detalhado mais adiante.

4.1.2 Partition Around Medoids (*PAM*) como ferramenta para classificação taxonômica

O algoritmo *PAM* determina o agrupamento através do conceito de dissimilaridade. A dissimilaridade é um conceito chave quando se quer formar grupos desses elementos de forma que cada grupo possa representar um aspecto comum de seus elementos. Para a determinação do agrupamento é dado um conjunto de dados observacionais e um número k , que informa o número de agrupamentos a serem formados. Tal conjunto de dados é comumente apresentado por uma matriz em que as linhas correspondem aos objetos e as colunas correspondem às variáveis. *PAM* visa encontrar k medoides nele. Medoides são objetos representativos de cada cluster de tal forma que a soma das distâncias dadas por uma métrica previamente escolhida, para todos os objetos no cluster, é mínima, isto é, se qualquer um dos medoides for substituído por outro objeto da amostra, então a soma mínima de distâncias é violada. Destacamos que medóides são elementos pertencentes ao conjunto de dados, em oposição a centróides que não necessariamente pertencem ao conjunto estudado.

Aqui, é importante destacar que este trabalho não tem a intenção de definir uma nova taxonomia, mas sim apresentar uma classificação para TNOs e Centauros que seja coerente com a já existente na literatura. Como consequência, definimos $k = 4$. Como verificação de consistência, a determinação do valor ótimo de k com o auxílio do método *PAM*, utilizando 3 cores - ($V - R$, $V - I$ e $V - J$) - (o mesmo número de cores que temos neste trabalho), a partir de um conjunto de 67 objetos em [Fulchignoni et al. \(2008\)](#), resultou em $k = 4$ (veja Fig. 4.1). Vale enfatizar que o G-mode (ver [Fulchignoni et al., 2000](#)) é o procedimento numérico utilizado para segregar TNOs e Centauros em grupos utilizado em trabalhos como [Barucci et al. \(2005\)](#); [Fulchignoni et al. \(2008\)](#); [Perna et al. \(2010\)](#). *PAM*, no entanto, nos permite produzir gráficos úteis a partir do pacote estatístico R ([R Core](#)

Team, 2021). Além disso, é esperado que a descrição das características físicas gerais das superfícies de pequenos corpos seja fortemente dependente de suas características intrínsecas (como cores) e não do algoritmo para agrupá-los.

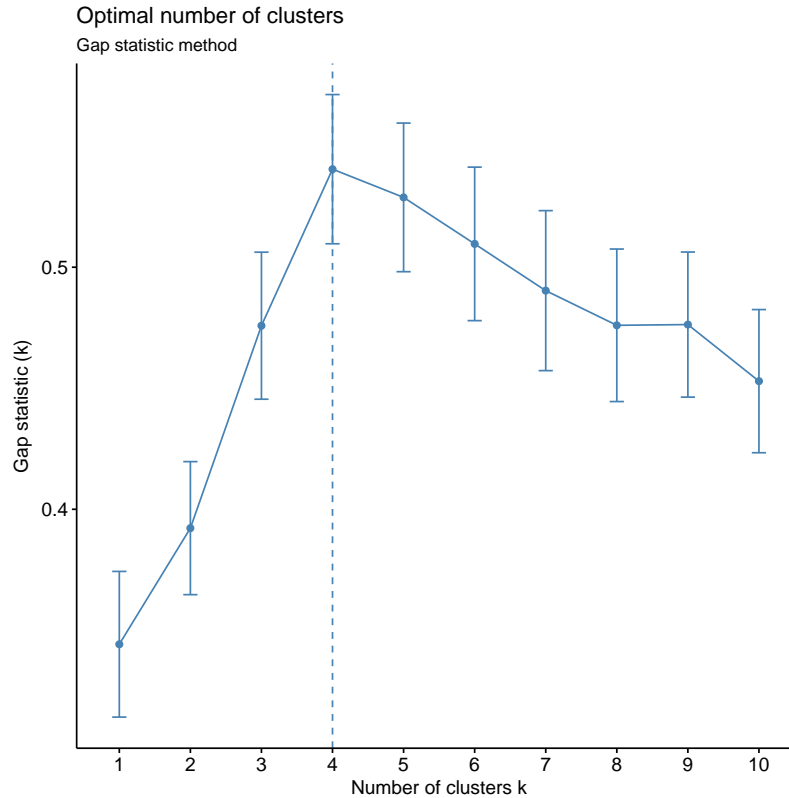


Figura 4.1: Número de cluster retornado por *PAM* para um conjunto de três cores em Fulchignoni et al. (2008).

Neste contexto, para todos os TNOs e Centauros deste trabalho para os quais ao menos 3 cores a partir de magnitudes absolutas - $Hg - Hr$, $Hg - Hi$ e $Hg - Hz$ - foram obtidas, buscamos associar uma classificação taxonômica. Conforme já mencionado (seção 4.1), nós iniciamos com 217 TNOs e Centauros. Após uma filtragem, considerando um número mínimo de medidas utilizadas para obtenção das magnitudes absolutas bem como um intervalo para os valores das cores oriundas dessas magnitudes e das inclinações de fase, restaram-se 144 objetos. Cores e inclinações de fase possuem valores médios diferentes em diferentes classes taxonômicas. Sendo assim, a filtragem com base simplesmente na média e no desvio padrão do conjunto completo pode levar a eliminações sistemáticas dos representantes de borda em classes extremas (mais azuis e mais vermelhas).

Para este conjunto de objetos *PAM* nos entregou, como imposto, a segregação em 4 grupos. Uma vez definidos os membros de cada grupo, calculamos um espectro de refletância de baixa resolução para cada objeto, normalizado na banda g utilizando a equação 4.3 (Doressoundiram et al., 2008).

	g	r	i	z
λ_c (nm)	475	635	775	925
Sol (mag.)	-26.5071	-26.9587	-27.0478	-27.0542

Tabela 4.3: Comprimento de onda central³ (nanometro) e magnitude solar⁴ adotado para cada filtro do DES.

$$\overline{E}_f = 10^{-0.4[(H_f - H_g) - (m_{f\odot} - m_{g\odot})]} \quad (4.3)$$

, em que H_f e $m_{f\odot}$ são a magnitude absoluta do alvo e magnitude aparente do Sol no mesmo filtro, respectivamente. O espectro de reflectância médio é então determinado para cada grupo e usado para associar a cada classe taxonômica segundo Barucci et al. (2005). A tabela 4.3 apresenta os comprimentos de onda para os filtros do DES e as respectivas magnitudes do Sol.

Foi feita uma eliminação de reflectâncias (e, conseqüentemente, de objetos), no nível 2σ em cada grupo para cada comprimento de onda. O agrupamento é então recalculado e os grupos, reorganizados. Este processo foi repetido até que não houvesse mais alterações nos grupos. Assim, 94 objetos permaneceram no final do procedimento iterativo. O rigor no processo de eliminação nos permite ser confiáveis na caracterização de cada grupo. A Figura 4.2 mostra os clusters e a numeração apresentada referem-se aos mesmos objetos que se encontram na tabela 4.13. Os componentes principais são usados apenas como uma ferramenta para ajudar na visualização dos clusters.

Os espectros de reflectância médios para cada classe é representado na figura 4.3. Com os limites de cores em cada classe taxonômica conforme apresentado pela tabela 4.4, foi possível segregarmos posteriormente nos clusters já preenchidos os 50 objetos que não sobreviveram ao processo de eliminação. Assim, obtivemos a classificação de 144 TNOS e Centauros que estão apresentados na tabela 4.13. Foi verificado na literatura possíveis objetos que já possuíam classificação taxonômica e até onde foi possível verificar, a maioria dos objetos apresentados estão sendo classificados pela primeira vez segundo o esquema taxonômico de Barucci et al. (2005). A tabela 4.13 apresentam os objetos para os quais foi encontrada uma classificação e pode-se observar que os resultados aqui obtidos são coerentes com os apresentados pela literatura.

4.1.3 Cores dos Objetos

Conforme mencionado (seção 4.1), a partir da obtenção das magnitudes absolutas dos objetos, utilizamos 3 cores das quais foi possível obter uma classificação taxonômica. A

¹<https://noirlab.edu/science/programs/ctio/filters/Dark-Energy-Camera>

²<https://cdcv.s.fnal.gov/redmine/projects/descalibration/wiki>

³<https://noirlab.edu/science/programs/ctio/filters/Dark-Energy-Camera>

⁴<https://cdcv.s.fnal.gov/redmine/projects/descalibration/wiki>

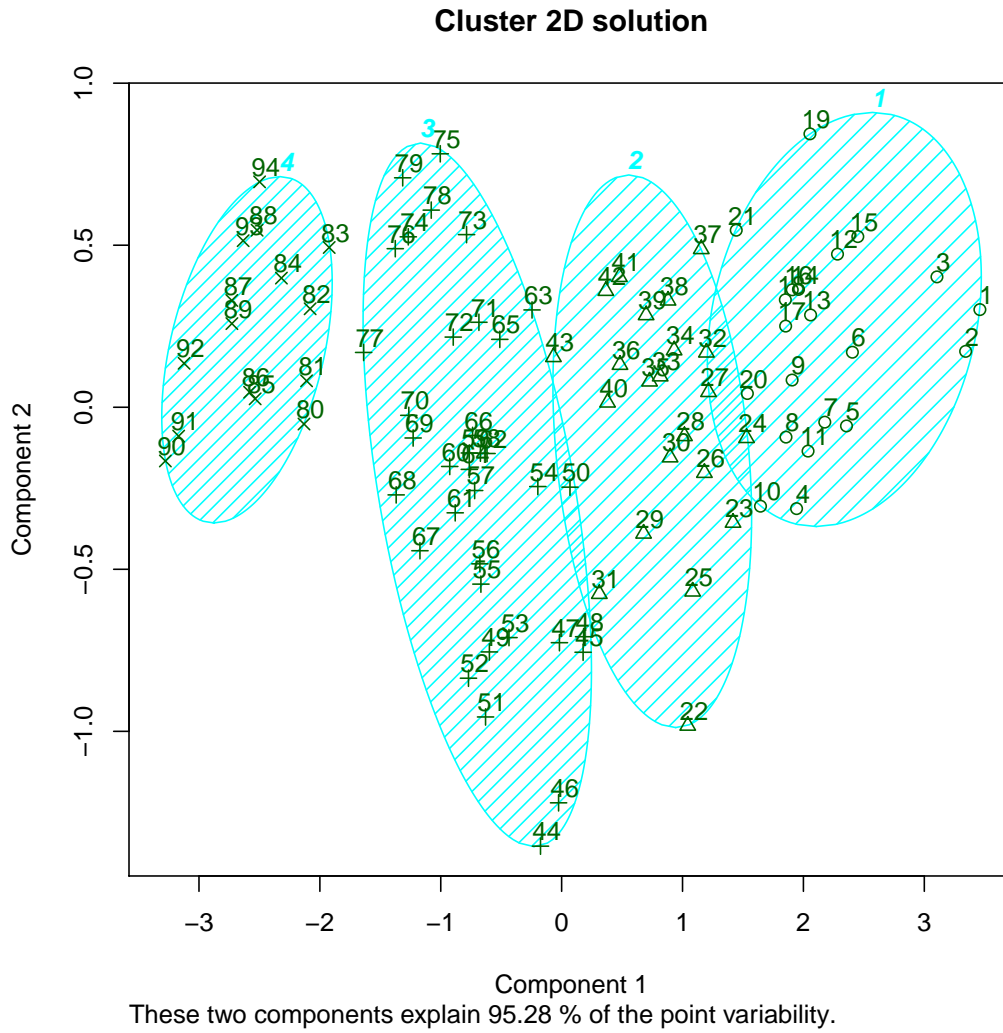


Figura 4.2: Clusters obtidos com *PAM*. Os eixos nos componentes principais são apenas uma maneira de apresentar graficamente os clusters e não participam de sua determinação.

figura 4.4 apresenta o diagrama cor-cor e a curva de avermelhamento, definido como o avermelhamento por 100 nm, em porcentagem, conforme dado pela equação. 4.4.

$$S(\lambda_1, \lambda_2) = 10^4 \times \frac{\overline{E}_{f_2} - \overline{E}_{f_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (4.4)$$

em que λ_1 e λ_2 são dados em nanômetros, ($\lambda_2 > \lambda_1$) e $\overline{E}_{f_{1,2}}$ são dados pela equação 4.3.

Pode-se notar na figura 4.4 que os espectros de reflectância das classes taxonômicas têm um comportamento aproximadamente linear através dos comprimentos de onda medidos. Na figura 4.5 nota-se que as classes *BB*, *BR* e *IR* têm transições suaves da parte superior da curva de avermelhamento em comparação ao conjunto completo de dados, enquanto a classe mais avermelhada (*RR*) se desloca mais abruptamente para o lado direito da curva. Tal comportamento também é comparável ao encontrado por [Markwardt et al. \(2023\)](#) que

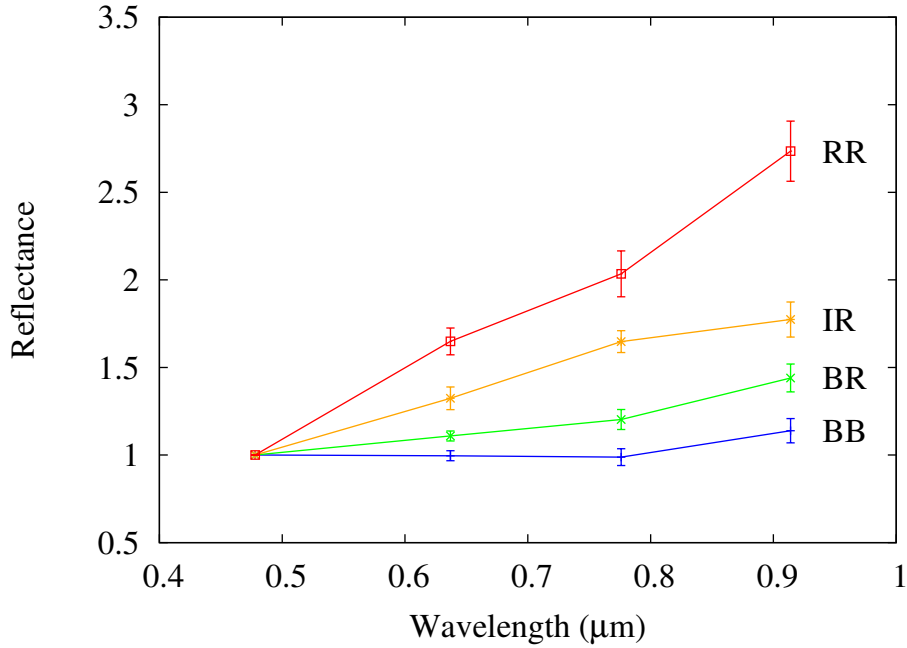


Figura 4.3: Reflectância média para cada classe taxonômica. o número de objetos definidores para cada classe é 18 (*BB*), 19 (*BR*), 29 (*IR*) e 20 (*RR*). As barras de erro têm comprimento de 1σ .

	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$
<i>BB</i>	0.45(± 0.07)	0.5(± 0.1)	0.7(± 0.2)
<i>BR</i>	0.57(± 0.08)	0.8(± 0.1)	0.9(± 0.1)
<i>IR</i>	0.7(± 0.1)	1.0(± 0.1)	1.2(± 0.1)
<i>RR</i>	0.99(± 0.05)	1.2(± 0.1)	1.54(± 0.08)

Tabela 4.4: Cores médias e desvio padrão para cada classe taxonômica.

verificou as variações de cores para Troianos de Netuno. Em sua amostra, verifica-se que a inclinação espectral de seu objeto mais avermelhado (2013 VX30) para comprimentos de onda menores que $1 \mu m$ se destaca quando comparado aos demais (veja figura 4.6).

4.1.4 Inclinações de fase

Conforme já mencionado as inclinações de fase referem-se às inclinações da reta de fase solar em função da magnitude reduzida. A média das inclinações de fase para cada classe taxonômica está representadas nas tabelas 4.6 e 4.7; e os valores para todos os TNOs e Centauros utilizados neste trabalho são apresentados na tabela 4.13.

Nota-se que as inclinações na banda g se tornam menos íngremes dos objetos azuis para os mais vermelhos, concordando com as correlações relatadas por Dobson et al. (2023) entre inclinação e cor. Os dados de Alvarez-Candal et al. (2019) mostram curvas de fase mais íngremes na banda R para os objetos mais vermelhos e que os objetos mais azuis

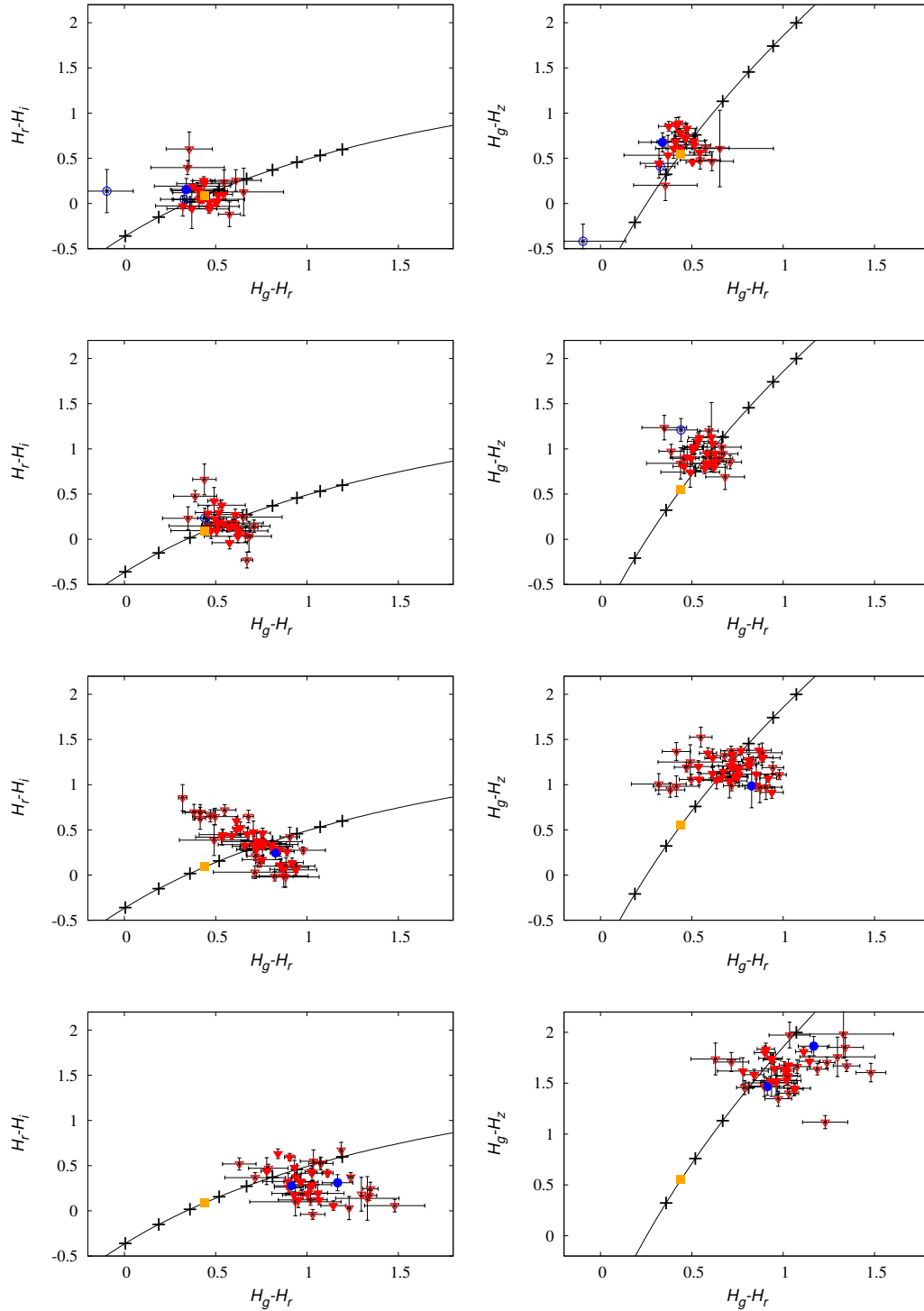


Figura 4.4: Coluna esquerda: $(H_g - H_r) \times (H_r - H_i)$ plota os 144 objetos classificados apresentados na tabela 4.13. Os símbolos preenchidos são os 94 definidores. Os símbolos vazios representam os 50 objetos restantes. Os triângulos representam KBOs e círculos representam Centauros. A curva de avermelhamento mostra a localização de objetos com espectro de refletividade linear. O quadrado sólido na linha avermelhada indica a localização das cores solares. Da linha superior para a inferior dos gráficos, da esquerda para a direita: os grupos *BB*, *BR*, *IR* e *RR* são representados. As marcas na linha de avermelhamento variam de -02% até 22% por 100 nm. Uma marca é mostrada a cada 4 unidades. Coluna da direita: O mesmo que a da esquerda para as cores $(H_g - H_r) \times (H_g - H_z)$. As barras de erro têm comprimento de 1σ .

	Reflectância		
	banda r	banda i	banda z
BB	1.01(± 0.07)	0.98(± 0.09)	1.1(± 0.2)
BR	1.13(± 0.09)	1.2(± 0.1)	1.4(± 0.1)
IR	1.3(± 0.1)	1.6(± 0.1)	1.8(± 0.2)
RR	1.66(± 0.08)	1.9(± 0.2)	2.5(± 0.2)

Tabela 4.5: Reflectâncias médias e desvios padrão em cada classe e cada filtro. A reflectância é normalizada para 1 na banda g .

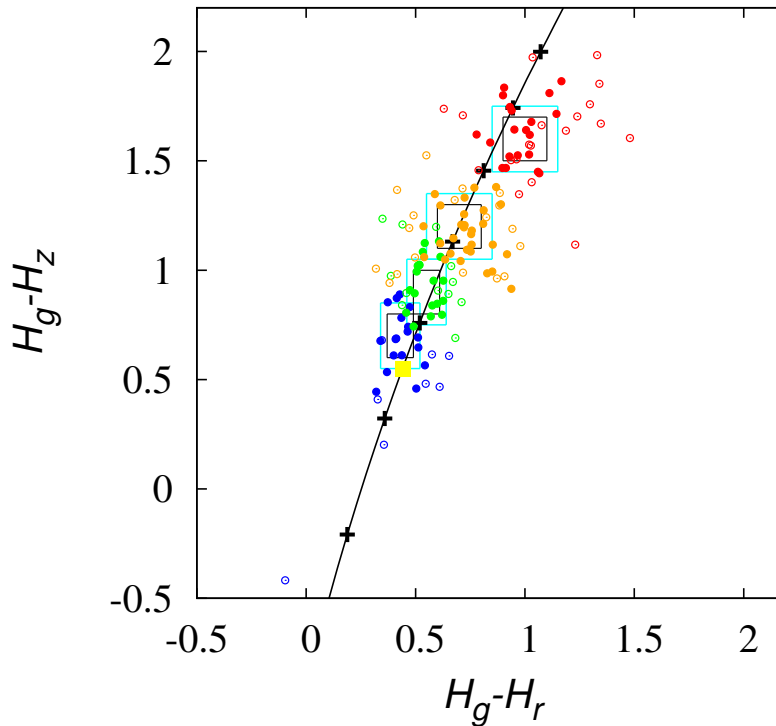


Figura 4.5: Diagrama cor-cor com a distribuição das classes taxonômicas: BB (azul), BR (verde), IR (laranja) e RR (vermelho). Os círculos sólidos representam os objetos definidores (primeiros 94 objetos apresentados na tabela 4.13). A curva de avermelhamento mostra a localização dos objetos com o espectro de refletividade linear. As marcações na linha de avermelhamento vão de -02% até 22% por 100nm. As caixas indicam a localização de cada classe, a linha preta representa o comprimento de 2σ e a ciano o comprimento de 3σ .

têm curvas de fase mais íngremes na banda V . Os valores mostrados nas Tabelas 4.6 e 4.7 (coluna BB) concordam com os resultados para o filtro V e não estão em contradição com aqueles para o filtro R se nossas medições da banda z (coluna RR) forem consideradas.

Na busca por possíveis correlações entre cores e inclinações, verificamos uma correlação fraca para uma combinação específica de bandas, conforme indicada pela figura 4.7. Combinações de cor/inclinação diferentes daquelas mostradas pela figura 4.7 foram investiga-

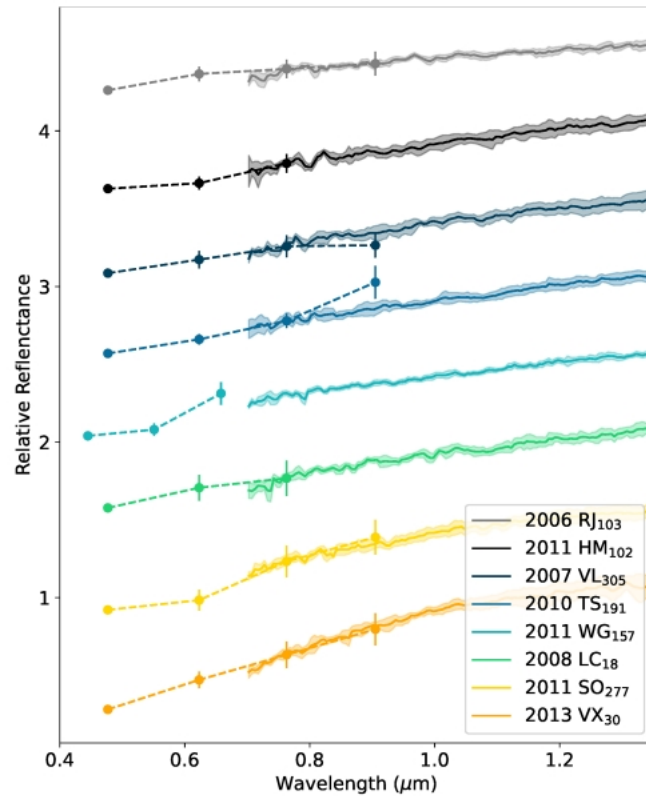


Figura 4.6: Os espectros conjuntos de fotometria óptica e NIRSpec dos troianos de Netuno apresentado por [Markwardt et al. \(2025\)](#). Cada cor do gráfico corresponde a um troiano diferente, enquanto os marcadores circulares correspondem aos comprimentos de onda centrais de diferentes bandas ópticas (de comprimento de onda curto a longo: g, r, i, z ou B, V, R para o 2011 WG₁₅₇). As barras de erro e as regiões sombreadas representam as incertezas de 1σ nos espectros de fotometria óptica e NIR, respectivamente.

das e nenhuma correlação foi encontrada.

4.1.5 Cores e Parâmetros Orbitais

Conforme mencionado no capítulo 2 desta tese, desde primeira verificação na existência de diferentes cores de pequenos corpos do Sistema Solar exterior, há a busca por possíveis correlações entre as propriedades dinâmicas, orbitais e as cores superficiais desses objetos. Neste trabalho, classificam-se 144 TNOs e Centauros em quatro classes (*BB*, *BR*, *IR* e *RR*) segundo o esquema taxonômico apresentado por [Barucci et al. \(2005\)](#). Assim, em nossa amostra também buscamos por possíveis correlações envolvendo cores e parâmetros orbitais. Na figura 4.8 verifica-se a distribuição das classes taxonômicas por classe dinâmica. Vale mencionar que essa distribuição representa uma característica de nossos dados observacionais com vieses de amostragem desconhecidos, e não um cenário físico real. Pode-se destacar que a população de objetos clássicos frios (Cold Clássicos) pertencem majoritariamente às classes mais avermelhada (*IR* e *RR*), exceção feita ao

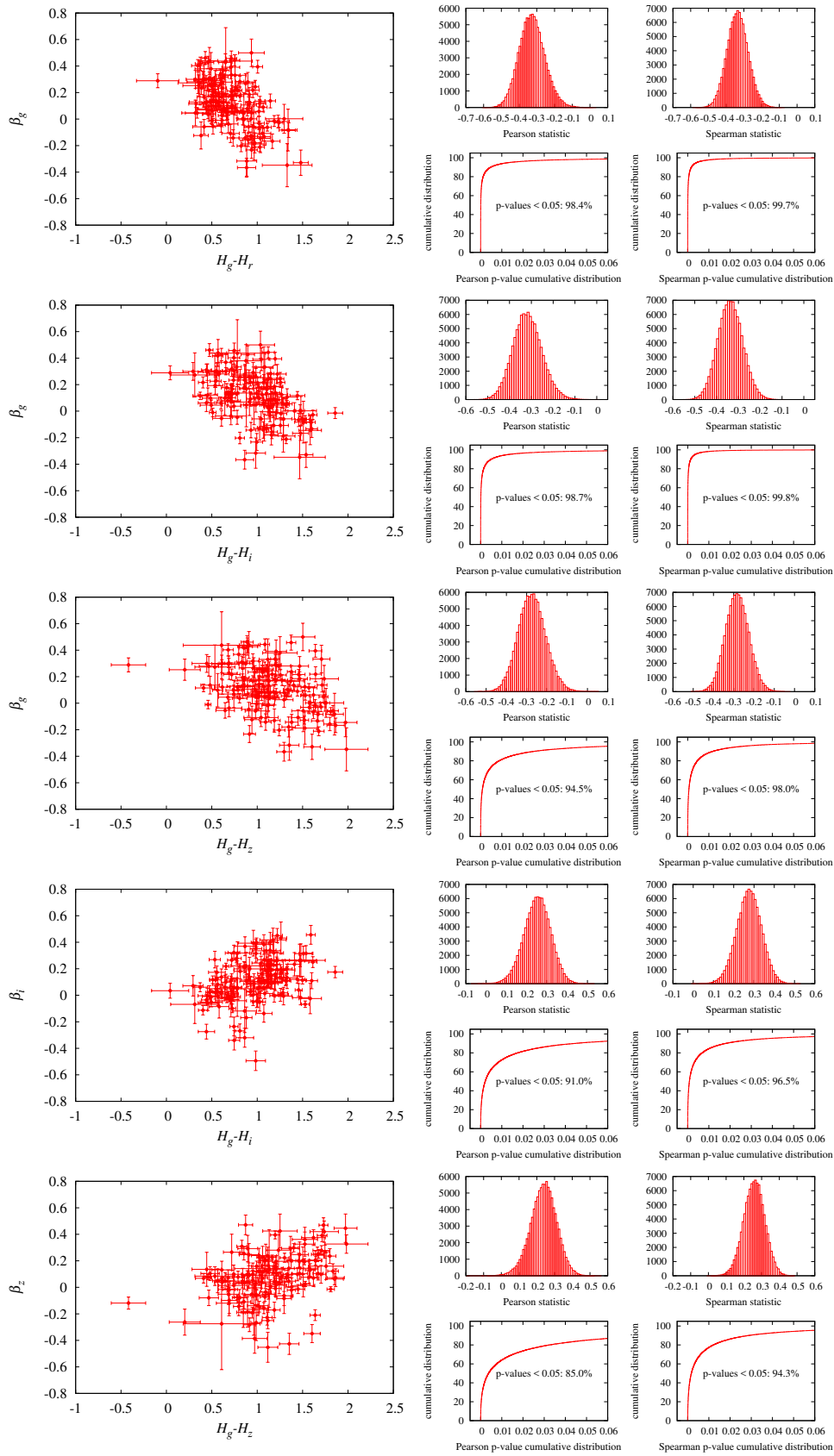


Figura 4.7: Cor \times inclinações de fase na banda g , r , i e z para todos os objetos apresentados na tabela 4.13. Estatística de Spearman e de Pearson juntamente com os respectivos valores p na coluna da direita foram obtidos por reamostragem dos pontos na coluna da esquerda 100.000 vezes. Cada ponto é reamostrado nas direções de cor e inclinação seguindo uma distribuição gaussiana com média dada pelos valores de cor/inclinação de fase do ponto e respectivos desvios padrões em cada coordenada. As barras de erro têm comprimento de 1σ

Inclinações de fase - Objetos definidores				
Band	<i>BB</i>	<i>BR</i>	<i>IR</i>	<i>RR</i>
<i>g</i>	0.23 ± 0.03 (0.14)	0.19 ± 0.03 (0.13)	0.10 ± 0.03 (0.18)	0.07 ± 0.05 (0.21)
<i>r</i>	0.16 ± 0.02 (0.11)	0.12 ± 0.03 (0.13)	0.11 ± 0.02 (0.13)	0.16 ± 0.03 (0.12)
<i>i</i>	0.04 ± 0.02 (0.10)	0.08 ± 0.02 (0.11)	0.12 ± 0.03 (0.19)	0.09 ± 0.03 (0.11)
<i>z</i>	0.10 ± 0.03 (0.14)	0.02 ± 0.03 (0.15)	0.04 ± 0.03 (0.17)	0.14 ± 0.03 (0.10)

Tabela 4.6: Valores médios das inclinações de fase, desvios padrão das médias e desvios padrão das medidas (em parêntesis) para cada classe taxonômica e considerando apenas os objetos definidores de classe.

Inclinações de fase - Todos os objetos				
Band	<i>BB</i>	<i>BR</i>	<i>IR</i>	<i>RR</i>
<i>g</i>	0.23 ± 0.03 (0.13)	0.17 ± 0.02 (0.14)	0.10 ± 0.03 (0.19)	0.01 ± 0.03 (0.18)
<i>r</i>	0.15 ± 0.02 (0.10)	0.10 ± 0.02 (0.14)	0.11 ± 0.02 (0.15)	0.14 ± 0.02 (0.15)
<i>i</i>	0.06 ± 0.03 (0.14)	0.08 ± 0.02 (0.14)	0.11 ± 0.03 (0.20)	0.16 ± 0.02 (0.15)
<i>z</i>	0.07 ± 0.03 (0.15)	0.01 ± 0.03 (0.15)	0.03 ± 0.03 (0.19)	0.17 ± 0.03 (0.18)

Tabela 4.7: Média dos valores das inclinações de fase, desvios padrão das médias e desvios padrão das medidas (entre parêntesis) para cada classe taxonômica considerando todos os objetos.

TNO 2014 NB66. Os poucos centauros presentes em nossa amostra são dominados por duas classes (*BB* e *RR*), mostrando uma bimodalidade desse grupo. A classe *IR* é mais frequente no grupo dos ressonantes, concordando com resultados apresentados por [Fulchignoni et al. \(2008\)](#) e [Perna et al. \(2010\)](#). Nota-se também que o grupo dos SDOs são dominados pelas classes mais vermelhas (*IR* e *RR*). Tal resultado está em desacordo com aqueles apresentados por [Ali-Dib et al. \(2021\)](#), que encontraram uma escassez de objetos mais vermelhos (Very Red) no disco disperso.

Um gráfico da excentricidade por semieixo maior é dado pela figura 4.9. Levando em conta o intervalo (13 - 75 UA) no semieixo maior, no qual a maioria dos objetos está localizada, não encontramos correlação entre as classes taxonômicas e a distância heliocêntrica. É possível observar, no entanto, que os poucos objetos com $a < 20$ UA tendem a ser azuis (*BB*).

Na figura 4.10 plotamos excentricidade em função da cor para três conjuntos de objetos: (i) *BB* e *RR* definidores, (ii) *BB* e *RR* definidores e não definidores, e (iii) definidores e não definidores *BB + BR* e definidores e não definidores *IR + RR* (considerando duas classes apenas). [Ali-Dib et al. \(2021\)](#) apresentaram que seus objetos mais vermelhos são fortemente limitados a $e < 0,42$, então para fins de nossa análise, o adotamos o mesmo limite.

Nota-se, para o gráfico mais a esquerda e central da figura 4.10, que 80%-81% da população mais azul tem $e < 0.42$, enquanto 90%-92% da população mais avermelhada

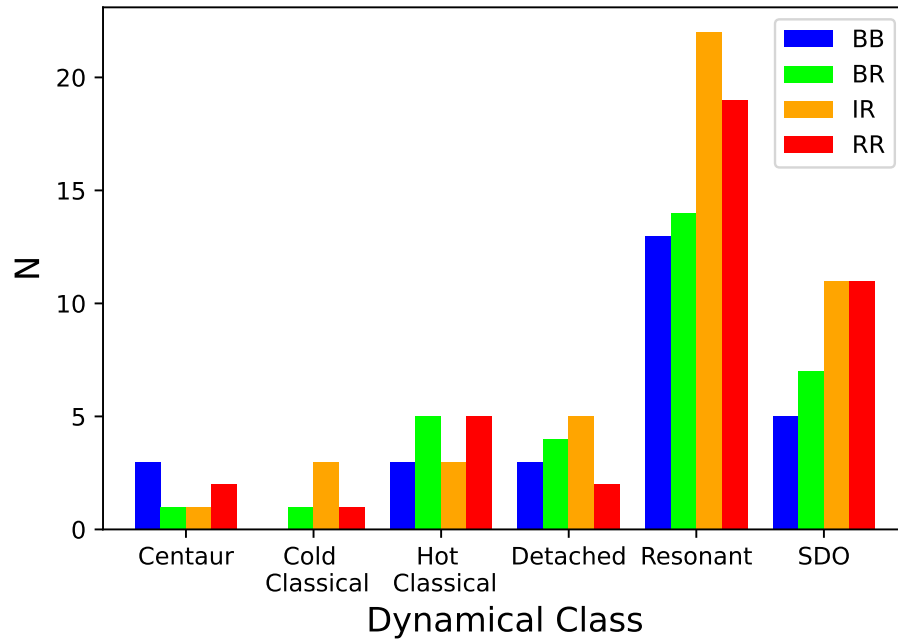


Figura 4.8: Distribuição das classes taxonômicas por classe dinâmica

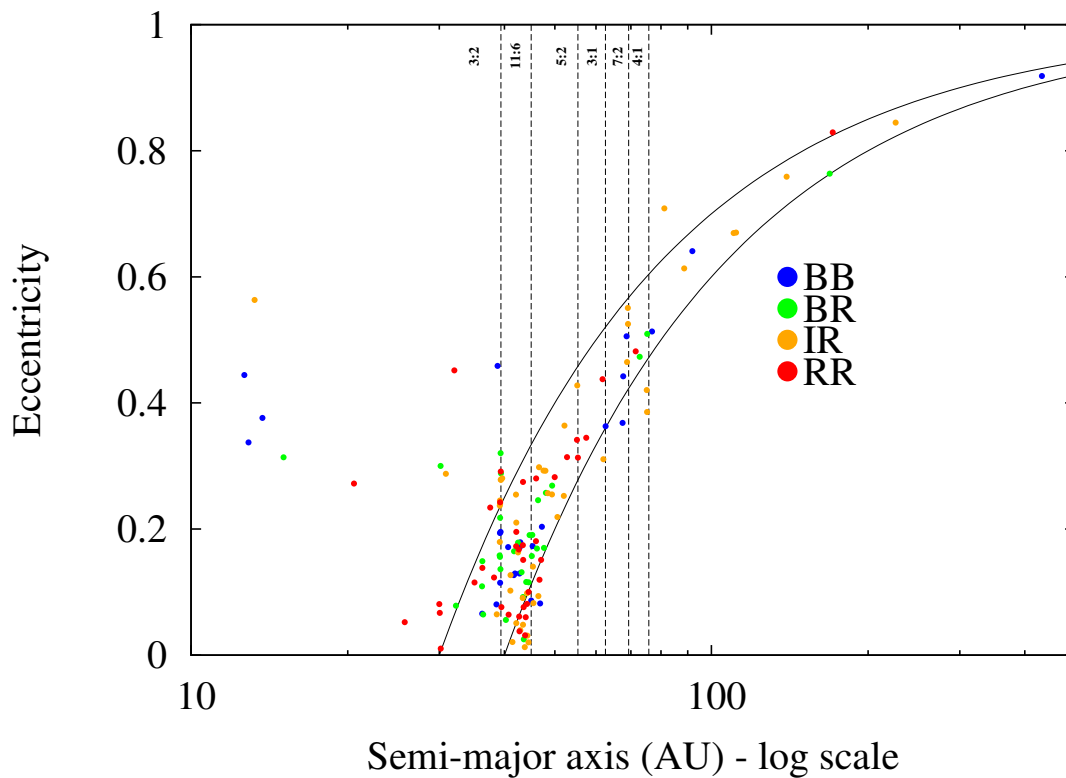


Figura 4.9: Excentricidade em função do semieixo maior para os 144 objetos classificados apresentados pela tabela 4.13. As linhas tracejadas representam ressonâncias com Netuno. A linha contínua representa periélio (q) entre 30 e 40 AU.

tem excentricidade abaixo deste limite. A mesma fração para objeto azuis e vermelhos são encontrado para $e < 0.42$ no gráfico mais a direita. Interpretamos estes resultados como em concordância com os de [Ali-Dib et al. \(2021\)](#) quando as classes mais extremas (BB e RR) são consideradas, embora seja difícil tomar um valor limite para e a partir dos nossos próprios dados. Por outro lado, não há limitação evidente quando duas classes são formadas por $BB + BR$ (azul) e $IR + RR$ (vermelho).

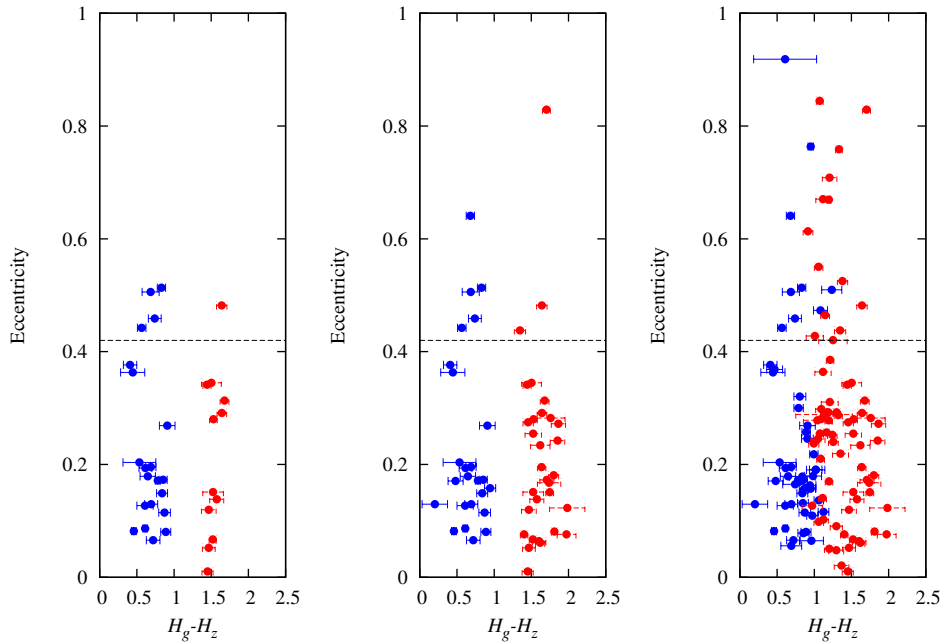


Figura 4.10: Cor \times excentricidade para os objetos selecionados ($i > 5^\circ$ e também $T_j > 3$ quando Centauros são considerados). Esquerda: BB (azul) e RR (vermelho) definidores. Centro: BB e RR , definidores e não definidores. Direita: $BB + BR$ (azul) and $IR + RR$ (vermelho), definidores e não definidores. Linha tracejada em $e = 0.42$ (veja [Ali-Dib et al., 2021](#)).

Quando analisamos cor \times inclinação, considerando os mesmos grupos de objetos, nota-se que 33%-39% os objetos azuis tem $i < 21^\circ$, enquanto 58%-64% dos objetos vermelhos têm inclinações abaixo deste limite (adotado por [Ali-Dib et al., 2021](#); [Marsset et al., 2019](#)). É interessante notar que estes resultados se reproduzem para os três gráficos presentes na figura 4.11.

Vale ressaltar que nós não podemos inferir limites de confinamento fortes em excentricidade e/ou inclinação conforme feito por [Marsset et al. \(2019\)](#) e [Ali-Dib et al. \(2021\)](#). Entretanto, podemos dizer que a fração de objetos vermelhos em nossos dados confinados na região ($e < 0.42$, $i < 21^\circ$) é claramente maior quando comparada aos objetos mais azuis (com a excessão mencionada quando consideramos apenas duas classes para excentricidade).

Conforme já mencionado, a busca por possíveis correlações entre classes dinâmicas,

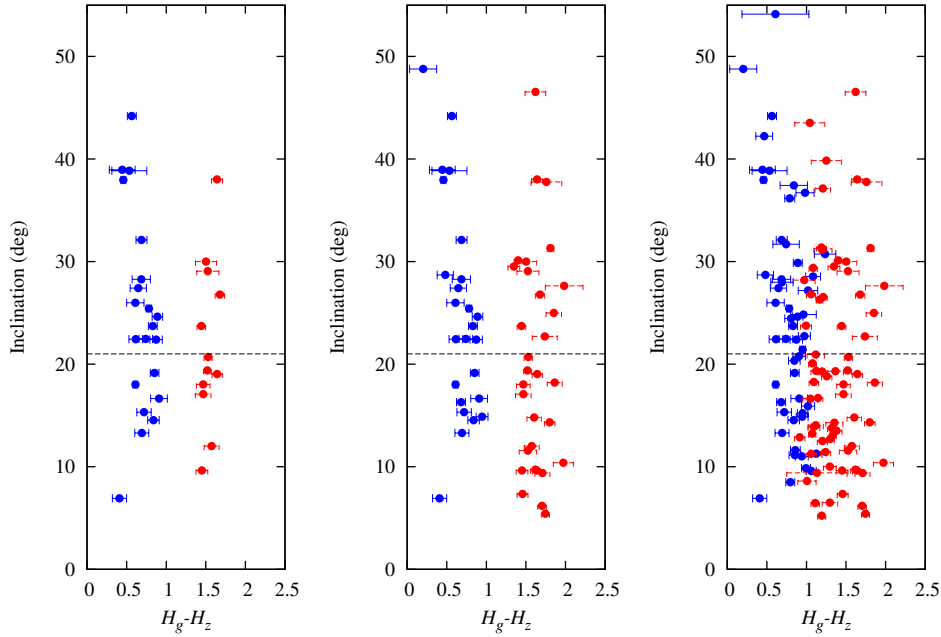


Figura 4.11: Cor \times Inclinação para os objetos selecionados ($i > 5^\circ$ e também $T_j > 3$ quando Centauros são considerados). Esquerda: BB (azul) e RR (vermelho) definidores. Centro: BB e RR , definidores e não definidores. Direita: $BB + BR$ (azul) and $IR + RR$ (vermelho), definidores e não definidores. Linha tracejada em $i = 21^\circ$ (veja Ali-Dib et al., 2021; Marsset et al., 2019).

parâmetros orbitais e cores têm sido apresentada por diferentes trabalhos. Resultados comparáveis encontrados neste trabalho para excentricidade são apresentados por por Ali-Dib et al. (2021), onde nota-se que os TNOs mais vermelhos são fortemente limitados a excentricidades menores que $\sim 0,42$. Uma explicação plausível é que objetos mais dinamicamente excitados tendem a ser mais azuis devido a eventos de colisão e renovação de superfície, enquanto os mais vermelhos têm superfícies afetadas principalmente pelo intemperismo espacial (Doressoundiram et al., 2008; Hainaut et al., 2012; Hainaut and Delsanti, 2002). Outra hipótese é que KBOs com cores neutras se formaram nas partes internas do disco primordial e foram então espalhados no Cinturão de Kuiper (Brown et al., 2011). Além disso, os mesmos autores também propõem que objetos que se formaram no local atual dos Clássicos Frios podem ter retido exclusivamente NH_3 , o que plausivelmente levou às suas cores.

Correlação entre cor e inclinação para o grupo dos TNOs clássicos é apresentada por Tegler and Romanishin (2000), Trujillo and Brown (2002) e Peixinho et al. (2015). Entretanto, para os 21 TNOs clássicos contidos nesse trabalho essa correlação não é clara. Evidências fracas de correlação também são apontadas por Alvarez-Candal et al. (2019).

Foi feita também uma busca por possíveis correlações entre cores e classes dinâmicas. Aplicando os testes de Pearson e Spearman, a classe dos objetos ressonantes foi a única

	Cor \times excentricidade			
	K-S			A-D
	D-	D+	p-value	p-value
Definidoras BB e RR	0.26	0.18	0.54	0.33
Todos os BB e RR	0.19	0.13	0.64	0.40
BB+BR e IR+RR	0.08	0.28	0.01	0.11

Tabela 4.8: Coluna 1. Seleção de objetos seguindo, da primeira à terceira linha, a mesma seleção apresenta na Fig. 4.10, da esquerda para a direita; coluna 2: $\text{MAX}(Fn_1(x) - Fn_2(x)) > 0$, onde Fn_1 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo azul (BB, BBBR) e Fn_2 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo vermelho (RR, IRRR); coluna 3: $\text{MAX}(Fn_2(x) - Fn_1(x)) > 0$, onde Fn_1 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo azul (BB, BB+BR) e Fn_2 é a distribuição cumulativa normalizada do grupo vermelho (RR, IR+RR); coluna 4: medida de significância para rejeição da hipótese nula (i.e., ambas as amostras são provenientes da mesma distribuição) no teste K-S para duas amostras; coluna 5: medida de significância para rejeição da hipótese nula (i.e., ambas as amostras são provenientes da mesma distribuição) no teste A-D para duas amostras.

que apresentou correlação, fraca mas presente, conforme pode ser verificado na figura 4.14. Vale ressaltar que tal correlação é encontrada devido aos ressonantes *BB*. Foi verificado também possível correlação cor-inclinação para três subgrupos dos ressonantes: (i) excluindo os ressonantes 7:4; (ii) excluindo os de baixa inclinação ($i < 5^\circ$); e (iii) excluindo os de baixa inclinação e baixa excentricidade ($e < 0.09$). Em todos os casos, obteve-se uma clara correlação fraca, presente devido ao grupo dos ressonantes *BB*.

4.1.6 Testes estatísticos

Uma outra abordagem, complementar àquela apresentada com auxílio das Figs. 4.11 e 4.10, pode ser obtida através de alguns testes estatísticos, como Kolmogorov-Sirmonov (K-S: Conover, 1971) e Anderson-Darling (A-D: Anderson and Darling, 1954; Scholz and Stephens, 1987).

Essa complementaridade dá-se pelo fato de que a análise anterior efetuou uma simples comparação da distribuição das populações de espectros de reflectância mais neutros e mais avermelhados em relação ao do Sol com respeito a valores de inclinação e excentricidade específicos, enquanto que os testes propostos não levam em conta tais valores. Esses testes, K-S e A-D aplicados para duas amostras, foram utilizados dentro do pacote estatístico R através das rotinas `ks.test` e `ad.test`. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Notamos, nessas tabelas, que a estatística D- é numericamente maior que a estatística D+ para a maioria dos conjuntos (painéis nas Figs. 4.10 e 4.11). A exceção dá-se na

	Cor × inclinação			
	K-S			A-D
	D-	D+	p-value	p-value
Definidoras BB e RR	0.28	0.05	0.46	0.54
Todos os BB e RR	0.28	0.02	0.18	0.13
BB+BR e IR+RR	0.26	0.00	0.03	0.02

Tabela 4.9: Veja Tabela 4.8.

comparação das distribuições entre as populações BB+BR e IR+RR com respeito à excentricidade.

Podemos interpretar, quando $D- > D+$, que as funções cumulativas das populações mais azuladas (BB e BB+BR) localizam-se majoritariamente abaixo das mais avermelhadas (RR e IR+RR). Essas curvas são dadas na Figs. 4.12 e 4.13. Isto significa que, conforme crescem excentricidade ou inclinação, uma maior proporção de objetos vermelhos aqui apresentados é varrida, em comparação com a dos mais azuis. Em outras palavras, os objetos mais avermelhados concentram-se em regiões de menores excentricidade e inclinação quando comparados com os mais azulados. Exceção é feita ao dados referentes ao painel inferior da Fig. 4.12, onde as curvas cumulativas praticamente ficam superpostas exceto para o intervalo aproximado de excentricidade $0.15 < e < 0.35$. É justamente esse o caso para o qual a análise anterior, feita com base no valor de excentricidade 0.42, foi dada como inconclusiva.

Ainda, se tomarmos $p\text{-value} < 0.05$ para rejeição da hipótese nula (i.e., amostras provenientes da mesma distribuição), notamos que esta hipótese pode ser rejeitada segundo o teste K-S para as curvas cumulativas da Fig. 4.12 (painel inferior) e segundo ambos os testes K-S e A-D para as curvas cumulativas da Fig. 4.13 (painel inferior).

É interessante ressaltar o painel inferior da Fig. 4.12 por seu comportamento, explicitado também pelas Tabelas 4.8 e 4.9, contrário aos outros da mesma figura e aqueles da Fig. 4.13. Uma explicação aqui pode ser dada pela presença dos objetos BR e IR cuja eficiente separação nessas classes, devido às incertezas fotométricas, pode ter sido afetada. No que diz respeito à inclinação, claramente, o problema da separação foi menos relevante.

4.1.7 Cores e Diâmetro

Verificou-se neste trabalho também possíveis correlações entre diâmetros dos TNOs e Centauros e suas cores. Para isso, é utilizado a equação 2.1 para estimar o diâmetro dos TNOs e Centauros deste trabalho. Neste contexto, utilizam-se as magnitudes absolutas do DES combinadas com as medianas dos albedos para diferentes classes dinâmicas (tabela 4.10)

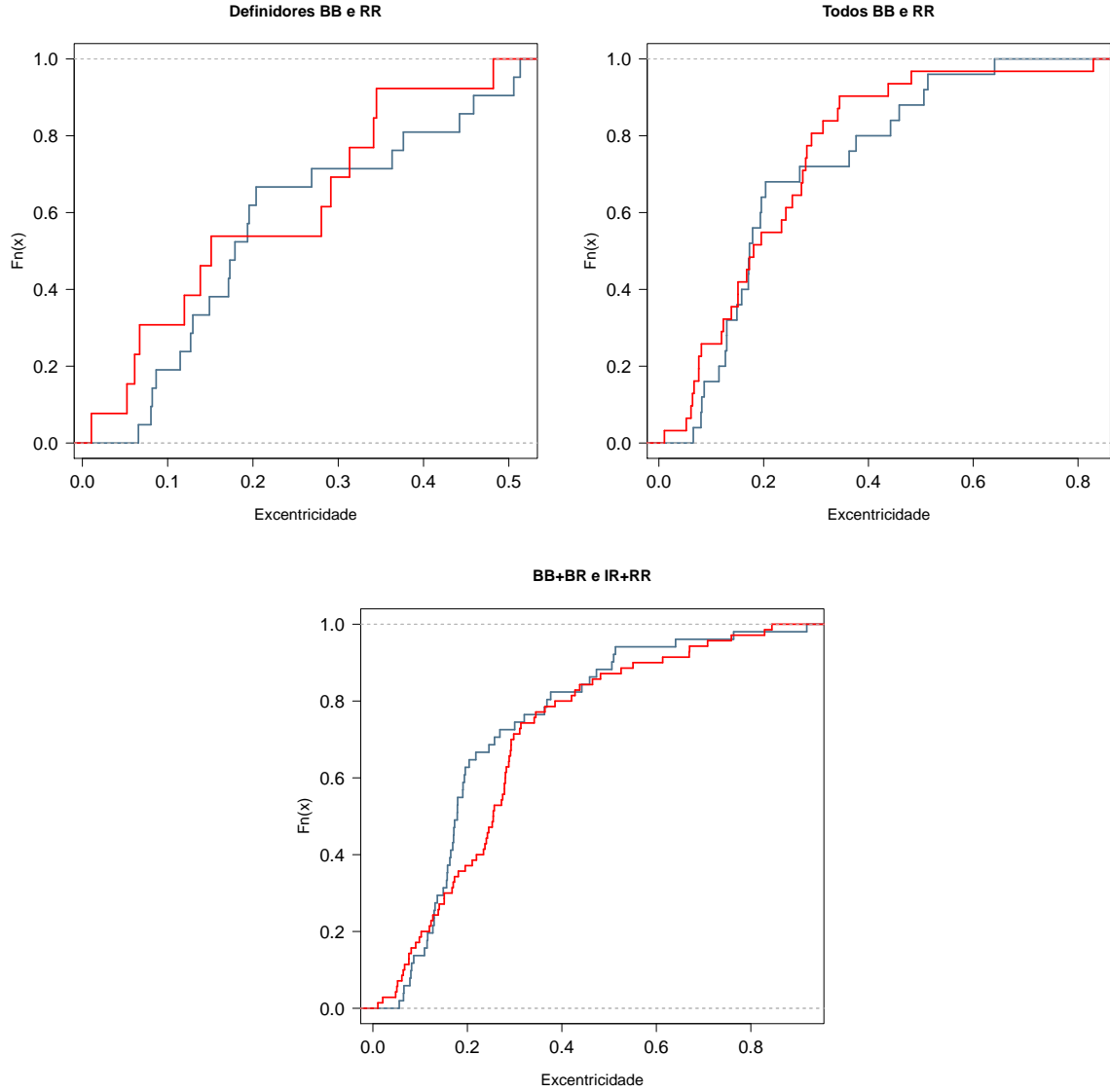


Figura 4.12: Curvas cumulativas normalizadas de objetos seguindo, no sentido horário, os dados apreendidos em cada painel da Fig. 4.10, da esquerda para a direita.

apresentadas no trabalho de Müller et al. (2020).

Como os albedos são dados principalmente na banda V, convertemos magnitudes absolutas DES da banda g_{DES} para a banda V usando as equações de transformação de Abbott et al. (2021). As variâncias das magnitudes absolutas V obtidas são determinadas a partir da expansão de erro das respectivas equações de transformação e pela adição quadrática do valor rms fornecido.

Os diâmetros equivalentes (D) são finalmente obtidos através da equação 2.1, considerando a magnitude aparente do Sol na banda V (-26.77) de Willmer (2018). Os intervalos de confiança $[D_{\text{min}}, D_{\text{max}}]$ para os diâmetros são inferidos pela determinação de pares $(H_{v\text{min}}, \rho_{v\text{max}})$ e $(H_{v\text{max}}, \rho_{v\text{min}})$, onde $H_{v\text{min}} = H_v + \sigma_{H_v}$, $H_{v\text{max}} = H_v - \sigma_{H_v}$, $\rho_{v\text{min}} = \rho_v - \sigma_{\rho_v}$ e $\rho_{v\text{max}} = \rho_v + \sigma_{\rho_v}$, em que ρ representa o albedo. Os valores adotados para σ_{ρ_v} são aqueles

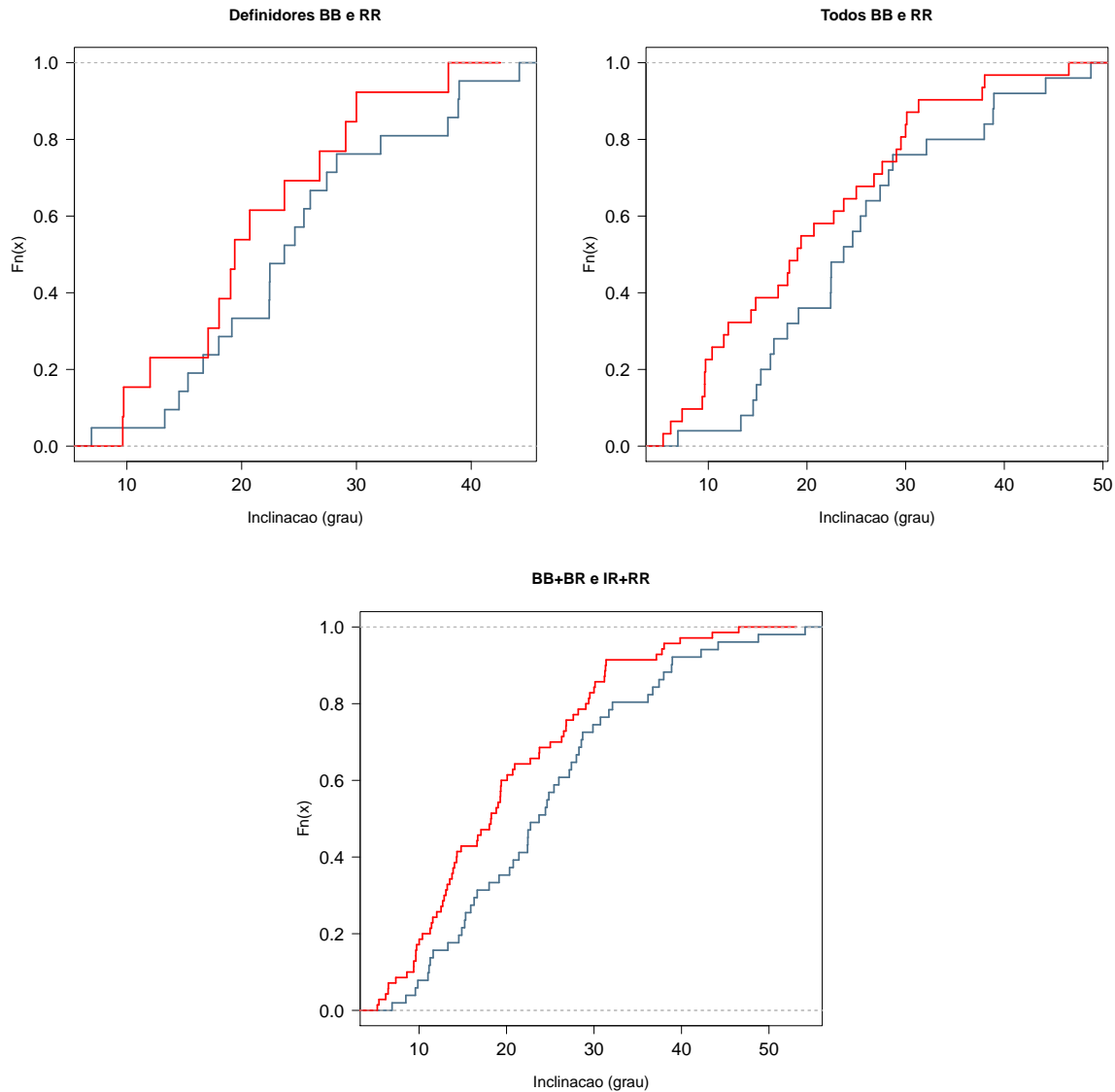


Figura 4.13: Curvas cumulativas normalizadas de objetos seguindo, no sentido horário, os dados apreendidos em cada painel da Fig. 4.11, da esquerda para a direita.

de desvio padrão da média como dados pela tabela 4.10. Os diâmetros estimados e seus respectivos intervalos de incerteza são apresentados na tabela 4.13.

Como forma de verificar a qualidade dos valores para diâmetros encontrados neste trabalho, foi comparado valores de diâmetros encontrados na literatura. Na figura 4.15 pode-se observar que os resultados obtidos estão em boa aproximação com os apresentados pela literatura

Vale destacar que os objetos 2009 HH36, Eris e 2005 TB190 também se encontram em Müller et al. (2020). Portanto, para esses objetos, foram utilizados os albedos individualmente retirado do trabalho. Para Eris, foi utilizado também o albedo geométrico na banda V obtido por Sicardy et al. (2011) através da técnica de ocultações estelares para o cálculo do diâmetros como forma de comparação, encontrando o valor de 2221_{-187}^{+148} que

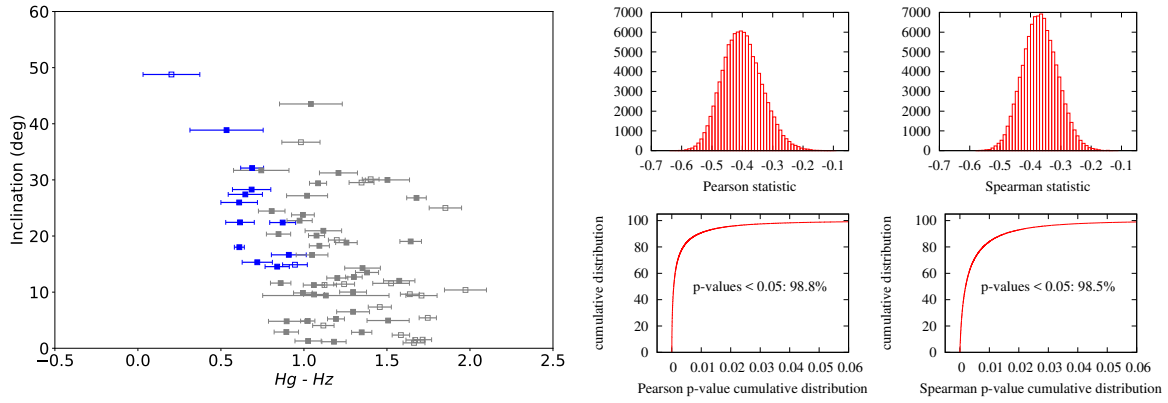


Figura 4.14: Painel Esquerdo: Cor \times inclinação, considerando todos os 68 objetos ressonantes apresentados na tabela 4.13. Marcadores sólidos: objetos entre os 86 definidores de classe. Os marcadores azuis representam os objetos da classe *BB* e os marcadores cinzas representam as demais classes taxonômicas. As barras de erro tem comprimento de 1σ . Painel Direito: Resultados obtidos pelos testes de Pearson e Spearman.

Classe Dinâmica	n	mediana	média	σ	σ/\sqrt{n}	min/max	commentário
Cold Classical	17	0,136	0,132	0,045	0,0109	0,054 0,236	todos
Hot Classical	32	0,107	0,195	0,225	0,0397	0,032 0,804	todos
Plutino	26	0,084	0,102	0,072	0,0141	0,032 0,310	sem Makemake, família de Haumea
Ressonantes	25	0,089	0,114	0,064	0,0128	0,039 0,281	Sem Plutão
Destacados	11	0,163	0,148	0,071	0,0215	0,049 0,297	todos
	8	0,167	0,291	0,294	0,1040	0,079 0,960	todos
	7	0,148	0,195	0,125	0,0471	0,079 0,410	sem Eris
SDO	20	0,057	0,075	0,046	0,0103	0,037 0,231	todos
Centauros	55	0,056	0,074	0,043	0,0058	0,020 0,256	todos

Tabela 4.10: Valores de albedos médios para diferentes classes dinâmicas: n representa o número de objetos com albedos conhecidos na literatura (Müller et al., 2020), σ representa o desvio padrão, σ/\sqrt{n} representa o desvio padrão da média, min/max são os valores mínimos e máximos

é bastante coerente com o valor apresentado na tabela 4.13 utilizando o albedo de Müller et al. (2020).

Destaca-se também que o objeto 2007 RW10 é apontado como um binário e aparece em Müller et al. (2020). No entanto, seu albedo individual é dado na banda *r*. Assim, para esse contexto, seu diâmetro é calculado pela transformação da magnitude absoluta do banda r_{DES} para a banda *r* utilizando também a transformação de Abbott et al. (2021). Conforme apresentado por Willmer (2018), a magnitude aparente do Sol na banda *r* é -26.97.

Na figura 4.16 mostramos a distribuição dos diâmetros dos objetos azuis (*BB*) e vermelhos (*RR*) em função de suas cores $H_g - H_z$. Pode-se facilmente perceber que os objetos mais avermelhados tendem a se concentrarem em diâmetros menores quando comparados com os objetos azuis, sendo uma porção pequena deles maior que ~ 250 km. Outro destaque pode ser dado para o fato que não foi encontrado nenhum objeto ≥ 400 km para a população clássica fria (Cold Classicals). Este resultado vai de encontro com

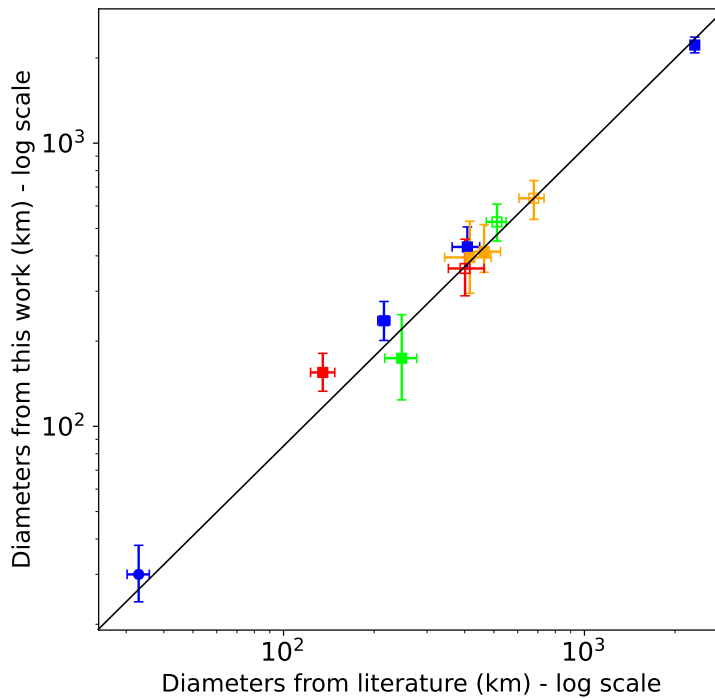


Figura 4.15: Comparação dos diâmetros e seus respectivos erros para objetos encontrado na literatura. Eris é o objeto de maior diâmetro.

dados apresentado por [Kavelaars et al. \(2021\)](#), a inexistência de objetos clássicos frios para diâmetros maiores que 400 km. Para a ausência de objetos mais avermelhados em $D \gtrsim 400$ km, [Fraser and Brown \(2012\)](#) sugere que objetos maiores podem ter sido dominados por processos geológicos que pouco afetaram os menores, como diferenciação ou criovulcanismo, que tenham o efeito de cobrir ou remover materiais não gelados da superfície.

Classes Dinâmicas e Espectrais e Albedo

Embora a determinação dos diâmetros apresentados neste trabalho se beneficie de uma correspondência entre albedo e classes dinâmicas, poderíamos considerar também a correlação entre albedo e classe espectral apresentada por [Fraser et al. \(2014\)](#); [Lacerda et al. \(2014\)](#). Além disso, [Lacerda et al. \(2014\)](#) também apresenta albedos medianos, com seus respectivos intervalos de confiança, em função das classes dinâmicas. Tais valores apresetando por este trabalho concordam com os adotados por [Müller et al. \(2020\)](#).

Ao optar por utilizar a correlação classe espectral - albedo para estimar diâmetros das grandezas absolutas aqui apresentadas, uma escolha válida é utilizar um valor de 5% para objetos azuis (BB, BR) e 15% para objetos vermelhos (IR, RR), conforme apresentado por [Lacerda et al. \(2014\)](#).

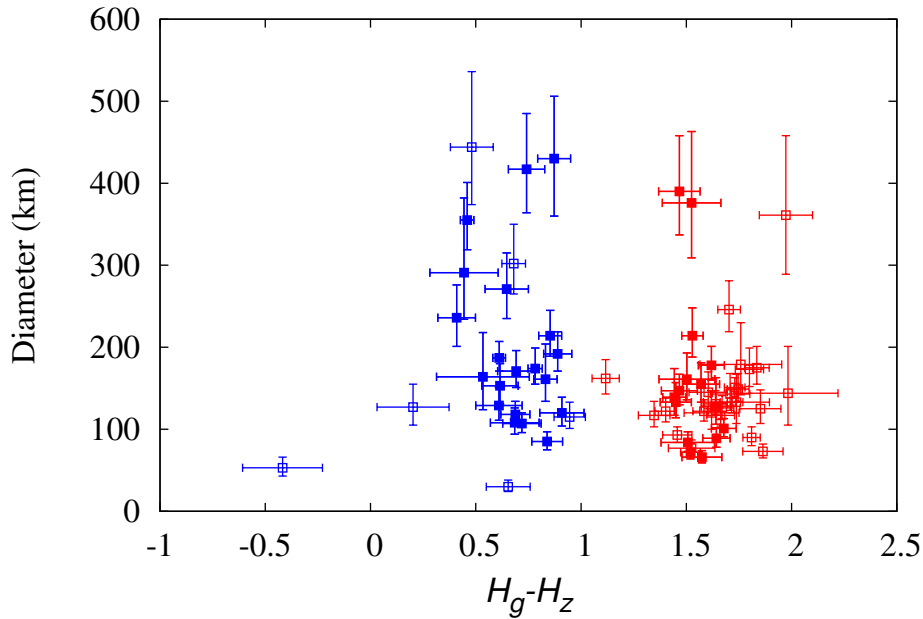


Figura 4.16: Cor \times diâmetro para as classes *BB* (azul) e *RR* (vermelha). Os marcadores sólidos representam os objetos definidores (primeiros 86 objetos apresentados na table 4.13) de classe. Os marcadores vazios representam os 58 objetos restantes. Por conveniência, Eris (2221^{+148}_{-137} km), não é mostrado. 92.3% dos objetos *RR* têm diâmetros menores que 400 km e 89.7% tem têm diâmetros menores que 250 km, considerando as incertezas de 1σ . Para os objetos *BB*, o percentual é de 76.9% and 61.5% (incluindo Eris).

4.1.8 Algumas considerações a respeito do número de classes taxonômicas

Buscamos por grupos que sejam capazes de refletir significativamente as características espectroscópicas de pequenos corpos. Fica claro que a fotometria banda larga com poucas cores não possam competir com estudos espectroscópicos de suas superfícies. Tal dificuldade de refinamento pode sugerir que um grande número de classes não teria sentido.

Merlin et al. (2017) demonstrou que seus resultados espectroscópicos pra um conjunto de 43 TNOs e Centauros concordam com as classes *BB* e *RR* do esquema taxonômico de Barucci et al. (2005); Fulchignoni et al. (2008). Objetos pertencentes as classes intermediárias, *BR* e *IR*, no entanto, mostram espectros médios misturados indicando que pelo menos parte dos objetos não mostra nenhuma preferência particular por uma dessas classes.

Neste contexto, a escolha pela taxonomia proposta por Barucci et al. (2005) nos permite, ao menos, ser confiante de que nossos objetos mais azuis e mais vermelhos apresentam correspondência confiável com aqueles obtidos a partir de resultados espectroscópicos. Além disso, informações relevantes são coletadas sobre os objetos nas classes intermediárias, levando a uma possível melhor discriminação das superfícies que as po-

voam, bem como aumentando o número de objetos em todas as classes desse esquema de taxonomia.

Assim, conforme já mencionado, este trabalho não tem como objetivo defender determinado método nem estabelecer um novo método específico para a classificação superficial de TNOs e Centauros. Embora o uso do sistema taxonômico de 4 classes possa ser considerado, em última análise, uma escolha neste trabalho, o próprio conjunto de dados fornece algum suporte para ele, no qual a figura 4.17 pode ser utilizada para esse contexto. Ela apresenta o histograma para as cores $H_g - H_r$, $H_g - H_i$ e $H_g - H_z$. Ressaltamos que tal projeção reflete a distribuição de cores de nossos dados sem qualquer influência de procedimentos para separar os objetos em classes, embora, obviamente, os limites de classe obtidos aqui devam concordar com tal distribuição. Assim, a partir do histograma pode-se notar (veja a tabela 4.4):

1. Limite de cor entre as classes *IR* e *RR* para as cores $H_g - H_r$ é próxima do valor mínimo do histograma de $H_g - H_r$;
2. limite de cor entre as classes *BR* e *IR* para as cores $H_g - H_i$ está próximo do mínimo do histograma de $H_g - H_i$; e
3. limite de cor entre as classes *BB-BR* e *IR-RR* para as cores $H_g - H_z$ está próximo do mínimo do histograma de $H_g - H_z$.

O histograma para as cores $H_g - H_z$ apresenta duas quedas, indicando assim três grupos de objetos: um grupo é identificado pela classe *BB* ($H_g - H_z < 0.83$), outro grupo pela classe *RR* ($H_g - H_z > 1.39$) e um grupo intermediário que compreende às classes *BR* e *IR*. O histograma das cores $H_g - H_i$ mostra um limite mínimo entre as classes *BR* e *IR*, mas pode-se argumentar que conclusões que atribuem lacunas a um determinado nome de classe (*BB*, *BR*, *IR* ou *RR*) requerem um conhecimento prévio dos resultados do agrupamento. Assim, pode-se afirmar a partir do histograma das cores $H_g - H_z$ que três grupos estão presentes e uma análise combinando as informações de todas as três cores é, no entanto, uma abordagem mais adequada. Embora, conforme já mencionado, este trabalho não tem a intenção de advogar a favor de nenhum método específico de descoberta de classes e/ou do número eventual de classes, nossa escolha pelo esquema de quatro classes taxonômicas concorda com o comportamento da distribuição de cores de nossos dados, conforme fornecido pela Fig. 4.17.

Neste contexto, fica claro que há no mínimo duas classes (uma mais azul e outra mais vermelha). Pode-se dizer que as classes *BB/BR* compõem o mais azul e que as classes *IR/RR* compõem o mais vermelho. Devido aos espectros misturados encontrados para as classes *BR* e *IR*, seria difícil para o presente trabalho derivar parte de seus resultados sem uma discriminação entre as duas classes extremas (*BB* e *RR*) e aquelas duas intermediárias (*BR* e *IR*). Intrusos nas classes *BB* e *RR* dificultam a obtenção de conclusões, por exemplo,

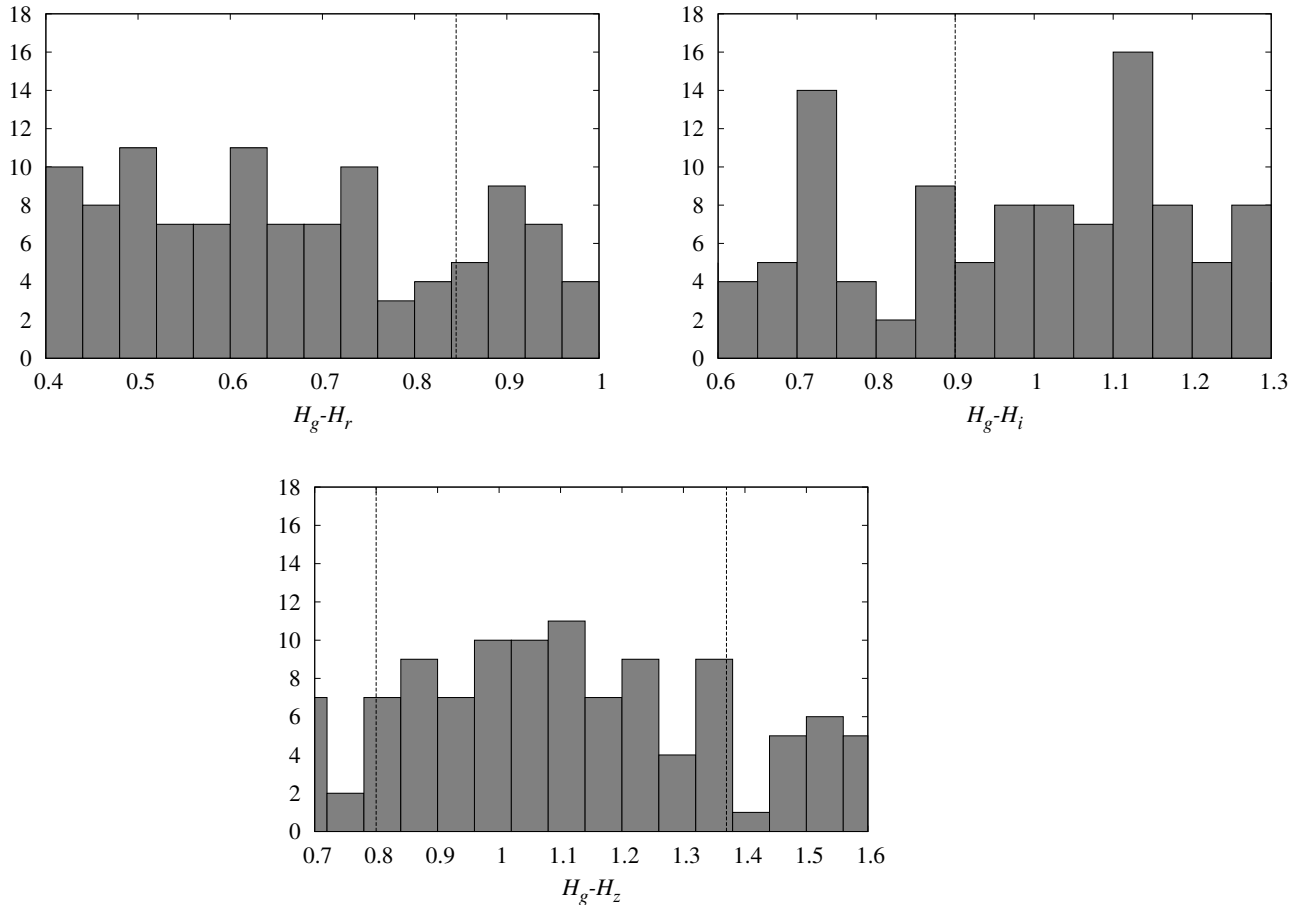


Figura 4.17: Histograma das cores $H_g - H_r$, $H_g - H_i$ and $H_g - H_z$ para os 144 objetos que passaram pelo processo de filtragem. As linhas tracejadas indicam os limites entre as classes taxonômicas apresentados na tabela 4.4. Lembramos que a tabela 4.4 considera apenas os primeiros 94 objetos (definidores) da tabela 4.13.

do painel mais à direita na figura 4.10. Além disso, os resultados da figura 4.16 são favoráveis com o uso de objetos *BB* e *RR* apenas.

Conforme mencionado no capítulo 1 desta tese, baseado em observações do Colours of the Outer Solar System Origins Survey (Col-OSSOS, veja Schwamb et al., 2019), a existência de dois tipos de superfícies de TNOs foi proposto por Fraser et al. (2023). Nesta nova taxonomia, TNOs são classificados em BrightIR ou FaintIR a partir de sua reflectividade seguindo a curva de avermelhamento.

Buscamos na literatura objetos que nós obtivemos a classificação seguindo o esquema de Barucci et al. (2005) que possuem também classificação segundo a taxonomia de Fraser et al. (2023), veja a tabela 4.11. É interessante notar que os objetos do tipo *BB* coincidem com a classe BrightIR, enquanto os objetos da classe *RR* coincidem com FaintIR. O objeto 1999 RB216 apresenta classificações ambíguas (BR-IR) dentro do esquema por Barucci et al. (2005) (veja Tabela 4.13). No esquema por Fraser et al. (2023) (veja, Marsset et al.,

2023) este TNO tem um tipo de superfície não classificado. Isso pode estar relacionado aos espectros médios intermisturados encontrados para as classes *BR* e *IR* na taxonomia de quatro cores, conforme mencionado por [Merlin et al. \(2017\)](#).

Objeto	Taxonomia encontrada neste trabalho com base em Barucci et al. (2005)	Tipo superficial com base em Fraser et al. (2023)	Referência
2001 QF298	BB	BrightIR	1
2013 SA100	BR	BrightIR	1, 2
1999 RB216	IR	não-classificado	1
2005 SA278	BB	BrightIR	1
2015 RU245	IR	FaintIR	2
2003 QW90	RR	FaintIR	1
2015 RT245	RR	FaintIR	1, 2

Tabela 4.11: Objetos classificados neste trabalho segundo o esquema taxonômico de [Barucci et al. \(2005\)](#) que são encontrados na literatura com possível tipo superficial segundo [Fraser et al. \(2023\)](#). A última coluna representa as referências onde esses objetos com a taxonomia de [Fraser et al. \(2023\)](#) foram encontrados. 1: [Marsset et al. \(2023\)](#). 2: [Pike et al. \(2023\)](#).

[Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#) revelou a existência de três grupos espectrais principais de TNOs correspondendo a diferentes composições superficiais de dados espectroscópicos utilizando o James Webb Space Telescope - *bowl*, *double-dip* e *cliff*. Essas três classes têm características espectrais distintas de absorção de gelo de água e de compostos orgânicos complexos e alifáticos.

É interessante notar em [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#) que, em comprimentos de onda menores que $\sim 1,25\mu\text{m}$, as inclinações se tornam cada vez mais íngremes nos espectros de refletância de TNOs do tipo *bowl*, *double-dip* e *cliff*, respectivamente. A tabela 4.12 lista os objetos em comum entre este trabalho e [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#), e uma correspondência entre ambas as classificações é facilmente observada. Tal correspondência, além dos resultados em [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#), sugere que características composicionais no infravermelho próximo podem ser inferidas a partir da espectrofotometria óptica.

Objeto	Taxonomia encontra neste trabalho com base em Barucci et al. (2005)	Tipo de superfície com base em Pinilla-Alonso et al. (2025)
2007 RW10	BR	Bowl
2004 TY364	BR	Double-Dip
2005 QU182	IR	Double-Dip
2005 TB190	IR	Double-Dip
2005 RN43	IR	Double-Dip
1999 OX3	RR	Cliff
2005 PU21	RR	Cliff

Tabela 4.12: Objetos classificados neste trabalho utilizando o esquema taxonômico de [Barucci et al. \(2005\)](#) que são classificados segundo os tipos de superfície de [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#). Note que 2004 TY364, que embora seja classificado com *BR* em nosso trabalho, também possui classificações mais vermelhas (RR e, principalmente, IR) por outros trabalhos.

N	Object	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Classe Din	Diam. (km)	Deste Trab.	[1]	[2]	[3]	[4]				
1	1361 09 Eris	-0.79394	(±0.25213)	0.09808	(±0.25544)	0.06074	(±0.17728)	0.04952	(±0.18036)	0.543	(±0.110)	0.643	(±0.107)	0.565	(±0.114)	Detached	2221 ⁺¹⁴⁸ ₋₁₃₇	BB	BB	BB
2	2010 QJ	5.53982	(±0.14384)	0.29981	(±0.13947)	0.07153	(±0.15380)	0.13612	(±0.25086)	0.320	(±0.206)	0.293	(±0.224)	0.444	(±0.324)	Detached	291 ⁺⁹¹ ₋₅₇	BB	BB	BB
3	2000 TF298	5.53246	(±0.09742)	0.19902	(±0.09962)	0.26912	(±0.12557)	0.47137	(±0.14845)	0.414	(±0.118)	0.533	(±0.123)	0.872	(±0.156)	Detached (3:2)	430 ⁺⁷⁰ ₋₇₀	BB	BB	BB
4	2013 RP98*	7.40231	(±0.07621)	0.22567	(±0.09138)	0.34171	(±0.10924)	0.11560	(±0.13618)	-0.09845	(±0.118)	0.542	(±0.122)	0.692	(±0.177)	Hot Classical	171 ⁺²⁰ ₋₁₆	BB	BB	BB
5	2013 UF31*	8.09176	(±0.07970)	0.30394	(±0.07019)	0.11381	(±0.06992)	0.02994	(±0.07201)	-0.01640	(±0.08362)	0.412	(±0.116)	0.553	(±0.120)	Resonant (3:2)	118 ⁺¹⁶ ₋₁₃	BB	BB	BB
6	2014 SO373*	7.23976	(±0.15824)	0.29655	(±0.13266)	0.16157	(±0.10073)	0.17332	(±0.09401)	0.13179	(±0.13038)	0.400	(±0.198)	0.556	(±0.185)	Resonant (5:3)	129 ⁺²² ₋₂₂	BB	BB	BB
7	2014 TB86	6.84360	(±0.07690)	0.41719	(±0.10056)	0.08067	(±0.09960)	0.08172	(±0.09132)	0.25496	(±0.09738)	0.373	(±0.112)	0.565	(±0.117)	Hot Classical	214 ⁺²⁵ ₋₂₅	BB	BB	BB
8	2014 QA442	5.68230	(±0.14541)	-0.05429	(±0.11717)	0.00004	(±0.08470)	0.02651	(±0.10506)	0.04887	(±0.12349)	0.513	(±0.179)	0.607	(±0.198)	Resonant (7:4)	271 ⁺⁴⁴ ₋₃₆	BB	BB	BB
9	2015 PF312	6.45139	(±0.05107)	0.30061	(±0.05381)	0.25433	(±0.04923)	0.21917	(±0.04622)	0.05303	(±0.03368)	0.437	(±0.068)	0.656	(±0.065)	Resonant (11:6)	187 ⁺²⁰ ₋₂₀	BB	BB	BB
10	2013 QP95*	7.74242	(±0.05856)	0.12226	(±0.05895)	-0.01617	(±0.06033)	-0.02547	(±0.04773)	-0.07487	(±0.03408)	0.435	(±0.091)	0.688	(±0.078)	SDO	174 ⁺²⁵ ₋₁₉	BB	BB	BB
11	2013 RQ109*	8.23591	(±0.12223)	0.19321	(±0.13125)	0.17525	(±0.08999)	0.02098	(±0.09897)	0.03374	(±0.07580)	0.576	(±0.143)	0.538	(±0.169)	Resonant (4:3)	85 ⁺¹² ₋₁₀	BB	BB	BB
12	2013 UE31*	6.70687	(±0.40096)	0.27306	(±0.33276)	0.14883	(±0.20583)	-0.06850	(±0.28874)	0.08448	(±0.14106)	0.369	(±0.482)	0.312	(±0.531)	Resonant (2:1)	164 ⁺⁴⁰ ₋₄₀	BB	BB	BB
13	2016 SA56	7.44205	(±0.14072)	0.43923	(±0.20291)	0.30282	(±0.15005)	-0.01304	(±0.12885)	0.24630	(±0.16775)	0.474	(±0.183)	0.569	(±0.190)	Resonant (19:9)	120 ⁺¹⁶ ₋₁₆	BB	BB	BB
14	2016 SJ57	7.67754	(±0.07861)	0.21672	(±0.08344)	0.18157	(±0.06830)	-0.11235	(±0.07114)	0.26501	(±0.27215)	0.464	(±0.103)	0.403	(±0.102)	Resonant (4:3)	107 ⁺¹³ ₋₁₃	BB	BB	BB
15	2012 WD36*	6.89609	(±0.08294)	0.31022	(±0.08968)	0.41056	(±0.08231)	-0.03538	(±0.08225)	0.30903	(±0.09167)	0.473	(±0.108)	0.441	(±0.108)	Detached	161 ⁺⁴³ ₋₂₇	BB	BB	BB
16	2014 XB48*	7.63211	(±0.14438)	0.29415	(±0.12444)	0.11191	(±0.10770)	-0.00378	(±0.11494)	-0.05191	(±0.15572)	0.409	(±0.199)	0.451	(±0.205)	Resonant (7:2)	108 ⁺¹⁸ ₋₁₄	BB	BB	BB
17	2013 RO124*	7.53653	(±0.05261)	0.46101	(±0.09708)	0.23375	(±0.06971)	0.02174	(±0.10047)	0.03940	(±0.12783)	0.428	(±0.078)	0.474	(±0.079)	SDO	192 ⁺²⁷ ₋₂₁	BB	BB	BB
18	2010 TY53	5.86531	(±0.09339)	0.09790	(±0.07533)	0.80043	(±0.06399)	-0.00861	(±0.10386)	0.09818	(±0.13778)	0.474	(±0.129)	0.486	(±0.180)	SDO	417 ⁺⁶⁸ ₋₅₃	BB	BB	BB
19	2060 Chiron	5.86356	(±0.09885)	0.11535	(±0.05570)	0.06482	(±0.08063)	0.06090	(±0.06757)	0.06845	(±0.07174)	0.327	(±0.162)	0.372	(±0.160)	Centaur	236 ⁺⁴⁰ ₋₃₆	BB	BB	BB
20	2014 QS441*	5.81261	(±0.05328)	-0.01010	(±0.06385)	0.15697	(±0.05234)	0.11716	(±0.05754)	0.07723	(±0.03992)	0.503	(±0.069)	0.510	(±0.073)	Hot Classical	355 ⁺³⁶ ₋₃₆	BB	BB	BB
21	2014 WC536	7.60884	(±0.13716)	0.12156	(±0.10782)	0.13956	(±0.15195)	-0.05753	(±0.11455)	0.03818	(±0.07601)	0.575	(±0.258)	0.456	(±0.213)	Resonant (3:2)	153 ⁺²⁷ ₋₂₂	BB	BB	BB
22	2014 OB394	6.73129	(±0.06412)	-0.04612	(±0.10586)	0.08842	(±0.06640)	0.05996	(±0.14293)	0.08770	(±0.19349)	0.603	(±0.091)	0.780	(±0.105)	SDO	289 ⁺³⁸ ₋₃₂	BR	BR	BR
23	2013 TE172*	7.66070	(±0.09444)	0.42728	(±0.13007)	0.13958	(±0.09885)	0.11383	(±0.09860)	0.09707	(±0.05556)	0.650	(±0.147)	0.896	(±0.149)	SDO	190 ⁺²⁵ ₋₂₅	BR	BR	BR
24	2014 SN363*	7.61910	(±0.17640)	0.07633	(±0.23269)	0.18157	(±0.11847)	-0.01193	(±0.09711)	0.12165	(±0.20377)	0.663	(±0.213)	0.713	(±0.206)	Resonant (11:6)	115 ⁺²¹ ₋₁₇	BR	BR	BR
25	2013 RD109*	8.61443	(±0.06608)	0.17465	(±0.05832)	0.21956	(±0.07559)	0.21806	(±0.10454)	0.710	(±0.124)	0.855	(±0.108)	0.854	(±0.149)	SDO	125 ⁺¹⁵ ₋₁₅	BR	BR	BR
26	2014 NB66	6.12518	(±0.05103)	0.09186	(±0.10797)	0.24101	(±0.11722)	0.08763	(±0.11039)	-0.26592	(±0.27117)	0.717	(±0.088)	0.927	(±0.087)	Cold Classical	255 ⁺¹⁹ ₋₁₇	BR	BR	BR
27	2013 SO102*	8.05735	(±0.07414)	0.06123	(±0.09041)	-0.07443	(±0.13397)	0.01514	(±0.06201)	0.15878	(±0.07811)	0.505	(±0.117)	0.601	(±0.103)	Resonant (3:2)	123 ⁺¹⁶ ₋₁₆	BR	BR	BR
28	2013 SA100	6.30524	(±0.07263)	0.36839	(±0.12542)	0.34469	(±0.18486)	0.09865	(±0.12099)	-0.14421	(±0.13887)	0.621	(±0.143)	0.654	(±0.102)	Hot Classical	291 ⁺⁴³ ₋₄₃	BR	BR	BR
29	2013 TZ171*	7.71058	(±0.07739)	0.17679	(±0.06203)	-0.13537	(±0.05302)	-0.01743	(±0.07681)	0.24026	(±0.10805)	0.510	(±0.101)	0.665	(±0.120)	Hot Classical	148 ⁺²¹ ₋₁₇	BR	BR	BR
30	2013 RS109	7.37979	(±0.08709)	0.14294	(±0.12170)	-0.05004	(±0.09235)	-0.00846	(±0.11723)	-0.14598	(±0.08187)	0.518	(±0.087)	0.708	(±0.101)	Resonant (11:6)	124 ⁺¹¹ ₋₁₁	BR	BR	BR
31	2007 RW10	7.12967	(±0.07410)	0.10114	(±0.06339)	0.11567	(±0.08207)	0.10778	(±0.07492)	0.07811	(±0.08708)	0.570	(±0.120)	0.710	(±0.103)	SDO	174 ⁺⁷⁴ ₋₅₀	BR	BR	BR
32	2013 SP102	6.47372	(±0.08709)	0.12799	(±0.13515)	0.17615	(±0.11970)	0.12303	(±0.07671)	0.03422	(±0.09583)	0.626	(±0.123)	0.719	(±0.109)	Resonant (3:2)	262 ⁺³⁵ ₋₃₀	BR	BR	BR
33	2013 RNI12	7.05427	(±0.07582)	0.12909	(±0.10988)	0.25068	(±0.08854)	0.26507	(±0.09388)	0.05383	(±0.25931)	0.627	(±0.104)	0.719	(±0.091)	Resonant (3:2)	206 ⁺²³ ₋₂₃	BR	BR	BR
34	2013 TF172	7.43152	(±0.06973)	0.12909	(±0.11614)	0.14169	(±0.08224)	0.02634	(±0.08169)	-0.18530	(±0.22888)	0.496	(±0.088)	0.722	(±0.090)	Resonant (7:4)	121 ⁺¹² ₋₁₂	BR	BR	BR
35	2016 QV89*	6.39664	(±0.05486)	0.16738	(±0.07945)	0.17847	(±0.06285)	-0.09890	(±0.06446)	0.10003	(±0.05564)	0.582	(±0.072)	0.725	(±0.074)	Detached	208 ⁺³² ₋₃₂	BR	BR	BR
36	2012 TD324	7.43607	(±0.06240)	0.23411	(±0.09130)	0.17770	(±0.08499)	0.01180	(±0.11587)	0.11494	(±0.10664)	0.614	(±0.096)	0.739	(±0.104)	Resonant (3:2)	167 ⁺²⁰ ₋₁₆	BR	BR	BR
37	2014 SP373*	7.51920	(±0.07602)	0.03741	(±0.07048)	-0.05661	(±0.08064)	0.05655	(±0.15122)	-0.07885	(±0.12508)	0.457	(±0.122)	0.744	(±0.151)	Resonant (3:2)	156 ⁺²⁰ ₋₁₇	BR	BR	BR
38	2013 RJI09*	7.34506	(±0.05974)	0.30349	(±0.08806)	0.11528	(±0.07569)	-0.23554	(±0.14205)	-0.18847	(±0.22790)	0.599	(±0.084)	0.744	(±0.091)	Resonant (7:4)	129 ⁺¹² ₋₁₂	BR	BR	BR
39	2014 LQ28	6.55076	(±0.11186)	0.25684	(±0.11604)	0.03196	(±0.08526)	0.18095	(±0.11476)	0.11819	(±0.20734)	0.517	(±0.134)	0.812	(±0.138)	Resonant (7:4)	199 ⁺²⁸ ₋₂₃	BR	BR	BR
40	2016 S555	7.01610	(±0.08117)	0.25785	(±0.10543)	-0.08950	(±0.08934)	0.13763	(±0.09655)	0.12718	(±0.18871)	0.533	(±0.114)	0.910	(±0.114)	Detached	155 ⁺⁴¹ ₋₃₃	BR	BR	BR
41	2016 TT94*	7.08401	(±0.25875)	0.06904	(±0.20402)	0.02449	(±0.15199)	0.19905	(±0.17602)	0.01389	(±0.18146)	0.491	(±0.321)	0.915	(±0.344)	Resonant (5:3)	142 ⁺²⁶ ₋₂₆	BR	BR	BR
42	2016 SQ58	8.30793	(±0.09946)	0.23464	(±0.09725)	-0.04697	(±0.07313)	0.20972	(±0.07887)	-0.00353	(±0.09801)	0.387	(±0.135)	0.863	(±0.132)	Resonant (4:3)	79 ⁺⁹ ₋₉	BR	BR	BR
43	2013 RW124*	7.72249	(±0.08829)	0.42706	(±0.09349)	0.35756	(±0.10068)	0.13714	(±0.12350)	0.29263	(±0.19948)	0.458	(±0.126)	0.606	(±0.143)	Resonant (4:3)	105 ⁺¹¹ ₋₁₁	BR	BR	BR
44	2014 ON6	12.56718	(±0.10342)	0.05668	(±0.02362)	0.05423	(±0.02360)	0.05243	(±0.02367)	0.02946	(±0.08508)	0.827	(±0.147)	1.073	(±0.150)	Centaur	21 ⁺² ₋₂	IR	IR	IR
45	2010 SB41	8.65504	(±0.07955)	0.03918	(±0.10535)	-0.35459	(±0.13533)	0.09692	(±0.08870)	0.04525	(±0.05385)	0.471	(±0.134)	1.126	(±0.113)	Resonant (3:2)	92 ⁺¹² ₋₁₀	BR	BR	BR

Tabela 4.13 – Continuação da página anterior

N	Objeto	$H\gamma$	β_{γ}	β_{δ}	β_{ϵ}	β_{ζ}	$H\gamma - H\delta$	$H\gamma - H\epsilon$	$H\gamma - H\zeta$	Classe Dim.	Diam. (km)	Deste Trab.	[1]	[2]	[3]	[4]
46	2013 SF106*	5.31641 (± 0.24701)	0.37959 (± 0.24500)	0.14496 (± 0.21724)	0.22248 (± 0.20380)	0.42497 (± 0.25601)	0.491 (± 0.353)	0.877 (± 0.336)	1.251 (± 0.381)	Detached	335 $^{+132}$ ₋₃₁	IR				
47	2016 SE56	7.50792 (± 0.07028)	0.24665 (± 0.08252)	0.02750 (± 0.11003)	0.40117 (± 0.14520)	0.07099 (± 0.08371)	0.497 (± 0.132)	1.144 (± 0.162)	1.058 (± 0.116)	SDO	197 $^{+24}$ ₋₂₄	IR				
48	2010 RF188	5.75169 (± 0.10288)	0.04667 (± 0.32891)	0.29100 (± 0.14347)	-0.16908 (± 0.16117)	0.20370 (± 0.24326)	0.742 (± 0.126)	0.880 (± 0.125)	1.094 (± 0.149)	SDO	470 $^{+79}$ ₋₆₁	IR				
49	2013 TQ187*	7.96942 (± 0.11787)	-0.36609 (± 0.14149)	-0.00996 (± 0.17522)	-0.32048 (± 0.14275)	-0.08442 (± 0.10704)	0.883 (± 0.201)	0.862 (± 0.198)	1.296 (± 0.162)	Resonant (7:4)	103 $^{+15}$ ₋₁₅	IR				
50	2013 RM109*	7.39851 (± 0.17566)	-0.31635 (± 0.22828)	-0.05306 (± 0.14919)	-0.49404 (± 0.14717)	-0.42629 (± 0.15969)	0.885 (± 0.219)	0.984 (± 0.215)	1.353 (± 0.215)	Resonant (9:4)	119 $^{+20}$ ₋₁₆	IR				
51	2006 SG415	8.38376 (± 0.10006)	0.38107 (± 0.10280)	0.05064 (± 0.13726)	-0.17049 (± 0.11802)	0.943 (± 0.119)	1.027 (± 0.129)	1.189 (± 0.128)		SDO	146 $^{+24}$ ₋₁₉	IR				
52	2014 SK349	8.17786 (± 0.12311)	0.16852 (± 0.28659)	0.15217 (± 0.10620)	0.10560 (± 0.09901)	0.14135 (± 0.58645)	0.607 (± 0.156)	0.880 (± 0.143)	1.132 (± 0.761)	Resonant (3:2)	119 $^{+15}$ ₋₁₅	IR				
53	2014 QL441	7.08887 (± 0.06869)	0.21788 (± 0.05537)	0.22336 (± 0.05166)	0.02583 (± 0.03960)	0.22688 (± 0.03351)	0.754 (± 0.092)	0.925 (± 0.083)	1.165 (± 0.082)	SDO	255 $^{+38}$ ₋₂₉	IR				
54	2014 Q5510*	8.52427 (± 0.08618)	-0.14293 (± 0.11708)	0.28089 (± 0.16209)	0.03059 (± 0.07873)	0.00367 (± 0.13703)	0.00367 (± 0.13703)	0.931 (± 0.109)	1.380 (± 0.139)	Resonant (7:2)	80 $^{+10}$ ₋₁₀	IR				
55	2014 UD241*	7.59668 (± 0.09057)	0.29146 (± 0.15147)	0.04755 (± 0.15054)	0.00239 (± 0.16052)	-0.00851 (± 0.11953)	0.536 (± 0.150)	0.955 (± 0.156)	1.201 (± 0.127)	Resonant (5:3)	113 $^{+15}$ ₋₁₂	IR				
56	2014 UP250*	6.77534 (± 0.20012)	0.04773 (± 0.30013)	0.10565 (± 0.12656)	0.08576 (± 0.15230)	-0.45206 (± 0.22593)	0.853 (± 0.217)	0.965 (± 0.226)	1.117 (± 0.220)	Resonant (7:3)	177 $^{+34}$ ₋₂₇	IR				
57	2014 OD394	6.06076 (± 0.07262)	0.29597 (± 0.12571)	0.07364 (± 0.12415)	0.31568 (± 0.13230)	0.22842 (± 0.16208)	0.539 (± 0.113)	0.986 (± 0.107)	1.060 (± 0.128)	Resonant (9:5)	229 $^{+25}$ ₋₂₇	IR				
58	2016 SP56	6.91744 (± 0.07657)	0.04823 (± 0.11071)	0.04328 (± 0.09797)	0.35095 (± 0.13948)	0.20107 (± 0.07518)	0.660 (± 0.111)	0.986 (± 0.127)	1.076 (± 0.097)	Resonant (19:9)	159 $^{+19}$ ₋₁₆	IR				
59	2008 SO266	7.03613 (± 0.07555)	0.21294 (± 0.08021)	0.00246 (± 0.07305)	-0.05013 (± 0.07844)	0.06763 (± 0.09531)	0.722 (± 0.109)	1.005 (± 0.115)	1.256 (± 0.130)	Resonant (3:2)	207 $^{+27}$ ₋₂₂	IR				
60	2014 OR394	7.83466 (± 0.06019)	0.10224 (± 0.10821)	0.22379 (± 0.10151)	0.04876 (± 0.15723)	0.09719 (± 0.06468)	0.724 (± 0.084)	1.009 (± 0.114)	1.332 (± 0.087)	SDO	179 $^{+20}$ ₋₂₀	IR				
61	2013 TV158	7.01409 (± 0.04382)	0.17877 (± 0.04564)	0.13430 (± 0.03620)	0.12989 (± 0.03697)	0.15421 (± 0.02743)	0.721 (± 0.058)	1.018 (± 0.064)	1.196 (± 0.055)	Detached	162 $^{+39}$ ₋₂₅	IR				
62	2013 SJ106*	7.25011 (± 0.07742)	0.09808 (± 0.09645)	0.14624 (± 0.07402)	0.06128 (± 0.13298)	0.14322 (± 0.13298)	0.588 (± 0.095)	1.024 (± 0.098)	1.348 (± 0.122)	Resonant (9:5)	134 $^{+16}$ ₋₁₆	IR				
63	2014 SP363*	6.80930 (± 0.14508)	0.39107 (± 0.17135)	0.14206 (± 0.15268)	0.09505 (± 0.12932)	0.01666 (± 0.18247)	0.709 (± 0.197)	1.046 (± 0.189)	1.208 (± 0.229)	Resonant (3:1)	170 $^{+27}$ ₋₂₂	IR				
64	2016 SG58	7.99395 (± 0.06520)	0.12398 (± 0.08480)	0.29567 (± 0.08021)	0.16460 (± 0.07137)	-0.15654 (± 0.08421)	0.918 (± 0.092)	1.056 (± 0.101)	1.073 (± 0.091)	SDO	174 $^{+20}$ ₋₂₀	IR				
65	2014 QU441*	9.19004 (± 0.10748)	-0.14194 (± 0.12386)	0.06065 (± 0.07507)	0.11043 (± 0.05196)	-0.03523 (± 0.05158)	0.735 (± 0.131)	1.068 (± 0.121)	1.093 (± 0.121)	Resonant (3:2)	77 $^{+9}$ ₋₉	IR				
66	2005 QM182	4.23740 (± 0.16935)	0.33052 (± 0.31043)	0.29559 (± 0.31541)	0.38298 (± 0.14802)	0.23680 (± 0.13276)	0.756 (± 0.242)	1.074 (± 0.195)	1.117 (± 0.192)	Detached	395 $^{+135}$ ₋₁₀₀	IR				
67	2014 SK378*	8.85179 (± 0.09550)	0.17264 (± 0.06666)	0.14695 (± 0.07125)	0.22220 (± 0.07250)	0.13274 (± 0.09802)	0.724 (± 0.156)	1.104 (± 0.154)	1.206 (± 0.196)	SDO	112 $^{+19}$ ₋₁₂	IR				
68	2003 QM91	7.14349 (± 0.04743)	0.17407 (± 0.08075)	0.10981 (± 0.08295)	0.06269 (± 0.07845)	0.08417 (± 0.13187)	0.811 (± 0.080)	1.105 (± 0.076)	1.274 (± 0.125)	Cold Classical	163 $^{+12}$ ₋₁₂	IR				
69	2014 VV39*	7.24348 (± 0.05767)	0.23724 (± 0.09338)	0.12951 (± 0.09042)	0.11731 (± 0.08847)	-0.02061 (± 0.10987)	0.769 (± 0.090)	1.117 (± 0.089)	1.377 (± 0.091)	Cold Classical	154 $^{+12}$ ₋₁₁	IR				
70	2013 SN106*	7.43946 (± 0.05793)	0.02632 (± 0.11313)	0.14245 (± 0.08162)	0.18850 (± 0.10094)	-0.06302 (± 0.26905)	0.614 (± 0.086)	1.119 (± 0.087)	1.296 (± 0.198)	Resonant (7:4)	124 $^{+11}$ ₋₁₁	IR				
71	2013 UT22*	7.61362 (± 0.08220)	0.44333 (± 0.08456)	0.25126 (± 0.07383)	0.25882 (± 0.10060)	-0.07212 (± 0.06793)	0.752 (± 0.113)	1.122 (± 0.134)	1.085 (± 0.103)	Resonant (5:3)	118 $^{+15}$ ₋₁₂	IR				
72	2015 TW361	7.84039 (± 0.06708)	0.08134 (± 0.09436)	-0.00967 (± 0.11180)	0.15226 (± 0.11546)	0.00537 (± 0.10658)	0.673 (± 0.128)	1.128 (± 0.130)	1.146 (± 0.119)	Detached	109 $^{+28}$ ₋₁₆	IR				
73	2014 QZ510*	8.42014 (± 0.10453)	-0.00437 (± 0.08327)	0.12132 (± 0.08542)	0.22111 (± 0.09666)	-0.05746 (± 0.07594)	0.851 (± 0.150)	1.134 (± 0.151)	0.994 (± 0.137)	Resonant (3:2)	113 $^{+16}$ ₋₁₃	IR				
74	2005 TB190	5.02302 (± 0.04387)	0.28297 (± 0.08237)	0.18411 (± 0.08585)	0.23048 (± 0.09003)	0.10647 (± 0.13469)	0.809 (± 0.088)	1.148 (± 0.073)	1.212 (± 0.101)	Detached	414 $^{+102}$ ₋₆₄	IR				
75	1999 RB216	7.84352 (± 0.07891)	0.07828 (± 0.10738)	0.15992 (± 0.09904)	0.14231 (± 0.08502)	0.22330 (± 0.06836)	0.890 (± 0.108)	1.150 (± 0.101)	1.301 (± 0.100)	Resonant (2:1)	109 $^{+15}$ ₋₁₅	IR				
76	2014 WD536*	8.33849 (± 0.14872)	0.08464 (± 0.12899)	0.08495 (± 0.07618)	0.23418 (± 0.07077)	0.04106 (± 0.09456)	0.635 (± 0.173)	1.159 (± 0.174)	1.049 (± 0.191)	Resonant (3:2)	111 $^{+19}$ ₋₁₅	IR				
77	2013 RC109*	8.78482 (± 0.11312)	-0.10835 (± 0.13707)	0.00419 (± 0.19297)	0.31933 (± 0.17571)	0.09193 (± 0.25023)	0.706 (± 0.193)	1.183 (± 0.214)	1.042 (± 0.378)	Resonant (3:2)	92 $^{+14}$ ₋₁₄	IR				
78	2014 QU441*	8.41596 (± 0.10709)	-0.00952 (± 0.09712)	0.02195 (± 0.06251)	0.25896 (± 0.06051)	-0.05211 (± 0.07384)	0.613 (± 0.127)	1.213 (± 0.125)	1.123 (± 0.132)	Hot Classical	110 $^{+14}$ ₋₁₄	IR				
79	2013 SK106	7.45439 (± 0.08728)	0.08580 (± 0.11164)	0.00155 (± 0.10272)	0.45042 (± 0.10697)	0.10998 (± 0.15457)	0.757 (± 0.121)	1.221 (± 0.113)	1.181 (± 0.146)	Resonant (9:5)	127 $^{+16}$ ₋₁₃	IR				
80	2014 SS373*	7.02399 (± 0.20099)	0.49994 (± 0.20732)	0.38971 (± 0.20718)	0.10494 (± 0.25439)	0.20217 (± 0.20397)	0.936 (± 0.203)	1.036 (± 0.310)	1.503 (± 0.266)	Resonant (8:3)	161 $^{+25}$ ₋₂₅	RR				
81	2014 UC225*	8.45318 (± 0.14340)	-0.05789 (± 0.13379)	0.09379 (± 0.16612)	-0.00608 (± 0.13236)	0.01357 (± 0.17069)	0.961 (± 0.172)	1.290 (± 0.183)	1.507 (± 0.254)	Resonant (5:4)	84 $^{+13}$ ₋₁₁	RR				
82	2013 TM187*	9.01161 (± 0.09293)	-0.03112 (± 0.09615)	0.12577 (± 0.08818)	0.33943 (± 0.08677)	0.14368 (± 0.12924)	1.019 (± 0.120)	1.141 (± 0.133)	1.574 (± 0.189)	Resonant (4:3)	66 $^{+8}$ ₋₈	RR				
83	1999 OX3	7.90379 (± 0.09565)	0.11721 (± 0.06200)	0.11778 (± 0.07767)	0.12010 (± 0.05547)	0.07600 (± 0.09378)	1.027 (± 0.135)	1.443 (± 0.164)	1.570 (± 0.176)	SDO	155 $^{+26}$ ₋₂₂	RR				
84	2012 WF37	8.97819 (± 0.10971)	0.21865 (± 0.11352)	0.10666 (± 0.11046)	-0.13733 (± 0.13153)	0.20115 (± 0.06953)	0.952 (± 0.141)	1.073 (± 0.181)	1.643 (± 0.130)	Resonant (3:2)	89 $^{+13}$ ₋₁₁	RR				
85	2014 QP441	9.91427 (± 0.07407)	-0.12757 (± 0.06009)	0.20392 (± 0.04570)	0.18069 (± 0.03319)	0.19331 (± 0.04637)	0.929 (± 0.093)	1.105 (± 0.085)	1.520 (± 0.094)	SDO	72 $^{+11}$ ₋₁₁	RR				
86	2010 PC82	7.50616 (± 0.05174)	0.08940 (± 0.07016)	0.27837 (± 0.09126)	-0.00244 (± 0.08914)	0.09846 (± 0.09862)	1.066 (± 0.087)	1.188 (± 0.098)	1.443 (± 0.110)	Detached	139 $^{+35}$ ₋₂₂	RR				
87	2014 PM68	8.35755 (± 0.13297)	-0.05711 (± 0.10356)	0.18578 (± 0.09313)	0.10124 (± 0.11225)	0.10442 (± 0.08760)	0.913 (± 0.185)	1.190 (± 0.181)	1.467 (± 0.171)	Centaur	147 $^{+20}$ ₋₁₇	RR				
88	2015 TP362	7.66003 (± 0.08789)	0.39502 ($\pm 0.09650</$													

Tabela 4.13 – Continuado da página anterior

N	Objeto	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Classe Dim.	Diam. (km)	Dest. Trab.	[1]	[2]	[3]	[4]			
91	2014 QN41*	7.58242	(±0.09016)	0.05794	(±0.06989)	0.10772	(±0.05485)	0.01858	(±0.05602)	0.02517	(±0.03993)	1.019	(±0.110)	1.529	(±0.102)	SDO	RR		
92	2014 XY40*	5.91629	(±0.22480)	-0.18751	(±0.24255)	0.02813	(±0.15334)	0.19122	(±0.15498)	0.36161	(±0.18278)	0.967	(±0.262)	1.287	(±0.259)	1.525	(±0.278)	Hot Classical	RR
93	2012 VS113*	8.07284	(±0.07740)	-0.21159	(±0.06725)	0.03310	(±0.05917)	0.10683	(±0.05374)	0.25136	(±0.06497)	1.029	(±0.102)	1.319	(±0.103)	1.678	(±0.118)	Resonant (5:2)	RR
94	2013 RF109	7.56425	(±0.05301)	-0.06597	(±0.10076)	0.02492	(±0.06630)	0.04009	(±0.09677)	0.07059	(±0.12774)	1.022	(±0.072)	1.457	(±0.078)	1.619	(±0.123)	Hot Classical	RR
95	2009 HH36	11.13146	(±0.18318)	0.14264	(±0.07521)	0.02633	(±0.07417)	0.00121	(±0.07150)	0.05624	(±0.04031)	0.202	(±0.259)	0.387	(±0.245)	0.654	(±0.208)	Centaur	BB
96	2007 UM126	10.10765	(±0.28067)	0.28927	(±0.10507)	0.05857	(±0.13264)	0.03437	(±0.11227)	-0.11873	(±0.09047)	-0.096	(±0.467)	0.041	(±0.409)	-0.418	(±0.380)	Centaur	BB
97	2013 UJ187*	8.28484	(±0.11791)	0.06236	(±0.13017)	0.16660	(±0.10203)	-0.27424	(±0.11147)	-0.19154	(±0.07953)	0.671	(±0.163)	0.441	(±0.181)	0.946	(±0.149)	Resonant (3:2)	BB
98	2005 SA278	6.50807	(±0.07630)	0.40253	(±0.09222)	0.24743	(±0.12244)	0.32233	(±0.10971)	0.07177	(±0.11854)	0.346	(±0.138)	0.743	(±0.131)	0.680	(±0.112)	SDO	BB
99	2014 VV37*	7.25938	(±0.21646)	0.25285	(±0.15995)	0.04878	(±0.20274)	0.39309	(±0.19429)	-0.26236	(±0.19671)	0.355	(±0.348)	0.958	(±0.338)	0.202	(±0.342)	Resonant (5:3)	BB
100	2010 RF64	5.77010	(±0.15879)	0.13619	(±0.13357)	0.18416	(±0.12298)	0.31867	(±0.10879)	0.10410	(±0.10467)	0.546	(±0.220)	0.783	(±0.270)	0.481	(±0.203)	SDO	BB
101	2014 SR303	11.90960	(±0.14104)	0.07776	(±0.06546)	0.01968	(±0.03938)	0.00346	(±0.04986)	0.19640	(±0.08431)	0.440	(±0.182)	0.675	(±0.230)	1.209	(±0.255)	Centaur	BR
102	2010 RD188	6.34221	(±0.15417)	-0.03667	(±0.13220)	0.08208	(±0.13344)	-0.04117	(±0.24511)	-0.11941	(±0.18924)	0.682	(±0.213)	0.711	(±0.342)	0.690	(±0.280)	Hot Classical	BR
103	2013 TD172*	7.44839	(±0.10075)	-0.12368	(±0.20436)	-0.07411	(±0.16785)	0.26828	(±0.13348)	-0.05238	(±0.14042)	0.381	(±0.161)	1.078	(±0.153)	0.942	(±0.161)	SDO	BR
104	2016 TS94*	8.16462	(±0.15059)	-0.05832	(±0.11160)	-0.10245	(±0.13747)	0.24318	(±0.10329)	-0.06073	(±0.14338)	0.415	(±0.252)	1.043	(±0.202)	0.982	(±0.230)	Resonant (3:2)	BR
105	2004 TY364	4.87563	(±0.12971)	0.26776	(±0.15074)	0.29450	(±0.10991)	-0.11842	(±0.32482)	-0.16583	(±0.39106)	0.872	(±0.165)	0.862	(±0.261)	0.962	(±0.322)	Hot Classical	BR
106	2013 TC188	7.64033	(±0.09910)	0.13430	(±0.14497)	0.17810	(±0.08920)	-0.03183	(±0.14201)	0.16121	(±0.10944)	0.542	(±0.121)	0.719	(±0.158)	1.124	(±0.144)	Resonant (9:5)	BR
107	2014 QR441*	6.99793	(±0.16296)	0.27863	(±0.14752)	0.33627	(±0.14317)	0.36988	(±0.11648)	-0.07925	(±0.11648)	0.610	(±0.236)	0.865	(±0.233)	0.467	(±0.212)	Detached	BR
108	2015 BF519*	4.77642	(±0.04784)	0.43731	(±0.05409)	0.20154	(±0.34963)	0.04958	(±0.41804)	-0.27483	(±0.69193)	0.653	(±0.588)	0.781	(±0.622)	0.608	(±0.846)	SDO	BR
109	2008 UA332	6.70766	(±0.14577)	-0.28098	(±0.17624)	-0.04997	(±0.21521)	-0.08509	(±0.17405)	0.28059	(±0.28039)	0.349	(±0.245)	0.581	(±0.217)	1.235	(±0.271)	SDO	BR
110	2015 VJ181*	7.54155	(±0.24512)	0.12861	(±0.18374)	-0.01029	(±0.21047)	0.33610	(±0.15660)	0.04686	(±0.19278)	0.438	(±0.373)	1.100	(±0.312)	0.840	(±0.346)	SDO	BR
111	2015 RU245	10.23198	(±0.06368)	0.05550	(±0.05182)	0.01728	(±0.06598)	0.19885	(±0.07163)	0.07239	(±0.06434)	0.679	(±0.119)	1.327	(±0.117)	1.321	(±0.111)	SDO	IR
112	2012 VR113*	6.88142	(±0.08057)	0.33389	(±0.08797)	0.19725	(±0.06057)	0.27807	(±0.06483)	0.39552	(±0.06026)	0.594	(±0.101)	0.773	(±0.104)	1.198	(±0.101)	Resonant (2:1)	IR
113	2013 VM46*	8.87923	(±0.21163)	0.04615	(±0.19270)	-0.03704	(±0.18402)	0.41799	(±0.14727)	-0.13874	(±0.17639)	0.319	(±0.300)	1.174	(±0.291)	1.007	(±0.230)	SDO	IR
114	2005 RN443	4.22843	(±0.08305)	0.16590	(±0.15250)	-0.38141	(±0.20488)	0.19205	(±0.19586)	0.29326	(±0.18347)	0.415	(±0.156)	1.109	(±0.138)	1.367	(±0.198)	Hot Classical	IR
115	2011 SW281	7.01408	(±0.06653)	0.45723	(±0.11308)	0.09904	(±0.13025)	-0.34001	(±0.14568)	0.20054	(±0.11791)	0.715	(±0.115)	0.747	(±0.123)	1.374	(±0.103)	Cold Classical	IR
116	2013 SM102*	7.96137	(±0.05917)	-0.20272	(±0.08716)	0.20635	(±0.07829)	-0.26886	(±0.10549)	0.03442	(±0.16347)	0.823	(±0.089)	0.809	(±0.100)	1.242	(±0.126)	Resonant (7:3)	IR
117	2014 XC48*	8.03891	(±0.12644)	0.10661	(±0.12469)	0.00977	(±0.11548)	0.13238	(±0.16405)	-0.38598	(±0.22224)	0.906	(±0.173)	1.329	(±0.218)	0.972	(±0.273)	SDO	IR
118	2014 QX510*	7.84977	(±0.05919)	0.24343	(±0.09737)	0.40639	(±0.08268)	0.13567	(±0.08815)	-0.22804	(±0.11309)	0.979	(±0.076)	1.253	(±0.081)	1.110	(±0.108)	Hot Classical	IR
119	2013 RK109*	7.84696	(±0.09301)	-0.23249	(±0.12784)	0.22869	(±0.09491)	-0.04375	(±0.09845)	-0.28238	(±0.10332)	0.938	(±0.125)	0.995	(±0.130)	0.915	(±0.131)	SDO	IR
120	2013 TH172*	8.43834	(±0.09793)	0.12432	(±0.10832)	-0.18675	(±0.09085)	0.16780	(±0.09010)	0.32608	(±0.18273)	0.549	(±0.123)	1.269	(±0.134)	1.525	(±0.221)	Resonant (5:3)	RR
121	2014 QV510*	8.42844	(±0.25049)	0.18405	(±0.20338)	0.07023	(±0.08794)	0.12151	(±0.08220)	0.42011	(±0.16101)	0.629	(±0.269)	1.148	(±0.267)	1.738	(±0.314)	SDO	RR
122	2006 QQ180	7.18241	(±0.17232)	0.33306	(±0.20829)	0.09405	(±0.11516)	0.01374	(±0.08035)	0.27839	(±0.07250)	0.716	(±0.191)	1.083	(±0.187)	1.708	(±0.188)	Resonant (5:3)	RR
123	2013 SJ102*	8.15772	(±0.06189)	0.21658	(±0.07520)	0.09055	(±0.06163)	0.19530	(±0.07239)	0.19981	(±0.11375)	0.788	(±0.087)	1.259	(±0.091)	1.457	(±0.139)	Resonant (7:4)	RR
124	2014 OQ394	7.33271	(±0.12962)	-0.17927	(±0.15120)	0.12493	(±0.07970)	0.08763	(±0.07970)	0.04666	(±0.09162)	0.973	(±0.147)	1.156	(±0.148)	1.347	(±0.150)	Resonant (3:1)	RR
125	2012 VU113*	8.32495	(±0.08192)	0.13496	(±0.07322)	0.03201	(±0.08600)	0.39899	(±0.06626)	0.29868	(±0.06107)	1.031	(±0.107)	0.992	(±0.117)	1.402	(±0.101)	Resonant (3:2)	RR
126	2003 QW90	6.03464	(±0.15597)	-0.14480	(±0.21634)	0.16077	(±0.25583)	-0.02442	(±0.22887)	0.44590	(±0.21435)	1.035	(±0.225)	1.584	(±0.248)	1.973	(±0.253)	Resonant (7:4)	RR
127	2015 RT245	7.77257	(±0.09257)	-0.13295	(±0.13054)	0.37514	(±0.10633)	0.10991	(±0.12076)	0.24832	(±0.10972)	1.076	(±0.142)	1.600	(±0.128)	1.663	(±0.132)	Resonant (9:5)	RR
128	2012 TC324	7.58670	(±0.07077)	-0.01449	(±0.08219)	0.33912	(±0.12069)	0.17521	(±0.08544)	-0.20961	(±0.08168)	1.187	(±0.114)	1.859	(±0.164)	1.638	(±0.114)	Resonant (5:3)	RR
129	2002 PA149	7.14549	(±0.07824)	0.22672	(±0.09478)	0.22672	(±0.12066)	0.43168	(±0.24248)	-0.25049	(±0.12383)	1.230	(±0.248)	1.137	(±0.128)	1.117	(±0.129)	Resonant (7:4)	RR
130	2005 PU21	7.37677	(±0.07140)	-0.02808	(±0.07140)	0.30808	(±0.09069)	0.25046	(±0.08137)	0.09846	(±0.13428)	1.239	(±0.089)	1.613	(±0.092)	1.703	(±0.107)	SDO	RR
131	2013 RR98*	8.09384	(±0.27116)	0.00245	(±0.21748)	0.20928	(±0.16832)	0.26246	(±0.25017)	0.15989	(±0.20194)	1.297	(±0.411)	1.481	(±0.344)	1.759	(±0.388)	SDO	RR
132	2014 RH70*	8.57994	(±0.43915)	-0.34780	(±0.32519)	0.15094	(±0.26758)	0.26370	(±0.24346)	0.32660	(±0.13929)	1.330	(±0.548)	1.468	(±0.564)	1.983	(±0.475)	SDO	RR
133	2013 TY171*	8.41303	(±0.17785)	-0.08261	(±0.31527)	0.04556	(±0.08066)	0.31421	(±0.11230)	0.06254	(±0.08523)	1.340	(±0.198)	1.509	(±0.192)	1.852	(±0.195)	Resonant (3:2)	RR

Tabela 4.13 – Continuado da página anterior

N	Objeto	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Classe Din.	Diam. (km)	Deste Trab.	[1]	[2]	[3]	[4]
134	2013 WG114*	7.74538 (± 0.06968)	-0.08350 (± 0.11049)	0.29646 (± 0.08426)	0.45620 (± 0.14208)	0.10434 (± 0.09891)	1.347 (± 0.146)	1.591 (± 0.099)	1.670 (± 0.111)	Resonant (9:5)	126 $^{+16}$ ₋₁₃	RR				
135	2015 TK363	8.21054 (± 0.12384)	-0.32897 (± 0.19124)	-0.02689 (± 0.10371)	0.31576 (± 0.11834)	-0.34879 (± 0.13633)	1.480 (± 0.164)	1.538 (± 0.152)	1.604 (± 0.182)	Hot Classical	145 $^{+23}$ ₋₂₀	RR				
136	2015 TJ363	7.57186 (± 0.09089)	-0.15699 (± 0.09980)	0.06295 (± 0.09142)	0.10119 (± 0.10154)	0.23573 (± 0.11220)	0.900 (± 0.116)	1.162 (± 0.123)	1.800 (± 0.134)	Hot Classical	173 $^{+26}$ ₋₂₁	RR				
137	2013 RO109*	7.52846 (± 0.07390)	0.13707 (± 0.10428)	0.43767 (± 0.09636)	0.15893 (± 0.07503)	0.39126 (± 0.09408)	1.144 (± 0.115)	1.202 (± 0.093)	1.715 (± 0.108)	Resonant (9:5)	133 $^{+16}$ ₋₁₇	RR				
138	2014 VC41*	8.73171 (± 0.18004)	0.06211 (± 0.10961)	0.12607 (± 0.12362)	0.26359 (± 0.12805)	0.37510 (± 0.11819)	0.779 (± 0.279)	1.218 (± 0.276)	1.620 (± 0.261)	SDO	120 $^{+27}$ ₋₂₀	RR				
139	2001 QO297	7.36105 (± 0.05795)	0.04855 (± 0.08874)	0.18791 (± 0.11222)	0.11284 (± 0.08301)	0.46892 (± 0.11125)	0.939 (± 0.096)	1.313 (± 0.083)	1.730 (± 0.098)	Cold Classical	151 $^{+12}$ ₋₁₀	RR				
140	2013 RE109*	7.18544 (± 0.07823)	0.00182 (± 0.12441)	-0.03549 (± 0.15556)	0.23395 (± 0.17616)	0.26907 (± 0.09862)	0.931 (± 0.130)	1.410 (± 0.143)	1.746 (± 0.104)	Resonant (7:4)	149 $^{+15}$ ₋₁₅	RR				
141	2013 RP109*	7.58177 (± 0.06829)	0.00285 (± 0.09160)	-0.07386 (± 0.09479)	0.25922 (± 0.08660)	0.13102 (± 0.09534)	0.841 (± 0.107)	1.473 (± 0.097)	1.584 (± 0.105)	Resonant (11:6)	122 $^{+14}$ ₋₁₂	RR				
142	2003 QC112	9.99768 (± 0.11867)	-0.16660 (± 0.10936)	0.15659 (± 0.09410)	-0.01817 (± 0.10714)	0.07303 (± 0.13321)	1.167 (± 0.169)	1.478 (± 0.177)	1.864 (± 0.191)	Centaur	73 $^{+9}$ ₋₉	RR				
143	2013 TJ159*	7.96805 (± 0.07000)	-0.05751 (± 0.08132)	-0.17781 (± 0.07195)	0.11357 (± 0.05653)	0.12205 (± 0.11111)	0.905 (± 0.095)	1.499 (± 0.087)	1.835 (± 0.117)	SDO	175 $^{+26}$ ₋₂₀	RR				
144	2013 VX30*	9.51218 (± 0.06394)	-0.06209 (± 0.05767)	0.02875 (± 0.04816)	-0.06744 (± 0.04833)	-0.01428 (± 0.03865)	1.112 (± 0.088)	1.529 (± 0.085)	1.810 (± 0.082)	SDO	90 $^{+13}$ ₋₁₀	RR				

Tabela 4.13: TNOs e Centauros a partir da fotometria do DES classificados em quatro grupos taxonômicos de cores desde neutras (BB) até a mais avermelhada (RR), segundo esquema taxonômico de Barucci et al. (2005) e Fulchignoni et al. (2008). Coluna 1: Número de sequência. De 1 até 86: Objetos definidores. De 87 até 144: Objetos classificados a partir dos limites de cores para cada classe. Coluna 2: Identificação do Objeto; Coluna 3: Magnitude absoluta na banda g e sua respectiva incerteza; Coluna 4 a 7: Inclinações de fase e suas incertezas nas bandas g , r , i e z respectivamente; Coluna 8 a 10: Cores obtidas a partir das magnitudes absolutas usadas para classificação taxonômica e suas respectivas incertezas; Coluna 11: Classificação dinâmica como estabelecido pelo SkyBot; Coluna 12: Diâmetros estimados e suas respectivas incertezas; Coluna 13: Classificação taxonômica obtida neste trabalho; Coluna 14 a 17: Taxonomia para objetos encontrados em comum na literatura ([1]; Fulchignoni et al. (2008)), [2]; Perna et al. (2010), [3]; Barucci et al. (2005)), [4]; Belskaya et al. (2015). Os asteriscos representam os que foram inicialmente reportados pela DECam (veja Bernardinelli et al., 2022). O crédito para descoberta é dado quando o objeto é numerado, conforme definido pelo Minor Planet Center (MPC; veja https://www.minorplanetcenter.net/db_search)

Capítulo 5

Fotometria do DES para Asteroides do Cinturão Principal

Em colaboração com o Dr. Valerio Carruba (UNESP/SP), os dados do DES, cruzados com dados de outros levantamentos, foram utilizados para fornecer novas informações sobre propriedades físicas de asteroides do cinturão principal, investigando como suas taxonomias são refletidas nos dados do DES. Neste trabalho, o método de aprendizado de máquina (*Machine Learning - ML*) otimizados por meio do uso de algoritmos genéticos foram utilizados para prever a rotulação de asteroides sem nenhuma informação taxonômica prévia. A utilização desta metodologia foi a grande contribuição do professor Dr. Valerio Carruba. A participação do autor desta tese se deu em maior parte na obtenção das cores dos objetos nos dados do DES. Os resultados deste trabalho estão publicados na *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)* e pode ser consultado no apêndice A desta tese.

Utilizamos dois conjuntos de dados das medições fotométricas do DES: um conjunto de alta qualidade com inclinações gri e cores $i - z$, onde o método de classificação de [DeMeo and Carry \(2013\)](#) pode ser aplicado, e uma base de dados muito maior com as cores $g - r$ e $g - i$. Em seguida, cruzamos os dados do DES com informações taxonômicas, do SDSS-MOC4¹ ([Ivezić et al., 2001](#)) e de albedo, para entender como as taxonomias de asteroides são mapeadas no novo conjunto de dados. Com base na distribuição das taxonomias conhecidas de asteroides, foi possível fazer previsões sobre corpos não classificados usando métodos de aprendizado de máquina, otimizados por algoritmos genéticos ([Chen, P. W. and Wang, J. Y. and Lee H., 2004](#)).

Novamente, é necessário considerar a cadência observacional do DES, em que as observações de um mesmo objeto em filtros diferentes podem estar separadas por longos e irregulares períodos de tempo, e também a ausência de informações precisas a respeito da rotação. Assim, as cores para um determinado objeto são formadas usando apenas

¹O 4º lançamento de dados do catálogo de objetos móveis do Sloan Digital Sky Survey (SDSS-MOC4): <http://faculty.washington.edu/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>

observações que foram obtidas com, no máximo, 10 minutos de diferença entre os filtros que compõem uma determinada cor. Diferente dos objetos mais distantes, o número de observações para asteroides é bem maior, favorecendo o uso desta estratégia.

Dados² apresentados pelo ALCDEF (Asteroid Light Curve Data Exchange Format, Stephens and Warner, 2018; Stephens et al., 2010; Warner et al., 2011) mostram que a maioria dos asteroides tem período rotacional maior que 2 horas, muitos entre 4 e 10 horas. Assim, se considerarmos o menor período, 2 horas, 10 minutos de observações correspondem a uma rotação de 30 graus, enquanto para um período de 7 horas, temos uma rotação de apenas 8,6 graus. Portanto, a decisão de agrupar observações do mesmo objeto de forma que aquelas que compõem uma determinada cor não tenham sido adquiridas com uma diferença de tempo maior que 10 minutos parece ser um bom compromisso entre minimizar o impacto dos efeitos rotacionais nas cores e, ao mesmo tempo, manter uma grande amostra. Sendo assim, considera-se 10 minutos uma boa estimativa para obter magnitudes em diferentes filtros, levando em conta o tempo de exposição, leitura e troca de filtro. No entanto, se considerarmos um fast rotator, provavelmente seria necessário observações simultâneas nos diferentes filtros.

Para estimar o erro máximo causado pela negligência de efeitos rotacionais nos dados, pode-se considerar as curvas de luz do asteroide como uma onda triangular de pico duplo assumindo uma grande amplitude, 0,5 mag para um período de rotação de 4 horas. Uma separação de 10 minutos entre as observações corresponde a uma mudança de magnitude aproximada de $10/(4 \cdot 60/4) \cdot 0,5 \simeq 0,083$. Considerando um período rotacional de 10 horas, a mudança de magnitude seria de apenas 0,033. Na maioria dos casos, o efeito rotacional na cor deve ser da ordem de 10^{-2} e não excedendo 0,1.

Para a determinação da cor ($g - r$, por exemplo) de um dado objeto utiliza-se o valor médio de múltiplas medições dessa cor. Sua incerteza é representada pelo respectivo desvio padrão. Conforme argumentado por Szabó et al. (2004), as variações de cor podem ser significativamente afetadas pela distribuição não homogênea de albedo sobre a superfície de um asteroide. Assim, pode-se dizer que as incertezas na cor são dependentes do número de medições sob a influência de um albedo variável. Entretanto, é possível observar na tabela 5.1 que as variações de albedo na superfície de asteroides provavelmente não terão efeitos sistemáticos significativos nos resultados aqui apresentados.

No que diz respeito à comparação dos dados que possuímos com fontes conhecidas na literatura para taxonomia de asteroides, utiliza-se as equações de transformação entre magnitudes de Abbott et al. (2021) para converter as cores do DES para cores do SDSS (Sloan Digital Sky Survey), visto que boa parte de dados disponíveis de asteroides se encontram em filtros Sloan. Entretanto, não são utilizadas as equações individuais, mas sim a diferença entre elas. Neste contexto, utiliza-se as cores $(g - r)_{\text{DES}}$, $(g - i)_{\text{DES}}$, $(r - i)_{\text{DES}}$ and $(i - z)_{\text{DES}}$ para dados do DES. Novamente, as magnitudes aparentes do

²https://alcdef.org/phpalcdef_aboutLightcurves.html

Desvio Padrão em ($g - r$)	# de ($g - r$) cores por objeto	Número total ($g - r$) cores utilizadas
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 ou mais	7

Tabela 5.1: Cores ($g - r$) do DES para asteroides do cinturão interno. Apresenta-se o desvio padrão para as medições em ($g - r$), o número de cores obtidas por objeto, o total de medições ($g - r$) utilizadas para calcular o valor médio. Apresenta-se também o total de objetos com uma cor ($g - r$), independentemente de terem sido utilizados neste estudo.

Sol e comprimentos de onda centrais no SDSS foram obtidas de [Willmer \(2018\)](#). Assim, as equações de transformação das cores do DES para as do SDSS são

$$\begin{aligned}
(g - r)_{\text{SDSS}} &= (g - r)_{\text{DES}} + 0.060 \times (g - i)_{\text{DES}} \\
&\quad - 0.150 \times (r - i) - 0.019 \\
(g - i)_{\text{SDSS}} &= 1.060 \times (g - i)_{\text{DES}} - 0.167 \times (r - i)_{\text{DES}} \\
&\quad + 0.022 \\
(i - z)_{\text{SDSS}} &= (i - z)_{\text{DES}} + 0.113 \times (r - i) - 0.003
\end{aligned} \tag{5.1}$$

O estudo foi iniciado selecionando no banco de dados do DES apenas asteroides cujo coeficientes de fase nas bandas gri e cores $i - z$ pudessem ser determinados. A partir das cores é possível determinar o espectro de reflectância em baixa resolução normalizado \overline{E}_f utilizando também a equação 4.3, possibilitando assim a obtenção do gradiente espectral através da equação 4.4. Neste caso, f refere-se à banda g do SDSS.

A partir de tais parâmetros pode-se classificar os asteroides segundo o esquema taxonômico de [DeMeo and Carry \(2013\)](#), que é baseado nos dados do SDSS-MOC4. Assim, é possível identificar quais estão presentes em ambos os catálogos e inferir quais propriedades taxonômicas podem ser obtidas com os dados do DES. Neste contexto, 17.154 asteroides com inclinações de fase nas bandas gri e cores $i - z$ estão presente nos dados do DES.

Com o objetivo de eliminar valores discrepantes, foram considerados asteroides apenas no intervalo de quantil de 0,15 a 0,85, o que corresponde ao intervalo de inclinação de fase entre -34,738 e 43,466 e cores $i - z$ entre -0,627 e 0,612. Quantis são pontos de corte que dividem o intervalo de uma distribuição de probabilidade em intervalos contínuos

com probabilidades iguais. A mediana de uma distribuição corresponderia a um quantil de 0,50 (Blitzstein and Hwang, 2019). Assim, por motivos estatísticos, excluiremos esses valores atípicos de nossa análise, resultando, a partir de agora, em uma amostra de 17.135 asteroides — dos quais 10.685 são numerados e o restante são asteroides com múltiplas oposições. A maioria desses valores atípicos são pontos de dados fora do intervalo para o qual o método de DeMeo and Carry (2013) se aplica, representado pela caixa azul tracejada na figura 5.1, e a maioria deles não aparece nessa figura. Os círculos transparentes azuis representam os outliers. O intervalo de magnitudes absolutas sem outliers vai de 9,0 a 20,5. Os histogramas representam a inclinação de fase gri e cores $i - z$ para a populações sem os outliers. Embora haja um único pico para a distribuição de cor, nenhuma das distribuições é normal.

Outros intervalos de quantis também foram considerados. Para uma distribuição dentro do intervalo do quantil 0,10 a 0,90, apenas 2 outliers foram encontrados. Esse número aumenta para 42 se considerarmos distribuições entre 0,20 e 0,80. No entanto, nesses casos, alguns pontos de dados dentro do intervalo para o qual o método de classificação proposto por DeMeo and Carry (2013) se aplica também foram excluídos. Por essas razões, decidimos trabalhar com o intervalo do quantil 0,15 a 0,85.

5.0.1 Dados com inclinações de fase gri e cores $i - z$

Para este conjunto de dados, tem-se como pretenção inicial identificar a localização dos asteroides com taxonomias conhecidas nesse novo conjunto de dados. Assim, utiliza-se asteroides com dados taxonômicos disponíveis em Bus and Binzel (2002), Lazzaro et al. (2004) e DeMeo et al. (2009). Para asteroides com mais de uma entrada nas três referências, atribui-se o tipo espectral mais "votado". Quatorze asteroides com dados taxonômicos nos dados DES foram identificados: 5 do tipo C, 3 do tipo S e 6 do tipo X. A figura 5.2 apresenta a localização ($gri, i - z$). Além de dois asteroides do tipo X, não há indicação de que os parâmetros DES sejam inconsistentes com o esquema de classificação de DeMeo and Carry (2013). No entanto, estatísticas de números pequenos impedem de chegar a conclusões mais convincentes. A maioria dos erros observados estão associados as inclinações de fase gri .

Com o objetivo de aumentar a amostra de asteroides com informações taxonômicas, nossa atenção foi voltada para os dados do SDSS-MOC4. Mesmo que tais dados possuam limitações por estarem baseadas em cores fotométricas, elas podem fornecer resultados que podem ser úteis para se obter informações físicas desses objetos. Inicialmente, são eliminados objetos com grandes incertezas nas inclinações espectrais (maior que 10 %/100nm) e nas cores (maior que 0,1 mag), resultando em 950 asteroides onde o esquema de DeMeo and Carry (2013) pode ser aplicado, dos quais 100 são do tipo X, 54 do tipo D, 345 do tipo C, 151 do tipo L, 29 do tipo Q, 271 do tipo S, 5 do tipo A e 32 do tipo V. Vale

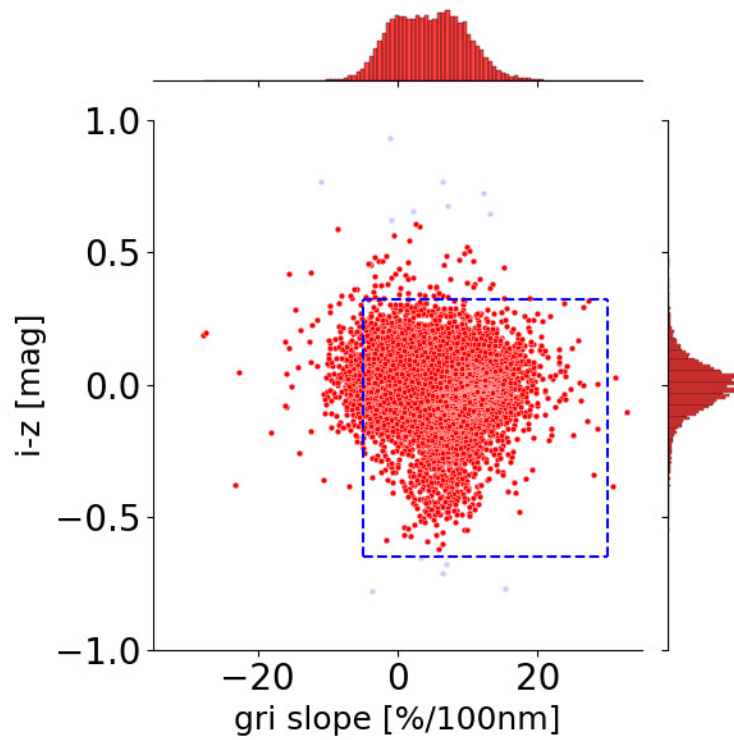


Figura 5.1: Asteroides com dados disponíveis no DES com inclinações de fase *gri* e cores *i - z*. Os círculos vermelhos representam asteroides com parâmetros no intervalo de 0.15 a 0.85. A quadrado tracejado azul representa o intervalo para o qual o esquema de classificação de DeMeo and Carry (2013) se aplica. O topo e o lado direito da figura mostram os histogramas de inclinações de fase e distribuições de cores sem os outliers, respectivamente.

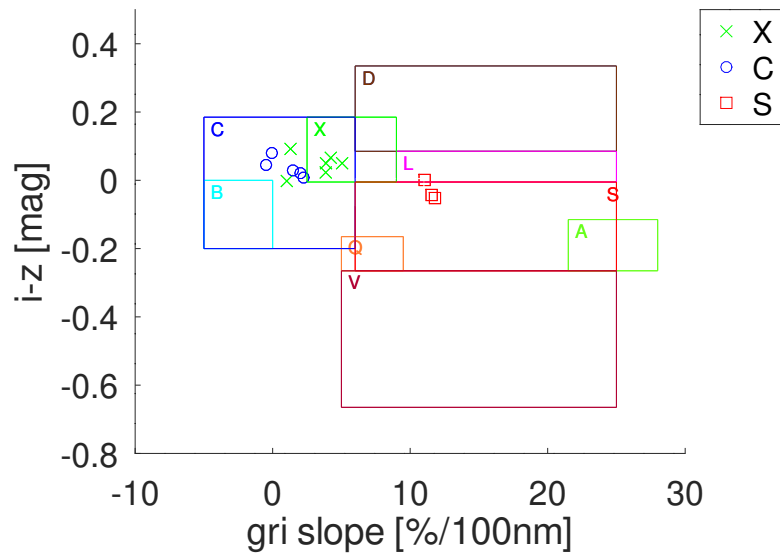


Figura 5.2: Cores *i - z* por inclinações de fase *gri* para asteroides no DES com dados taxonômicos. As caixas coloridas representam os limites de taxonomia por DeMeo and Carry (2013).

ressaltar que as classes CX, SQ, SV, LS e QV não são apresentadas pelo fato de os dados do DES não possuírem a resolução necessária para identificar diferenças sutis. Todos os objetos do tipo SV e QV foram encontrados em regiões (inclinação $gri \times i - z$) ocupadas pelo tipo V. Assim, eles foram classificados para essa classe. A figura 5.3 apresenta a localização para todos eles.

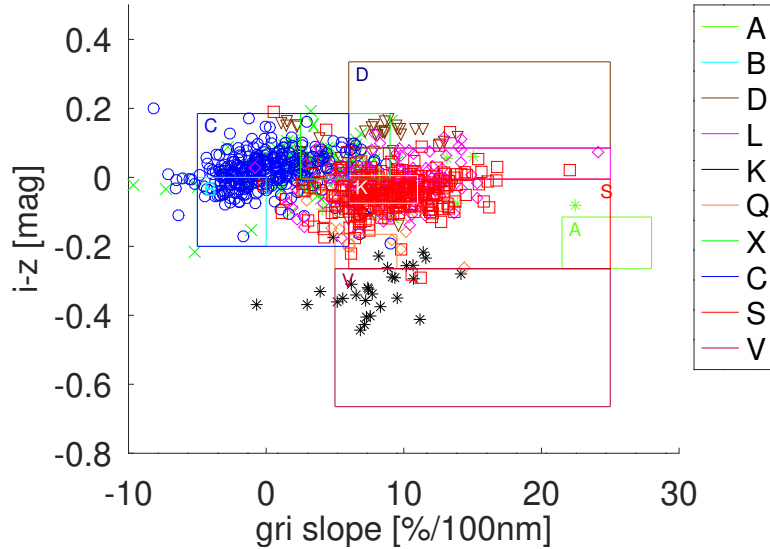


Figura 5.3: Cores $i - z$ por inclinações de fase gri para asteroides presentes nos dados do DES e SDDS-MOC4. As caixas coloridas representam os limites das taxonomias.

Vale ressaltar que a classificação obtida pelo DES nem sempre vai de encontro com a apresentada pelo SDSS-MOC4, devido às incertezas geralmente grandes para as inclinações de fase. No entanto, para verificar a validação da taxonomia a partir dos dados do DES, é buscado correlações com os dados de Carvano et al. (2010) e Popescu et al. (2018). A precisão para as classificações taxonômicas são apresentadas na tabela 5.2 para os tipos espectrais correlacionando-os com três conjunto de dados: Os tipos C e V podem ser classificados pelo DES com pureza de 50% ou mais, enquanto os demais tipos têm baixo percentual de pureza. É interessante notar que 44,4% dos asteroides do tipo V classificados incorretamente são encontrados no cinturão central e externo, enquanto nenhum objeto confirmado para o tipo V é encontrado nessas regiões, o que deve ser analisado com cautela. Os tipos SV podem ser facilmente classificados erroneamente como tipos V usando dados DES, e nenhum dos tipos A foi classificado corretamente. Assim, propõe-se uma classificação limitada a partir dos dados do DES, consistindo em três grupos, o complexo C e S, e os tipos V. O complexo C inclui os tipos X, D e C, enquanto o complexo S abrange os tipos A, L, Q, K e S restantes. Os tipos V permanecem como uma classe separada.

Um esquema de classes mais simplificado para os dados do DES apresenta uma aplicação mais bem sucedida, com pureza superior a 65%. Tais resultados podem ser visualizados na figura 5.4 e na tabela 5.3.

Tipo	# de asteroides	Percentual de SDSS-MOC4 com classificação cons.	# de asteroides	Percentual de Carvano et al. (2010) com classificação cons.	# de asteroides	Percentual de MOVIS com classificação cons.
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

Tabela 5.2: Percentual de classificações taxonômicas consistentes, ou pureza, para asteroides nos dados do DESS e SDSS-MOC4, DES e Carvano et al. (2010) e DES e MOVIS database

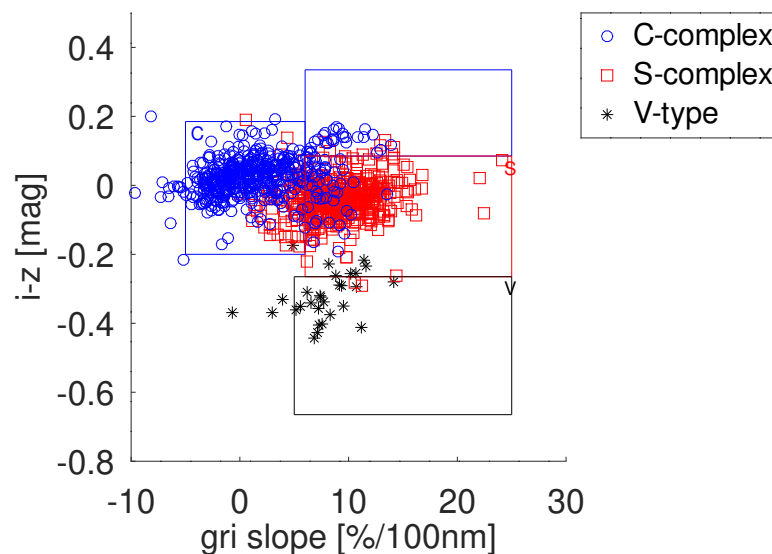


Figura 5.4: Cores $i - z$ por inclinações de fase gri para asteroides presentes nos dados do DES e SDSS-MOC4 para um esquema taxonômico simplificado com as classes C, S e V. As caixas coloridas representam os limites das taxonomias.

Plota-se (figura 5.5) a distribuição orbital para os asteroides do tipo C, S e V. Os elementos próprios foram obtidos do Portal de Família de Asteroides - *AFP*³. Nota-se que os asteroides do tipo C são mais comuns no cinturão externo, enquanto os do tipo S são mais frequentes no cinturão interno. Identifica-se também famílias, tais como tipo S da família Eunomia no cinturão central, limitados em aproximadamente $a \simeq 2,6$ au, $\sin(i) \simeq 0,25$, e família Koronis, em $a \simeq 2.9$ au, $\sin(i) \simeq 0.05$ (região primitiva). Os asteroides do tipo V são majoritariamente associados a família de Vesta em $a \simeq 2.35$ au, $\sin(i) \simeq 0.12$, mas também são encontrados no cinturão externo.

Busca-se também por objetos nos dados do DES com informações de albedo nos bancos de dados da WISE e NEOWISE, AKARI, ou IRAS (Masiero et al., 2012; Ryan and Woodward, 2010; Usui et al., 2011), identificando-se assim 1.573 asteroides (figura 5.6). É identificado uma boa correlação com os dados de albedo e posições (cor \times inclinação

³Portal de Família de Asteroides - *AFP*: <http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/index.php>, Novaković et al. (2022)

Tipo	# de asteroides	Percentual de classificações cons.
C	499	94.2
S	454	80.0
V	32	65.6

Tabela 5.3: Percentual de classificações consistentes (pureza) para asteroides nos dados o DES e SDSS-MOC4.

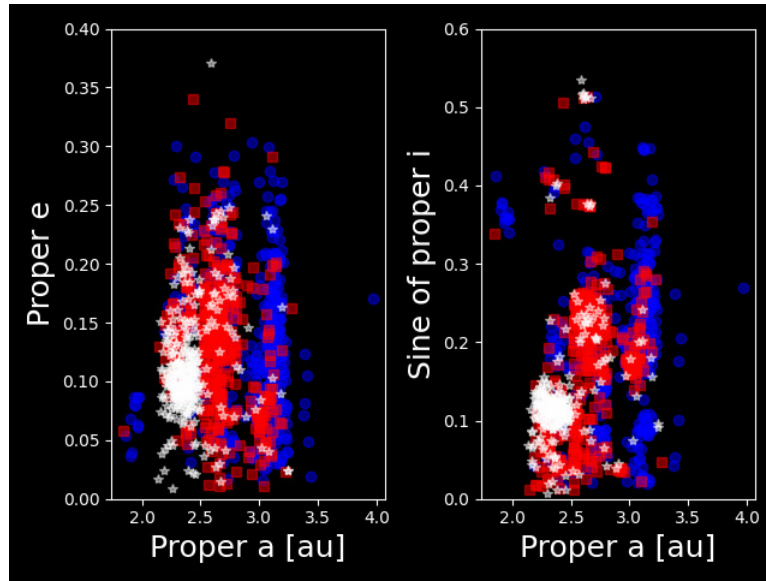


Figura 5.5: Distribuição de $a \times e$ e $a \times \sin(i)$ dos tipos C (círculos azuis), tipo S (círculos vermelhos) e tipo V (marcadores brancos), identificados nos dados do DES e SDSS-MOC4 e listados na tabela 5.3.

de fase): 81.5% dos objetos identificados no tipo C têm valores de $p_V < 0.12$, e 94.6% do tipo S (asteroides do tipo V são incluídos como corpos do complexo S para fins de albedo) têm $p_V > 0.12$, conforme esperado. Tais resultados são apresentados na tabela 5.4

Neste contexto, utilizando um subconjunto com os dados do DES e SDSS-MOC4 aplica-se o procedimento de machine learning por algoritmos genéticos conforme Carruba et al. (2021), que busca selecionar o modelo e o conjunto de treinamento mais adequados para asteroides com maior probabilidade de estarem em estados de libração (equilíbrio), verificando se esses aglomerados pertencem a famílias de colisão conhecidas. O procedi-

Tipo	# de asteroides	Percentual de valores de albedo
C	1188	81.5
S	385	94.6

Tabela 5.4: Percentual de asteroides do tipo C e S com albedo geométrico, $p_v < 0.12$ e $p_V > 0.12$, respectivamente.

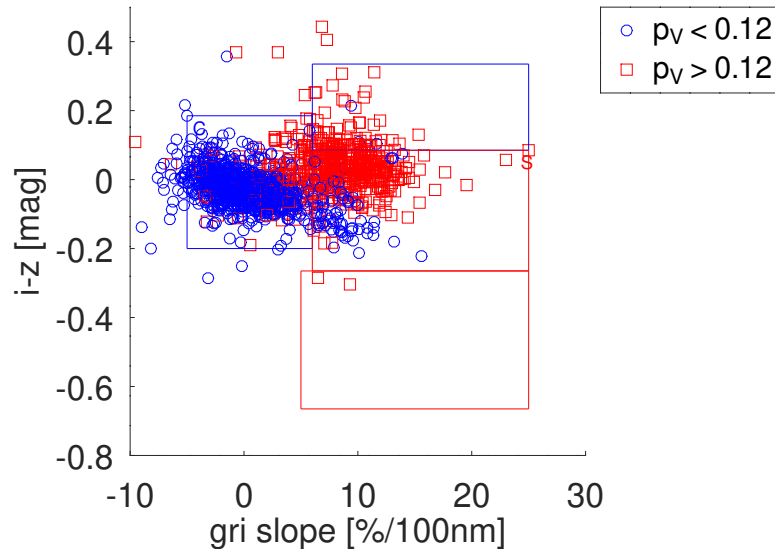


Figura 5.6: Cor $(i - z) \times$ inclinação de fase (gri) para asteroides com dados de albedo e presentes nos dados do DES.

mento é aplicado três vezes utilizando um conjunto de validação correspondente a 20% dos dados, com o objetivo de evitar o problema de overfitting. O estimador Gaussian Naive Bayes (GNB, Chan et al., 1979), uma técnica de classificação usada em ML com base na abordagem probabilística e distribuição Gaussiana, foi o algoritmo que ofereceu melhor desempenho. O GNB assume que cada parâmetro (também chamado de características ou preditores) tem uma capacidade independente de prever a variável de saída. A combinação da previsão para todos os parâmetros é a previsão final, que retorna uma probabilidade da variável dependente ser classificada em cada grupo. A classificação final é atribuída ao grupo com a maior probabilidade. Para estimar a eficiência do algoritmo, é utilizado o f_1 score, definido como média harmônica entre precisão e recuperação (*harmonic mean of precision and recall*⁴, $f_1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$). Assim, o modelo teve um f_1 score de 91,6%. Um alto valor de f_1 indica um modelo com boa precisão e recuperação.

Na figura 5.7 são mostrados os resultados de uma previsão para 16.516 asteroides sem rotulação anterior. A linha diagonal é causada pela presença de objetos do tipo D que estendem os limites do complexo C para cima e para a direita. O classificador prevê que 10.213 dos asteroides provavelmente são do tipo C, 5.890 são provavelmente asteroides do complexo S e 410 são novos possíveis objetos do tipo V.

5.0.2 Dados do DES: $g - r, g - i$

Considerando as cores $g - r$ e $g - i$ em vez das inclinações de fase gri e cores $i - z$, obtém-se 61.493 asteroides, em que a maioria dos objetos possuem cores no intervalo de 0,2 a 1,2. Para eliminar outliers, são considerados asteroides dentro de intervalo de

⁴Precision: $\frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive}$, Recall: $\frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative}$

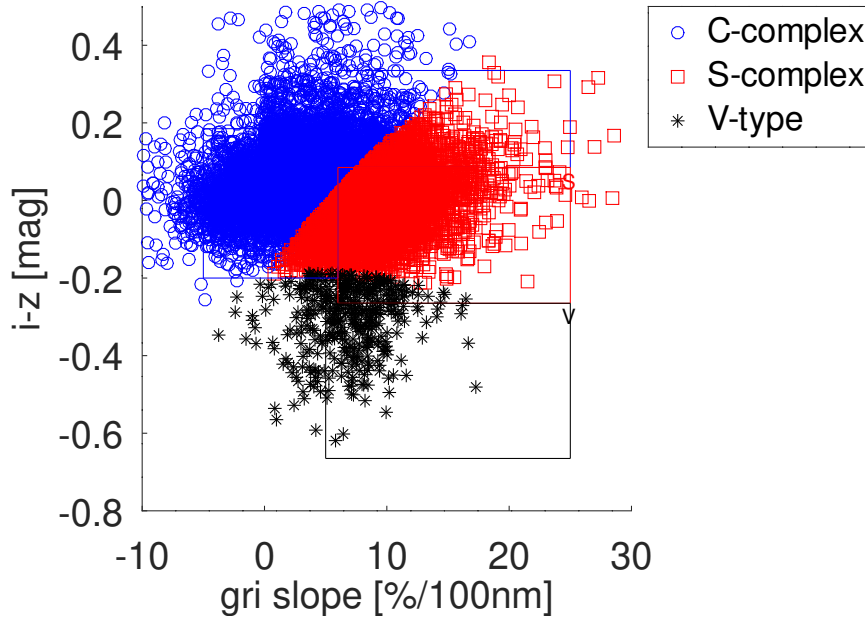


Figura 5.7: Cores $i - z \times$ inclinações de fase gri previstos pelo ML para asteroides no banco de dados DES sem dados do SDSS-MOC4.

quantis de 0,15 a 0,85 para ambas as distribuições de cores, correspondendo ao intervalo $-0,266 < g - r < 1,393$ e $-0,326 < g - i < 1,746$. Após a remoção dos outliers, restaram-se 61.142 asteroides. A princípio, verifica-se onde esses objetos podem estar localizados. Assim, são identificados 71 asteroides com informações taxonômicas: 4 tipo B, 14 tipo C, 3 tipo D, 15 tipo X 29 tipo S, 2 tipo L e 3 tipo V. Esses resultados podem ser verificados na figura 5.8. Asteroides dos tipos B, C, D e X são objetos mais escuros, associados ao complexo C, enquanto os outros tipos, mais brilhantes, são associados ao complexo S. Os resultados mostram que os dois complexos encontram-se razoavelmente separados, estando os asteroides do complexo C localizados na parte esquerda na distribuição, e os asteroides do complexo S concentrados na parte direita, apesar de diferentes taxonomias se sobreporem entre si dentro desses complexos. Novamente, mesmo que os dados DES sejam capazes de discriminar os complexos C e S, não se tem resolução suficiente no domínio $(g - r, g - i)$ para realizar uma análise taxonômica mais aprofundada, incluindo os asteroides do tipo V.

Utilizando o método taxonômico de [DeMeo and Carry \(2013\)](#) para os asteroides listados no SDSS-MOC4, são identificados 3.347 objetos com informações em ambos os bancos de dados, dos quais 1.514 são do complexo C e 1.833 pertencentes com complexo S. A figura 5.9 mostra a distribuição $(g - r, g - i)$ desses objetos, o que confirma os resultados dos dados de pesquisas espectroscópicas: há uma separação clara entre asteroides do complexo C e do complexo S.

No que diz respeito aos valores de albedo, os asteroides do complexo C tendem a possuir baixos valores de albedo geométrico (p_V), enquanto os do complexo S possuem valores maiores. Na busca por objetos nos dados do DES com informações de albedo

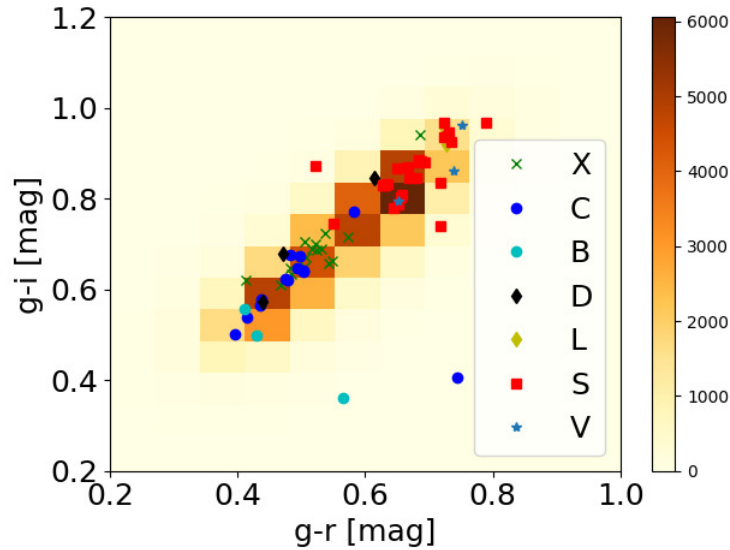


Figura 5.8: Histograma 2D ($g - r, g - i$) para asteroides com dados no DES. O código de cores são os objetos com informações taxonômicas em [Bus and Binzel \(2002\)](#), [Lazzaro et al. \(2004\)](#), e [DeMeo et al. \(2009\)](#)

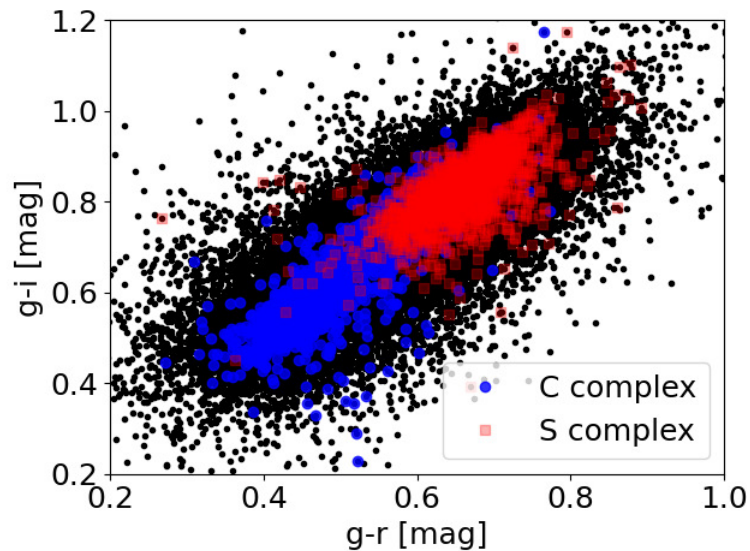


Figura 5.9: Projeção das cores para asteroides nos dados do DES e taxonomia no SDSS-MOC4. Os círculos azuis representam o complexo C, os círculos vermelhos representam o complexo S. Os pontos pretos representam asteroides que não possuem dados do SDSS-MOC4.

no banco de dados da WISE e NEOWISE, AKARI, ou IRAS, foram identificados 5.122 asteroides, conforme mostrado na figura 5.10. Verifica-se que os asteroides com albedo intermediários ($0.05 < p_V < 0.25$) cobrem as cores ($g - r, g - i$) relativamente uniforme, enquanto asteroides mais escuros ($p_V < 0,05$) e muito brilhantes ($p_V > 0,25$) encontram-se separados, confirmando a tendência estabelecida para os dados taxonômicos.

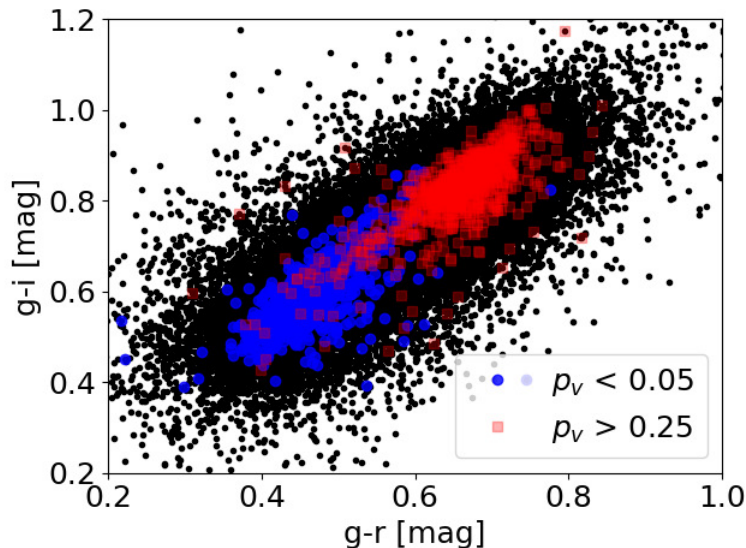


Figura 5.10: Projeção dos asteroides do DES com valores de albedo. Os círculos azuis representam os objetos com albedo p_V menor que 0,05, enquanto os círculos vermelhos representam asteroides com albedo maior que 0,25

A partir dessas análises, algoritmos genético são utilizados para determinar os métodos de ML ideais para prever as classes de asteroides com base nas cores ($g-r$, $g-i$) do DES. Neste contexto, o Linear Support Vector Classifier (Linear SVC, Cortes and Vapnik, 1995) teve o melhor desempenho. O Linear SVC é um tipo de algoritmo ML usado para classificação, onde o objetivo é atribuir cada entrada a uma de um conjunto de categorias ou classes predefinidas. Ele é uma variante do algoritmo Support Vector Machine (SVM) que utiliza a função kernel linear. No SVC linear, o algoritmo tenta encontrar o hiperplano que separa as diferentes classes com a maior margem possível (distância entre o hiperplano e os pontos mais próximos de cada classe). Quanto maior a margem, mais robusta é a classificação. A margem é a distância entre o hiperplano e os pontos mais próximos de cada classe.

Para o presente modelo, utiliza-se um parâmetro C , que controla o compromisso entre atingir um erro de treinamento baixo e um erro de teste baixo, de 0,1. O modelo atingiu uma precisão de 90,9%. A figura 5.11 mostra resultados para 58.118 novos asteroides sem nenhuma informação anterior. A análise sugere que 28.871 desses objetos pertencem ao complexo C, enquanto 29.247 são mais propensos a serem asteroides do complexo S. A maior fração de asteroides do complexo S, em comparação ao complexo C no domínio ($g-r$, $g-i$) com relação ao plano (inclinações de fase gri , $i-z$) pode ser explicada pelo fato de que, no domínio ($g-r$, $g-i$), asteroides do tipo V são considerados parte do complexo S.

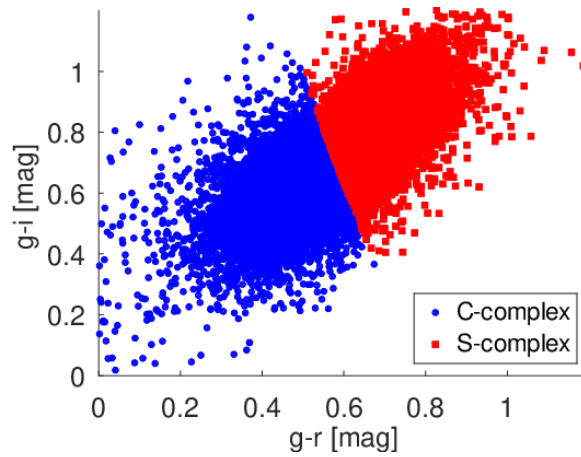


Figura 5.11: Cores $g - r$ e $g - i$ dos dados previstos pelo ML para asteroides no banco de dados DES.

5.0.3 Asteroides do tipo V

Utilizando os dados DES nas inclinações de fase gri e cores $i - z$, foram identificados 410 novos objetos potenciais do tipo V com elementos próprios disponíveis no *AFP*, 85 dos quais estão localizados no cinturão principal central e externo. Asteroides do tipo V possuem composição basáltica e são geralmente reconhecidos como fragmentos de planetesimais que passaram por uma diferenciação completa de metal-silicato: núcleo de ferro, manto de olivina e crosta basáltica (Carruba et al., 2013). Eles estão localizados no cinturão interno na proximidade do asteroide (4) Vesta, o principal e maior objeto desta classe taxonômica, com uma estrutura diferenciada representando um protoplaneta sobrevivente da época mais antiga da formação do Sistema Solar (Russell et al., 2012). Conhecer suas propriedades físicas e dinâmicas é crucial para restringir a formação e a evolução de planetesimais diferenciados, planetas terrestres e o Sistema Solar como um todo (Oszkiewicz et al., 2023). Pesquisas têm mostrado a existência de asteroides tipos V nas proximidades de (4) Vesta e também na população de asteroides próximos à Terra (Binzel and Xu, 1993; Burbine et al., 2001; Florczak et al., 2002).

O espectro de um asteroide basáltico pode ser facilmente identificado pela presença de duas bandas de absorção próximas de 0,9 e 1,9 μm . Este espectro também foi identificado em meteoritos acondritos conhecidos como HED (Howardites, Eucrites e Diogenites), sendo (4) Vesta considerado o corpo-mãe (Ieva et al., 2018; Russell et al., 2012). Portanto, estudo em torno de Vesta e asteroides do tipo V pode nos fornecer informações acerca dos processos de diferenciação planetária e como os planetas rochosos se formaram e evoluíram.

Na figura 5.12 é possível observar a projeção dos elementos próprios desses 410 objetos no plano $(a, \sin(i))$. A evolução dinâmica de objetos do tipo V sugere que pode haver seis regiões possíveis onde o material injetado, seja de uma fonte local ou remota, pode evoluir devido a forças gravitacionais ou não gravitacionais. Três regiões no cinturão

principal central são identificadas por Carruba et al. (2014), nomeados como possíveis localizações de corpos parentais: Hansa, Eunomia, e Agnya/Merxia. Análise similar feita por Huaman et al. (2014), que encontrou três regiões dinâmicas comparáveis no cinturão externo: Dembowska, Eos, e Magnya.

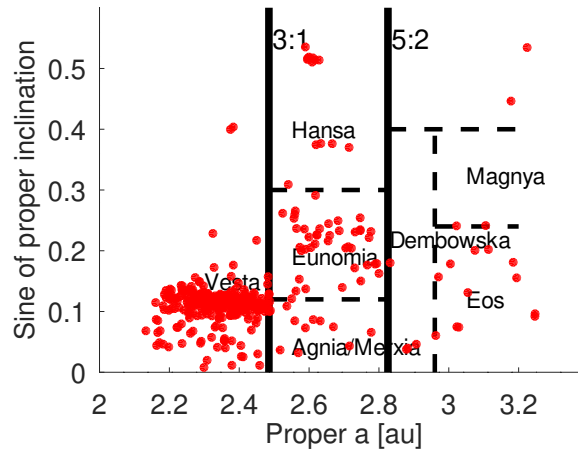


Figura 5.12: Projeção no plano de elementos próprios (a , $\sin(i)$) dos asteroides candidatos a tipo V com os dados do DES. As linhas verticais contínuas identificam as fronteiras dinâmicas do cinturão principal interno, central e externo. As linhas tracejadas mostram as regiões dinâmicas com possíveis fontes de materiais tipo V, conforme identificados por Carruba et al. (2014) e Huaman et al. (2014). Os elementos próprios foram obtidos do AFP.

Os candidatos a asteroide tipo-V do DES são encontrados principalmente onde se espera, próximos à família de Vesta e nas regiões densamente populadas de Eunomia e Eos. Maiores investigações sobre suas propriedades físicas bem como a evolução dinâmica desses objetos é ponto interessante para estudos futuros.

Capítulo 6

Ocultações Estelares por (2207)

Antenor

Apresentamos neste capítulo os resultados de três eventos de ocultação estelar ocorridos em 2021 pelo troiano de Júpiter (2207) Antenor. Tais resultados estão publicados no *Astronomical Journal* (AJ) e podem ser consultados no apêndice A desta tese.

6.1 Ocultações Estelares

Uma ocultação estelar, conforme representado pela figura 6.1, ocorre quando um corpo bloqueia total ou parcialmente a luz de uma estrela para um dado observador. No presente caso, a luz de uma estrela é bloqueada por um pequeno corpo do sistema solar. No momento deste evento, a sombra do corpo manifesta-se através da queda do fluxo total medido da estrela quando o ocultador não possui atmosfera. Dada a velocidade relativa do observador em relação ao corpo, a observação dá origem a uma corda cujo tamanho é dado pela duração do evento de ocultação. O termo imersão refere-se ao desaparecimento da estrela quando ocultada e o termo emersão refere-se ao seu reaparecimento. A precisão do comprimento de uma corda depende da cadência de aquisição de imagens e da precisão dos tempos registrados para cada uma delas.

Quando muitos locais observam a mesma ocultação, cada observador obterá cordas de tamanhos diferentes se tiverem separação perpendicular ao movimento da sombra. Considerando todas essas cordas, é possível determinar um perfil do limbo e calcular o tamanho do corpo (Gomes-Júnior et al., 2022). Essa técnica pode fornecer tamanhos e formas com precisão de km, revelar atmosferas, detectar satélites e anéis do corpo ocultante (Braga-Ribas et al., 2014; Dias-Oliveira et al., 2017; Elliot, 1979; Morgado et al., 2023; Ortiz et al., 2012; Sicardy et al., 2011).

Para a observação de uma ocultação estelar são necessários alguns procedimentos, como a seleção do objeto ocultador, previsões dos eventos e campanhas observacionais,

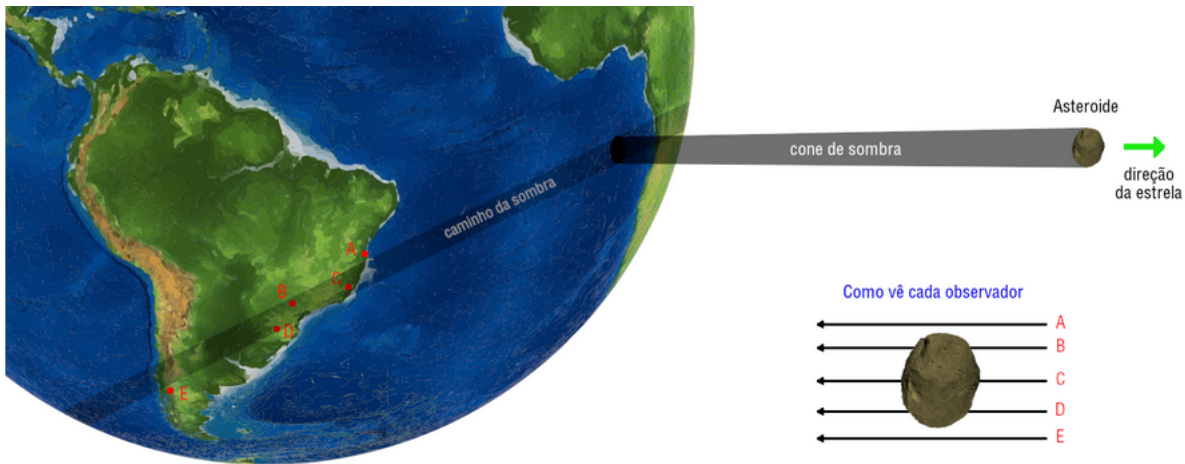


Figura 6.1: Representação esquemática de uma ocultação estelar, onde um corpo opaco entra em frente a uma estrela criando uma região de sombra da estrela na Terra, por um certo intervalo de tempo, podendo determinar com certa precisão o tamanho, a forma e a posição do corpo ocultador. Os observadores localizados nos pontos B, C e D estão localizados na região onde a sombra do pequeno corpo é projetada, detectando uma corda positiva. Os observadores situados em A e E, fora da região da sombra do pequeno corpo, detectam cordas negativas. Fonte: Revista Brasileira de Astronomia, Volume 4, Número 16.

para que então o fenômeno possa ser observado possibilitando uma caracterização física do objeto.

6.1.1 Seleção dos Objetos e Predições

A seleção de objetos a serem estudados através de ocultações estelares depende do objetivo de estudo, levando em consideração obviamente a viabilidade da observação. A escolha de um pequeno corpo do Sistema Solar pode ser feita pelo interesse de uma classe, família ou simplesmente pelo estudo de alguns objetos específicos. No que diz respeito ao estudo de classes e/ou famílias inteiras, usualmente é feita a escolha pelos objetos maiores e mais brilhantes, devido ao fato de podermos refinar mais facilmente suas órbitas (destacamos que, para a ocultação em si, não importa o quão fraco é o objeto ocultador). Vale destacar também que o bom conhecimento da astrometria é um fator relevante. A seleção de objetos individuais, em geral, é feita por apresentar interesses específicos, como por exemplo a comprovação de uma possível binaridade, presença de anéis, de atmosferas, etc. No entanto, é comum também selecionar-se grupos de objetos sobre os quais pouco ou nada se conhece.

Um passo essencial para que se possa observar uma ocultação estelar é a predição dos eventos. Essa etapa nos permite conhecer quando ocorrerá o evento e onde ele será visível. Para a predição de uma ocultação, são necessários o conhecimento da posição da estrela a ser ocultada e das efemérides do corpo ocultador. Para os eventos em específico, presentes

neste trabalho, as predições foram realizadas no âmbito do projeto Lucky Star¹ que teve financiamento pelo European Research Council (ERC).

Espera-se, a partir do Legacy Survey of Space and Time (LSST), um aumento significativo na quantidade de pequenos corpos conhecidos do Sistema Solar. Assim, uma solução computacional de alto desempenho para disponibilizar publicamente predições de ocultações estelares para todos esses objetos é o Portal do Sistema Solar². Essa ferramenta, desenvolvida pelo LIneA, oferece uma solução para as predições de eventos de ocultação num contexto de grandes volumes de dados. A inclusão de outras tarefas ligadas à análise das ocultações também estão previstas.

Realizada a predição dos objetos, são feitas campanhas observacionais para que as ocultações sejam observadas. As campanhas observacionais para as ocultações pelo objeto tratado neste trabalho foram gerenciadas pelo Occultation Portal³, uma plataforma desenvolvida para gerenciar as campanhas observacionais do projeto ERC Lucky Star para a observação de ocultações estelares (Kilic et al., 2022). As posições das estrelas ocultadas são provenientes do Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2022). As efemérides do corpo ocultante são feitas utilizando o método de integração numérica através das equações de movimento denominado NIMA (Numerical Integration of the Motion of an Asteroid, Desmars et al. 2015). Essa ferramenta foi originalmente desenvolvida para determinar a órbita de asteróides próximos da Terra (NEAs), no contexto da detecção do efeito Yarkovsky (Desmars, 2015). No entanto, ela tem sido utilizada com sucesso para a determinação das órbitas de asteróides, TNOs ou Centauros.

6.1.2 Fotometria e Obtenção das Curvas de Luz

O conjunto de dados descritos neste trabalho são analisados utilizando os procedimentos de fotometria padrão do pacote PRAIA (Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically, Assafin 2023b), por meio da fotometria diferencial de abertura. Essa ferramenta é um pacote autônomo desenvolvido em FORTRAN sem interfaces gráficas composto por múltiplas tarefas independentes. Cada tarefa possui um código fonte/executável e um arquivo de texto (formato ASCII) com parâmetros de entrada editáveis. Além da fotometria, o PRAIA possui rotinas específicas também para astrometria (Assafin, 2023a) de observações em formato (padrão ou não) FITS (Flexible Image Transport System, Wells et al. 1981). O PRAIA dá controle total para o usuário manipular dados de entrada e saída com ferramentas estatísticas externas, de plotagem e visualização. Os parâmetros astrométricos e fotométricos são calculados automaticamente a partir das informações contidas nos cabeçalhos das imagens FITS, como coordenada de apontamento, hora da observação, tempo de exposição, binagem, etc. No contexto da fotometria, a partir da de-

¹Projeto Lucky Star Website: <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>

²Portal do Sistema Solar: <https://docs.linea.org.br/sci-platforms/sso.html>

³Occultation Portal Website <https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/>

terminação de um objeto guia na imagem de referência da série (geralmente, a primeira), o PRAIA é capaz de acompanhar os alvos e calibradores em todas as imagens desta série. Isto é particularmente útil quando o alvo possui movimento significativo em relação às estrelas ou, o que é mais comum de acontecer, o telescópio (amadores, por exemplo) possuir dificuldades em manter fixo o campo de visada.

O fluxo da estrela ocultada é corrigido pelo fluxo das estrelas de referência para variações de transparência do céu e a curva de luz obtida é posteriormente normalizada pelo fluxo da estrela mais o fluxo do ocultador. Esta etapa é feita aplicando um ajuste polinomial ao fluxo observado antes e depois da ocultação estelar, mas geralmente ainda quando ocultador e ocultado não estão resolvidos angularmente. Para a obtenção das curvas de luz, utiliza-se o bloco *lightcurve* do PRAIA, apresentando as relações de fluxo de alvo/calibração como uma função do tempo, que utiliza como entrada o arquivo gerado durante a redução fotométrica. A partir da análise da curva de luz, pode-se verificar a variação do fluxo da estrela ocultada.

Para a determinação dos tempos de imersão (desaparecimento) e emersão (reaparecimento) pelo corpo ocultante é utilizada a biblioteca SORA (Stellar Occultation Reduction and Analysis, [Gomes-Júnior et al. 2022](#)). A biblioteca é desenvolvida em Python com ferramentas para lidar com informações da estrela, do corpo, do observador e da curva de luz que podem ser integradas em uma metodologia de redução dinâmica de dados gerados pelos eventos de ocultação. A maioria dos parâmetros do SORA podem ser alterados, permitindo assim uma redução mais personalizada. Essa ferramenta ajusta para cada curva de luz um modelo de ocultação de borda fina, que é combinado com difração de Fresnel, a largura de banda do CCD, o diâmetro estelar em km e o tempo de integração finito ([Braga-Ribas et al., 2013](#); [Widemann et al., 2009](#)). A escala de Fresnel é dada por $f = \sqrt{\lambda D_o/2}$, para a difração observada no comprimento de onda λ a partir de uma distância do pequeno corpo D_o . Um valor típico para observações no visível é de $\lambda \sim 550$ nm. Os valores para a escala de Fresnel e do diâmetro da estrela projetado para distância do objetos são apresentados na tabela 6.1. O procedimento de ajuste é feito por minimização do χ^2 , e um ajuste adequado é obtido quando χ^2 por grau de liberdade (χ^2_{pdf}) está próximo da unidade.

Neste trabalho, utilizamos dados de três ocultações estelares pelo troiano de Júpiter (2207) Antenor, com o objetivo de estimar a forma e o tamanho deste objeto. A realização das observações envolve uma grande colaboração. A participação do autor desta tese para as ocultações aqui apresentadas se deu em maior parte na predição do evento e sobretudo na obtenção e análise das curvas de luz. A primeira ocultação ocorrida em 12 de Junho de 2021 teve uma detecção positiva na Alemanha e duas negativas na Espanha. Em seguida, dois eventos multicordas foram observados, em 10 de Julho de 2021, visível da Europa, e em 26 de Agosto de 2021, observado da América do Norte. Detalhes sobre as ocultações observadas, como a data e hora da ocultação e parâmetros da estrela, podem

ser encontrados na Tabela 6.1⁴, e as circunstâncias de observação desses eventos, onde podemos encontrar informações sobre as coordenadas do local e detalhes sobre o telescópio e a câmera utilizados e se a detecção da ocultação foi positiva ou não, são mostradas na Tabela 6.2.

⁴As coordenadas das estrelas (RA e Dec) juntamente com suas incertezas associadas foram propagadas para a época de ocultação através do formalismo sugerido por [Butkevich and Lindegren \(2014\)](#) usando os parâmetros astrométricos (posições, movimentos próprios, paralaxe e velocidade radial) do Gaia EDR3 ([Gaia Collaboration, 2022](#)).

Data e hora da Occ. (UTC)	Gaia EDR3 source identifier	Ascensão Reta ¹ (mas)	Declinação ¹ (mas)	G mag da estrela de Antenor	V mag de Antenor	Velocidade do Evento (km/s)	Escala (km) de Fresnel	Diâmetro da estrela (km)
2021-06-12 01:49:42.98	4100200978834179712 18 ^h 45 ^m 29 ^s .6986	(± 0.019)	-15° 38' 55" .771	13.889	16.9	14.6	0.47	0.24
2021-07-10 00:56:52.52	4103087299953614720 18 ^h 31 ^m 04 ^s .3264	(± 0.056)	-15° 58' 45" .565	12.608	16.9	16.0	0.47	2.49
2021-08-26 04:01:15.58	4097470749676146048 18 ^h 15 ^m 46 ^s .3889	(± 0.016)	-17° 02' 49" .535	12.016	16.6	4.0	0.49	0.23

Tabela 6.1: Parâmetros da estrela ocultada para cada evento observado como obtido a partir do Gaia DR3. Apresentamos a magnitude V de Antenor, obtida do [NASA Jet Propulsion Laboratory \(2025\)](#), que pode ser utilizada como referência, mas que não pode ser comparada diretamente com a magnitude G. O diâmetro aparente da estrela é projetada à distância do objeto ocultador.

Sítio	Observador	Longitude Latitude Altitude (m)	Telescópio (mm) Câmera Time Source	Tempo de Expo. (s) SNR	Detecção Cond. do céu Vento
12-06-2021					
Kaufering, Germany	Gregor Krannich	48° 05' 22.7793" N 10° 50' 57.9958" E 596	350 QHY174M-GPS Camera sync to GPS	0.650 4.00	Positivo Limpo Calmo
Barcelona, Spain	Jordi Marco	41° 23' 57.997" N 02° 09' 40.0223" E 77	235 ZWO ASI120MM sync to NTP	1.175 na	Negativo Limpo Brisa leve
Barcelona, Spain	Carles Schnabel	41° 29' 36.996" N 01° 52' 21" E 180	400 WATEC-910HX IOTA-VTI	0.160 na	Negativo Limpo Calmo
10-07-2021					
Observatoire de la Côte d'Azur Nice, France	Matthieu Conjat	43° 43' 32.9016" N 7° 17' 59.3988" E 300.00	400 Asi 174mm Computer sync to NTP	0.200 7.14	Positivo Limpo Calmo
Botorrita, Spain	Oscar Canales-Moreno	41° 29' 50.55" N 1° 1' 15.1212" W 403.00	500 Watec 120N KIWI OSD	0.160 10.20	Positivo Limpo Calmo
Linhaccira, Portugal	Rui Gonçalves	39° 31' 21.6768" N 8° 23' 1.68" W 90.00	254 Watec 910-HX GPSBOXSPRITE	0.320 7.63	Positivo Limpo Calmo
UniversCity Caussols, France	Luana Liberato	43° 45' 9.6012" N 6° 55' 18.192" E 1266.25	500 QHY 600M Camera sync to GPS	0.500 14.70	Positivo Limpo Brisa leve
Javalambre Astrophysical Observatory Teruel, Spain	Ramón Iglesias-Marzoa	40° 2' 30.48" N 1° 0' 58.68" W 1957.00	Tx40 400 ProLine PL4720 Computer sync to NTP	2.000 27.78	Negativo Limpo Brisa leve
Observatori Astronòmic del Parc del Garraf Barcelona, Spain	Carles Schnabel	41° 18' 23.796" N 1° 50' 18.024" W 297.00	280 Watec - 120N IOTA-VTI	0.640 9.00	Negativo Limpo Calmo
26-08-2021					
Wickenburg, Arizona United States	Paul D. Maley	33° 58' 46.56 N 112° 42' 42.48 W 673.00	200 Watec 910-HX Camera sync to GPS	0.066 7.25	Positivo Limpo Calmo
Dateland, Arizona United States	Norman Carlson	32° 45' 25.854 N 113° 38' 26.6759 W 117.00	235 RunCam Night Eagle Astro Camera sync to GPS	0.300 6.17	Positivo Limpo Calmo
Sentinel, Arizona United States	Kevin Wagner Alexandra Burnett Benoit Blanc	32° 49' 32.5" N 113° 12' 26.8" W 227	eVscope 1 114 IMX224 Sync to NTP	0.300 6.85	Positivo Limpo Calmo
Kelsey, Manitoba Canada	Delwin Shand	53° 49' 18.4" N 101° 16' 34.7" W	eVscope 1 114 IMX224 Sync to NTP	0.300 4.71	Positivo Limpo Calmo
Scottsdale, Arizona United States	Tony George	33° 49' 0.0984 N 111° 52' 7.2984 W 843.00	300 Watec 910-HX Sync to GPS	0.067 na	Negativo Limpo Calmo

Tabela 6.2: Circunstâncias Observacionais para as ocultações por (2207) Antenor. Os dados para as detecções negativas de 12 de junho e 26 de agosto não estavam disponíveis (na).

6.1.3 Reconstrução Geométrica

Obtido os tempos de imersão e emersão da estrela (tabela 6.3), utilizando os procedimentos da biblioteca SORA conforme descrito na seção anterior, eles são projetados no plano do céu em cordas e as extremidades dessas cordas são ajustadas para o formato do corpo durante a ocultação. A precisão da corda depende primariamente da precisão na datação das imagens e do ciclo de integração (tempo de exposição mais tempo de leitura).

Para o caso de (2207) Antenor, objeto utilizado neste trabalho, não encontramos publicado na literatura nenhuma forma 3D. Assim, como primeira aproximação, assumimos que a projeção do corpo ocultante no momento das ocultações tem um formato elíptico.

Descrevemos a eclipse através de cinco parâmetros: as coordenadas centrais (f_0, g_0) para cada ocultação e que medem os desvios em RA e DEC com respeito à efeméride adotada, o raio equatorial aparente (a'), o achatamento (ϵ) e o ângulo de posição do polo (P) (Gomes-Júnior et al., 2022; Morgado et al., 2021).

Os tempos de imersão e emersão obtidos e suas barras de erro são mostrados na Tabela 6.3 juntamente com o tamanho da corda, o χ_{pdf}^2 mínimo obtido e o ruído da curva de luz (σ_{LC}).

Conforme será apresentado na seção 6.1.4, observamos quase a mesma fase rotacional de Antenor nos eventos de julho e agosto. Assim, combinamos essas duas ocultações ajustando-as com 7 parâmetros variáveis (a forma elíptica, descrito acima, mais um centro para cada ocultação). O evento observado em junho é tratado separadamente. Os parâmetros ajustados e suas incertezas 1- σ são determinados minimizando o χ^2 reduzido por meio de uma abordagem de Monte Carlo. Para isso, utilizamos um algoritmo baseado na descrição apresentada por Gomes-Júnior et al. (2022). O resultados obtidos pela ocultação por (2207) Antenor são detalhados nas seções seguintes deste capítulo. Apresentamos a determinação do tamanho e forma de Antenor no momento de duas ocultações multicordas (10 de julho de 2021 e 26 de agosto de 2021). Apresentamos também os resultados da ocultação de 12 junho de 2021, que demonstrou um comportamento intrigante, que pode ser interpretado como uma característica topográfica muito grande do corpo ou que pode fornecer evidências adicionais de que este objeto é binário.

12 de junho de 2021					
Sítio	Imersão (UT)	Emersão (UT)	Tamanho da corda (km)	χ_{pdf}^2	σ_{LC}
Kaufering, Germany,	01:47:56.36 \pm 0.13	01:48:02.37 \pm 0.16	89.93 \pm 3.30	1.25	0.232
Kaufering, Germany, Seg. 1	01:47:56.36 \pm 0.13	01:47:58.74 \pm 0.14	35.56 \pm 2.88	0.76	0.232
Kaufering, Germany, Seg. 2	01:47:59.50 \pm 0.14	01:48:02.37 \pm 0.16	42.77 \pm 3.21	0.76	0.232
10 de julho de 2021					
Nice, France	00:53:35.10 \pm 0.03	00:53:40.53 \pm 0.03	88.29 \pm 0.66	0.97	0.140
Botorrita, Spain	00:54:07.86 \pm 0.02	00:54:14.18 \pm 0.03	105.90 \pm 0.53	1.04	0.098
Linhaceira, Portugal	00:54:41.54 \pm 0.04	00:54:48.26 \pm 0.04	109.58 \pm 1.00	0.96	0.131
Caussols, France	00:53:36.93 \pm 0.04	00:53:42.58 \pm 0.04	91.95 \pm 0.92	0.98	0.080
26 de agosto de 2021					
Wickenburg, USA	03:42:35.97 \pm 0.01	03:42:59.86 \pm 0.01	100.775 \pm 0.04	0.83	0.150
Dateland, USA	03:43:02.87 \pm 0.02	03:43:26.74 \pm 0.02	85.443 \pm 0.09	0.96	0.162
Sentinel, USA	03:42:57.50 \pm 0.03	03:43:21.95 \pm 0.05	103.217 \pm 0.19	0.90	0.146
Kelsey, USA	03:37:40.52 \pm 0.06	03:38:04.41 \pm 0.05	99.006 \pm 0.25	0.90	0.175

Tabela 6.3: Tempos obtidos ajustados para cada curva de luz com detecção positiva.

6.1.4 Ocultações Estelares em 10 de julho de 2021 e 26 de agosto de 2021

O evento de 10 de julho foi observado de seis sítios, dos quais quatro deles tiveram detecções positivas. A observação da França teve apoio do telescópio UniversCity que foi desenvolvido para observar roboticamente e sistematicamente ocultações estelares por

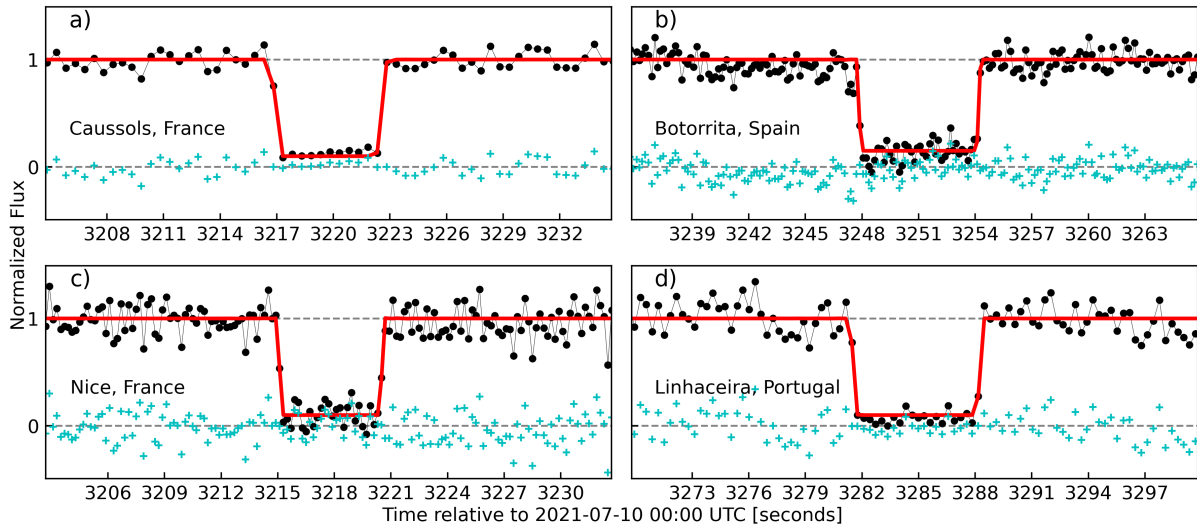


Figura 6.2: Curvas de luz normalizadas para a ocultação de 10 de Julho de 2021. A linha preta indica os dados observados, enquanto a linha vermelho representa o modelo da curva de luz. Os marcadores em ciano representam os resíduos. As curvas de luz são das observações de (a) Caussols (França), (b) Botorrita (Espanha), (c) Nice (França), and (d) Linhaceira (Portugal).

pequenos corpos (Ferreira et al., 2020). O evento teve uma velocidade de sombra típica de 15,981 km/s. Já o evento de 26 de Agosto, com três detecções positivas nos Estados Unidos, teve uma velocidade de sombra típica de 4,010 km/s.

As curvas de luz foram obtidas utilizando os procedimentos do pacote PRAIA. A partir de sua normalização, obteve-se os tempos de imersão e emersão da estrela ocultada utilizando os procedimentos da biblioteca SORA, conforme explicado na seção 6.1.2. As curvas de luz normalizadas obtidas para esses dois eventos podem ser observadas nas figuras 6.2 e 6.3. Os tempos de imersão e emersão são utilizados para projetar as cordas no plano do céu. A partir dos extremos de cada corda, é feito o ajuste da forma aparente para seus respectivos eventos, estabelecendo assim uma reconstrução geométrica do objeto.

Um ponto interessante a ser levantando é que, considerando o período rotacional de de (2207) Antenor de $7,964 \pm 0.001$ horas (Stephens and Warner, 2019), observa-se uma diferença de fase entre os dois eventos de aproximadamente 0.016 ± 0.018 , representando uma diferença de 5.80 ± 6.42 graus. Considerando seu período orbital de 11,76 anos (período orbital de Jupiter) e tomando seus vetores posição nas datas de 10 de julho e 26 de agosto de 2021, encontra-se uma variação angular de 3,86 graus. Além disso, deve-se notar que os tempos de luz nessas datas diferem em menos de 4 minutos. Se começarmos a contar o tempo na data em que o objeto estiver mais próximo, observaremos depois de algum tempo uma fase que é menos de 4 minutos - aproximadamente 3 graus - atrasada em relação àquela que teria sido observada sem nenhuma mudança na distância. A combinação desses três fatores (período rotacional, movimento orbital e variação do

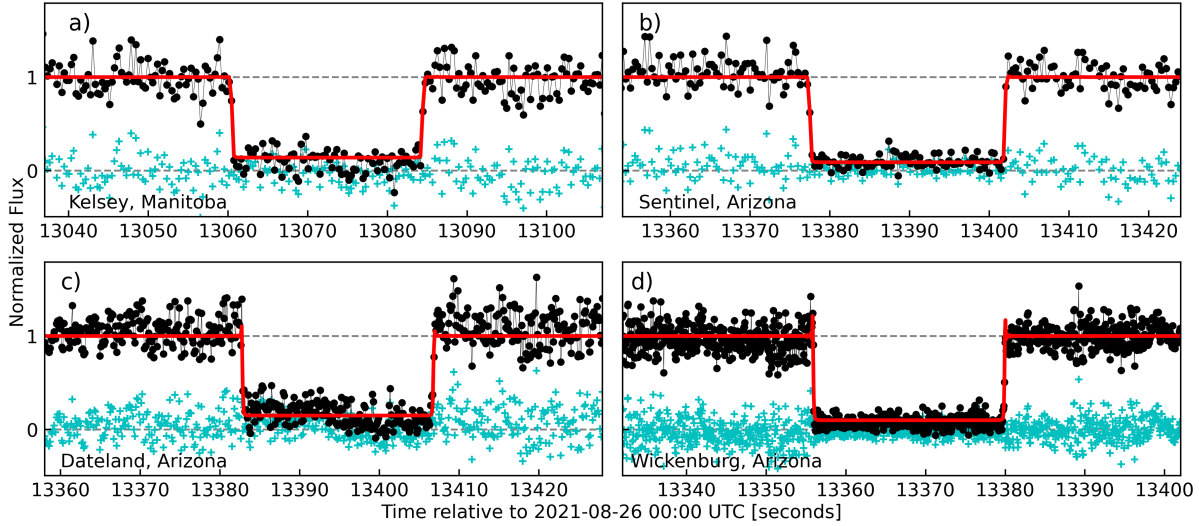


Figura 6.3: Curvas de luz da ocultação de 26 de agosto de 2021. A linha preta indica os dados observados, enquanto a linha vermelho representa o modelo da curva de luz. Os marcadores em ciano representam os resíduos. As curvas de luz são das observações de (a) Kelsey (Canadá), (b) Sentinel (EUA), (c) Dateland (EUA), and (d) Wickenburg (EUA).

tempo de luz) significa que observamos aproximadamente a mesma face durante ambos os eventos, assumindo que Antenor não é altamente irregular.

A elipses ajustadas com a região de $1\text{-}\sigma$ para as cordas de ambos os eventos estão representadas na figura 6.4. Através da análise desses eventos multicorda, foi ajustada uma forma elíptica com um semieixo maior de 54.30 ± 0.99 km e achatamento de 0.11 ± 0.05 , nos fornecendo assim um raio de área equivalente de 50.86 ± 1.13 km. O raio de área equivalente (R_{eq}) é o raio de uma circunferência cuja área é a mesma da elipse ajustada ($R_{eq} = \sqrt{a \times b}$, em que a é o semieixo maior e b é o semieixo menor, Gomes-Júnior et al., 2022). Obteve-se uma dispersão radial de 2,20 km. A dispersão radial é a uma forma de quantificar o desvio entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo. Ela pode oferecer pistas sobre potenciais características topográficas (Gomes-Júnior et al., 2022). Além da forma elíptica obtida para o corpo e assumindo características topográficas até esse valor, obtem-se um qui-quadrado mínimo por grau de liberdade (χ^2_{pdf}) de 1,35. Os dados obtidos para o ajuste da elipse são apresentados na tabela 6.4. Vale destacar que Hanuš et al. (2023) também apresenta resultados para essas duas ocultações. Eles determinaram um diâmetro equivalente de 101 ± 3 km, que está em boa concordância com 101.7 ± 2.3 km que obtivemos neste trabalho. Os dados de 26 de agosto de 2026 em Hanuš et al. (2023) mostram apenas duas cordas enquanto apresentamos quatro. Eles consideram as ocultações individualmente, não combinadas conforme fizemos. No entanto, nós apresentamos esses resultados em imagens separadas para que as incertezas sejam mais fiéis a metodologia que utilizamos. A solução combinada fornece um diâmetro equivalente mais preciso em comparação ao obtido pela análise das observações de julho

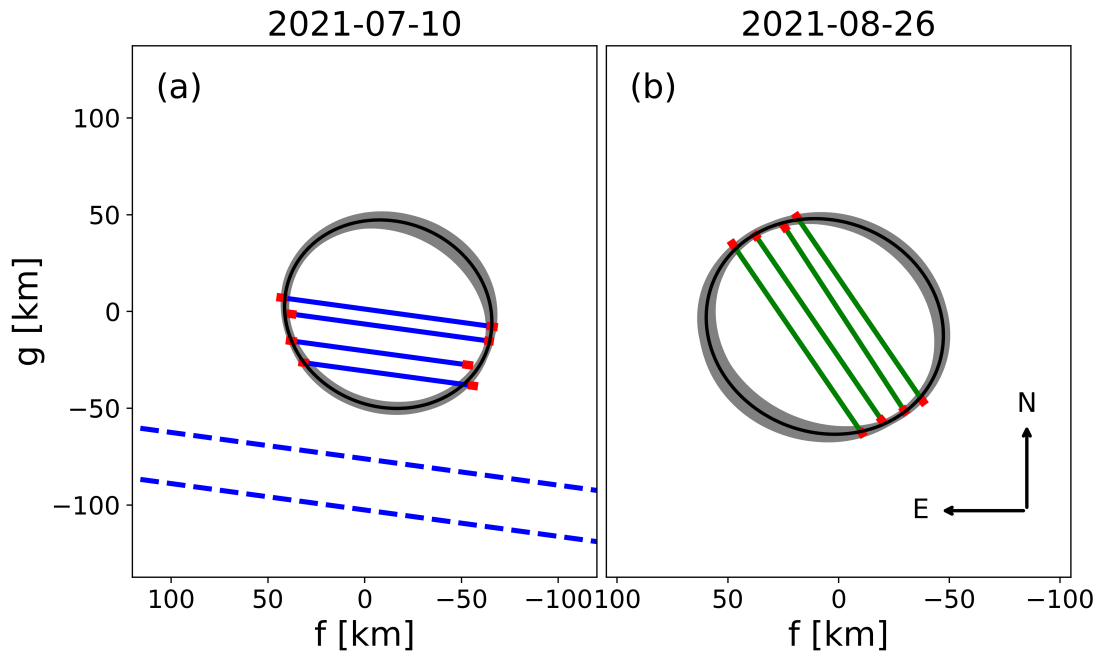


Figura 6.4: Cordas projetadas no plano do céu para Antenor (em azul e verde) e suas respectivas incertezas (em vermelho). A linha preta representa a elipse melhor ajustada com as regiões de 1σ em cinza. O painel esquerdo (a) representa o evento de 10 de julho e o painel direito (b) representa o evento de 26 de agosto. As linhas tracejadas representam as cordas negativas do evento de julho.

e agosto separadamente. Nós também apresentamos resultados astrométricos tendo e como base a efeméride gerada pelo NIMA (capítulo 7). Além disso, dados no térmico publicados pela NEOWISE (Grav et al., 2012) apresentam um raio no valor de 48.8 ± 0.2 km, o que é próximo ao aqui encontrado.

Tabela 6.4: Parâmetros físicos para a elipse ajustada

	10 de julho de 2021	26 de agosto de 2021
f_0 (km)	-12.14 ± 1.21	$+6.23 \pm 2.73$
g_0 (km)	-1.41 ± 2.65	-6.78 ± 1.71
Semieixo maior (km)		54.30 ± 0.99
Semieixo menos (km)		47.91 ± 2.15
Raio equivalente (km)		50.86 ± 1.13
Achatamento		0.114 ± 0.051
Ângulo de Posição (graus)		159.3 ± 10.3

6.1.5 Ocultação Estelar de 12 de junho

A ocultação de 12 de junho teve apenas uma detecção positiva com uma velocidade de sombra típica de 14,630 km/s. Este evento apresentou um comportamento interessante no

crescimento do fluxo no meio da ocultação, ou seja, o reaparecimento da estrela ocultada durante o fenômeno. A figura 6.5 apresenta uma sequência de imagens e pontos do evento, onde nós podemos observar um aumento do fluxo estelar durante a ocultação no ponto (3).

Considerando essa peculiaridade, foram ajustados dois possíveis modelos de curva de luz: (i) um modelo de ocultação única; e (ii) um modelo de duas ocultações, ambos afetados pelos mesmos efeitos (difração, diâmetro estelar e resposta instrumental). Para o primeiro modelo, dois parâmetros foram ajustados: os tempos de imersão e emersão. Já para o segundo modelo foram considerados quatro parâmetros, ou seja, os tempos de imersão e emersão para cada ocultação. Os instantes da ocultação utilizando ambos os modelos podem ser vistos na Tabela 6.3

Com o objetivo de verificar qual modelo melhor se ajustava aos dados presentes (caixa única ou caixa dupla), foi aplicado o teste estatística *Fisher-Snedecor F-test* aos resíduos de ambos os modelos. O *F-test* compara as variâncias de duas amostras sob a hipótese nula de que elas são provenientes de uma mesma distribuição. Para um valor f menor que o valor crítico, falhamos em refutar a hipótese nula, o que significa que não há variações significativas entre ambas as distribuições. Assim, foram considerados os pontos próximo à ocultação e, como resultado, foi obtido um valor f de 1,5288 com um valor crítico de 1,4451 para uma probabilidade de 80%. Assim, pode-se concluir que, considerando a probabilidade de 80%, o modelo (ii), caixa dupla, melhor se enquadra nos dados obtidos. A figura 6.5 mostra também a curva de luz para esse evento apresentando os modelos para caixa única (vermelho) e para caixa dupla (azul).

Mesmo que isso não seja uma evidência tão forte (superior a 99%, por exemplo), é um indicativo de que não se trata de um simples ruído ou qualquer tipo de contaminação. Tal resultado leva-nos a crer que Antenor tem uma forma mais complexa do que um simples elipsoide pode descrever. Duas possíveis explicações podem ser: Antenor possui uma grande característica topográfica ou este objeto é de fato um binário. Resultados de observações para curvas de rotação apresentados por [Stephens et al. \(2018\)](#) sugerem fortemente que Antenor é de fato um candidato a binário. (617) Patroclus, localizado no ponto lagrangiano L5, foi o primeiro troiano de Jupiter reportado como binário ([Merline et al., 2001](#)). Em caso de confirmação para (2207) Antenor, ele será mais um entre outros troianos de Júpiter já confirmados como binário.

Utilizando os instantes da ocultação, as cordas foram projetadas no plano do céu. Mais uma vez, assumindo o período rotacional para (2207) Antenor de $7,964 \pm 0.001$ horas, foi estimado a diferença de fase rotacional entre essa ocultação (12 de junho de 2021) e as demais (10 de julho e 26 de agosto de 2021), obtendo um valor de 0.286 ± 0.028 ou 102.92 ± 10.23 graus, o que significa que neste caso está sendo observada uma face para (2207) Antenor completamente diferente das duas anteriores. Estimou-se também o comprimento do segmento entre as cordas e foi encontrado o tamanho de 11.38 ± 2.98 km.

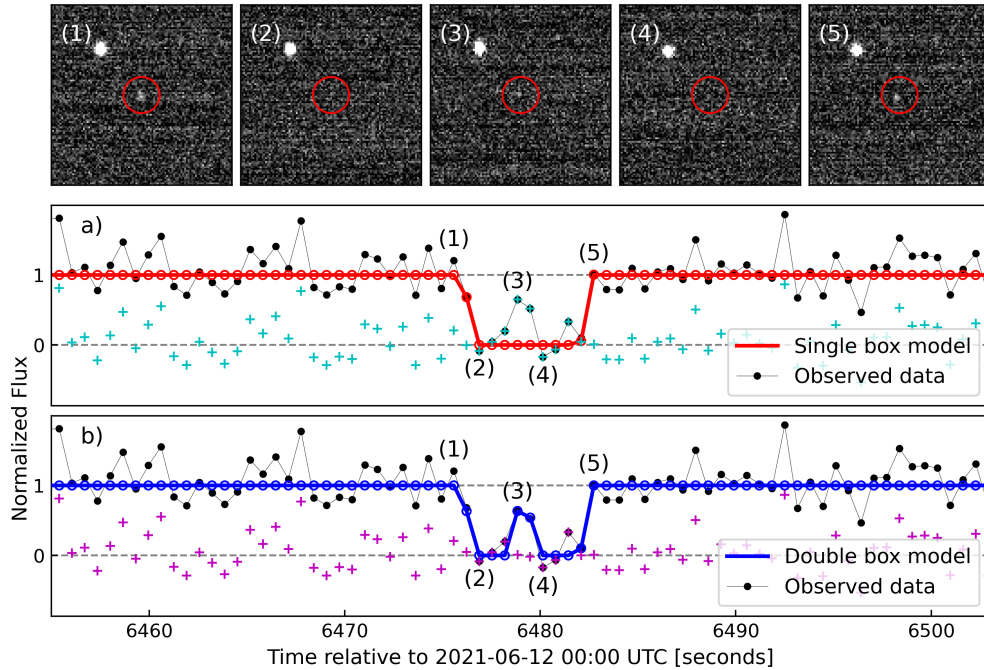


Figura 6.5: Sequência de imagens que mostram o momento da ocultação de Antenor em 12 de junho de 2021. Os pontos (1), (2), (3), (4) e (5) representam cinco momentos do evento da ocultação. O momento em que há um aumento do fluxo da estrela durante a ocultação é representado pelo ponto (3). Dupla-corda observada para ocultação de 12 de junho de 2021. A figura mostra a queda dupla para os dados observados (linha preta), a caixa única (linha vermelha) e caixa dupla (linha azul). Após aplicar o teste estatístico F -test, verificou-se que o modelo de caixa dupla melhor se aplica considerando uma probabilidade de 80%.

Com a ausência de informações precisas sobre a forma do objeto não se pode identificar exatamente onde está o centro de Antenor. Sendo assim, não é possível dizer com exatidão se a corda se encontra próxima à borda ou no centro. Entretanto, como uma estimativa de primeira ordem, considera-se uma solução circular de raio $50,86 \pm 1,13$ km como o valor obtido na subseção 6.1.4, resultando em duas soluções possíveis, conforme observado na figura 6.6. Uma solução é com o centro ao norte da corda (preta), a outra solução é com o centro ao sul (azul). Uma abordagem mais conservadora é combinar ambas as posições, tendo o valor médio como o valor melhor ajustado, com uma incerteza maior (Morgado et al., 2022; Rommel et al., 2020). Torna-se improvável que a solução norte esteja correta, pois apresenta um deslocamento maior que o valor esperado da incerteza da efeméride de Antenor, conforme é mostrado no capítulo 7.

Com base na aproximação circular, é estimado que a corda esteja em torno de 25,43 km do centro de (2207) Antenor. Além disso, é improvável que esse grande comprimento

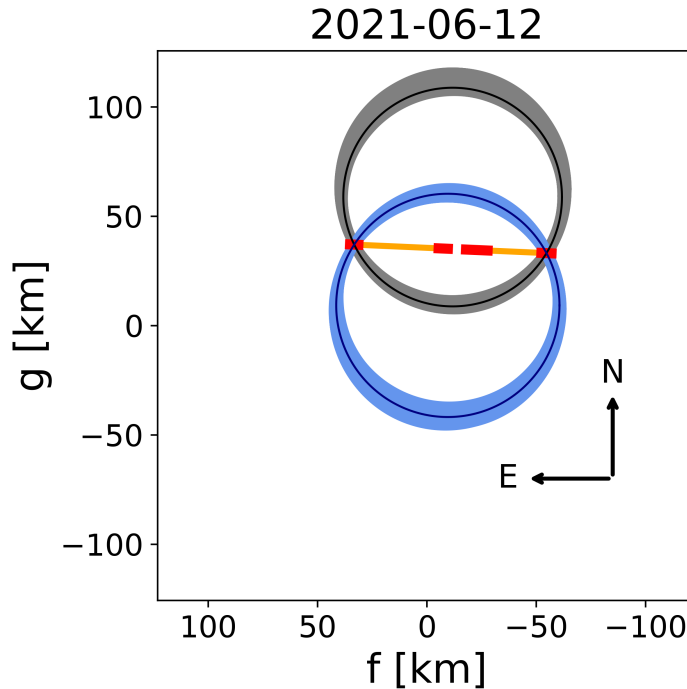


Figura 6.6: Ajuste da dupla-corda e elipses com suas respectivas regiões de 1σ . Duas possíveis soluções são obtidas, uma ao centro norte (preta) e outra ao sul (azul). A solução azul é melhor solução.

do espaço entre as cordas represente apenas uma característica topográfica. Uma característica desse tamanho, que representa uma fração significativa do raio do corpo e não próxima do limbo, pode indicar melhor alguma binariedade, como já foi sugerido por [Stephens et al. \(2018\)](#). Vale destacar que a peculiaridade na curva de luz de Antenor apontando uma possível binariedade não era por nós esperada. Sendo assim, esses resultados fortalecem a importância de constantes observações de pequenos corpos e das contribuições da técnica de ocultação estelar.

6.1.6 Cálculo do Albedo de (2207) Antenor

A obtenção de um valor preciso para o diâmetro de Antenor, projetado no plano do céu, nos possibilita a determinação de seu albedo geométrico (ρ) utilizando a equação 2.1. No entanto, devido ao seu período orbital relativamente curto ao redor do Sol (quando comparamos com TNOs, por exemplo), conforme apontado por ([Carry et al., 2024](#)), devemos ter atenção quanto a dependência de sua magnitude absoluta e o ângulo de aspecto⁵.

Tendo isto em conta, utilizamos então a ferramenta **FINK Broker**⁶ para obtermos um conjunto de 14 magnitudes aparentes no filtro g e 12 magnitudes aparentes no filtro r

⁵Ângulo de aspecto é o ângulo entre o eixo de rotação de um pequeno corpo e a direção de visualização.

⁶O FINK processa diariamente o fluxo público de alertas do Zwicky Transient Survey (ZTF): <https://fink-broker.org/>.

de Antenor, obtidas pelo ZTF (Zwicky Transient Facility [Masci et al., 2019](#)) em junho, julho e agosto de 2021, ou seja, próximo às datas dos eventos aqui considerados, conforme apresentado na tabela 6.5.

Data de Obsevação (UTC)	Mag. Aparente	filtro
10/06/21 08:43:29.001	16.24 ± 0.03	<i>g</i>
14/06/21 09:01:44.000	15.80 ± 0.04	<i>r</i>
20/06/21 07:32:42.000	16.15 ± 0.03	<i>g</i>
21/06/21 08:04:33.004	15.81 ± 0.03	<i>g</i>
22/06/21 08:02:33.003	16.11 ± 0.03	<i>g</i>
26/06/21 05:34:45.002	16.05 ± 0.04	<i>g</i>
28/06/21 09:16:17.996	15.47 ± 0.04	<i>r</i>
01/07/21 07:02:56.000	16.01 ± 0.04	<i>g</i>
01/07/21 08:04:13.002	15.55 ± 0.03	<i>r</i>
06/07/21 08:02:41.997	15.57 ± 0.03	<i>r</i>
06/07/21 08:35:17.998	16.12 ± 0.03	<i>g</i>
08/07/21 07:33:23.999	15.61 ± 0.03	<i>r</i>
08/07/21 08:33:59.996	16.15 ± 0.04	<i>g</i>
10/07/21 07:32:24.003	16.14 ± 0.03	<i>g</i>
12/07/21 06:04:20.004	16.16 ± 0.04	<i>g</i>
12/07/21 07:04:33.001	15.75 ± 0.03	<i>r</i>
14/07/21 07:02:56.000	15.69 ± 0.03	<i>r</i>
24/07/21 07:02:23.997	15.72 ± 0.04	<i>r</i>
28/07/21 06:31:39.996	15.77 ± 0.03	<i>r</i>
28/07/21 08:03:08.997	16.39 ± 0.04	<i>g</i>
30/07/21 06:30:03.997	16.35 ± 0.03	<i>g</i>
01/08/21 07:34:50.002	15.84 ± 0.03	<i>r</i>
03/08/21 07:05:02.999	16.39 ± 0.03	<i>g</i>
10/08/21 05:02:37.997	15.90 ± 0.03	<i>r</i>
17/08/21 04:32:28.003	16.45 ± 0.04	<i>g</i>
17/08/21 06:02:29.999	15.92 ± 0.03	<i>r</i>
29/08/21 05:03:00.996	16.69 ± 0.04	<i>g</i>

Tabela 6.5: Magnitudes aparentes de Antenor obtidas através do ZTF em datas próximas as observações das ocultações.

Utilizando o modelo de ajuste *HG1G2* ([Muinonen et al., 2010](#)), foram calculadas as magnitudes absolutas em ambos os filtros. Para esse ajuste, obtivemos os valores de $H_g = 9.159^{+0.101}_{-0.099}$, $G1_g = 0.444^{+0.118}_{-0.349}$, $G2_g = 0.354^{+0.198}_{-0.128}$ e $H_r = 8.674^{+0.106}_{-0.095}$, $G1_r = 0.094^{+0.298}_{-0.086}$, $G2_r = 0.615^{+0.112}_{-0.163}$ (intervalo de confiança de 1σ). O ajuste do modelo junto com diferentes intervalos de confiança são mostrados na figura 6.7.

A utilização dos dados do ZTF não nos possibilita determinar um modelo de curva de luz rotacional. Entretanto, para incluir os efeitos da rotação de Antenor na incerteza da magnitude absoluta em ambos os filtros, foram seguidos os mesmo procedimentos detalhado na seção 4.1, que é descrito abaixo:

1. Para as medidas de magnitudes em cada banda (*g*, *r*), foram determinadas suas res-

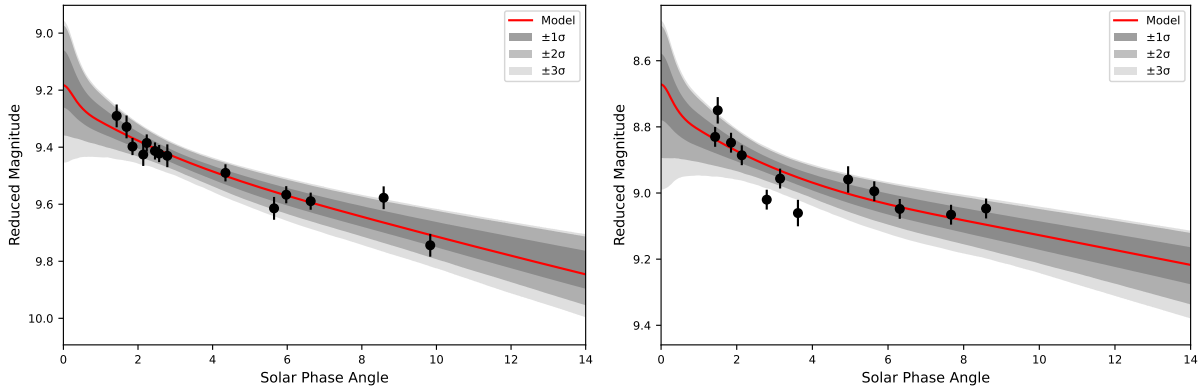


Figura 6.7: Magnitude aparente reduzida à unidade de distância em função do ângulo de fase solar. Painel esquerdo: Filtro g . Painel direito: filtro r . As medidas fotométricas são oriundas do ZTF. As barras de erro têm comprimento total de 2σ e levam em consideração apenas as incertezas observacionais da magnitude.

pectivas magnitudes reduzidas (valores do eixo y em ambos os painéis da Fig. 6.7. Essas são as magnitudes aparentes observadas normalizadas pela distância de Antenor do Sol e do observador, ou, mais especificamente, $m - 5 \log(R\Delta)$, em que m é a magnitude aparente observado, R é a distância do observador e Δ é a distância heliocêntrica.

2. Para cada magnitude reduzida, o valor da função $f(\phi) = A \times \sin(\phi)$ é determinada para ϕ escolhido aleatoriamente no intervalo de $[0:2\pi[$, com $A = 0.19$. Aqui, foi adotada uma curva de luz com amplitude de 0,19 para Antenor (Mottola et al., 2011) e uma forma senoidal. Ressaltamos que um modelo diferente influenciaria apenas as incertezas das magnitudes absolutas em cada filtro e não seus valores finais sob a hipótese de que a fase rotacional e as datas de observação do ZTF não são correlacionadas. Dada a escassez de dados, a escolha por um modelo de forma simples (onda senoidal em nosso caso) é uma escolha razoável.
3. Para contabilizar completamente a variância nos dados do ZTF, as magnitudes usadas na simulação são valores aleatórios amostrados de uma distribuição normal centrada no valor da magnitude reduzida, com uma variância correspondente à incerteza da magnitude aparente ($\pm 1\sigma$).
4. Os valores de $H_{g,r}$, $G1_{g,r}$ e $G2_{g,r}$ são determinados utilizando a minimização de mínimos quadrados aplicado ao modelo de curva de fase $HG1G2$, através de um algoritmo de aproximação linear de otimização restrita (Powell, 1994).
5. As etapas (b), (c) e (d) são repetidas 10.000 vezes.
6. Os valores finais e suas incertezas de $H_{g,r}$, $G1$ e $G2$ são derivados da distribuição dos

parâmetros obtidos de todas as simulações, com as incertezas determinadas pelos 16^o e 84^o percentis, representando o intervalo correspondente a $\pm 1\sigma$.

O pipeline de processamento de imagens do ZTF calibra sua fotometria (Bellm et al., 2019) para PanSTARRS1 (Chambers and Pan-STARRS Team, 2017). O PanSTARRS1 implementa o sistema de magnitude AB com uma precisão de $\sim 0,02$ mag (90% de confiança) (Tonry et al., 2012). Assim, adotamos de Willmer (2018) os valores AB da magnitude aparente do Sol para o PanSTARRS1 na banda g ($PS1_g$) $m_{\odot} = -26,54$ e na banda r ($PS1_r$) $m_{\odot} = -26,93$, ambos os valores com uma precisão de 2%. Os albedos geométricos de Antenor são, como consequência, $\rho_g = 0,046_{-0,007}^{+0,008}$ e $\rho_r = 0,050_{-0,007}^{+0,008}$. As diferenças entre esses albedos e aqueles dados por outros trabalhos (por exemplo de Fernández et al., 2003) são devidos principalmente a valores diferentes para o diâmetro de Antenor obtidos por diferentes metodologia.

Os resultados aqui encontrados para o albedo geométrico de Antenor estão em boa concordância com valores da literatura como $\rho_V = 0.051 \pm 0.003$ e $\rho_V = 0.059 \pm 0.003$ obtidos pela NEOWISE (Grav et al., 2012) e Akari (Usui et al., 2011) respectivamente. Segundo os esquemas taxonômicos de Tholen (1984), Bus and Binzel (2002) e DeMeo et al. (2009), Antenor é classificado como um asteroide tipo D (Mottola et al., 2011), o que justifica seu albedo muito baixo. Vale também ressaltar que asteroides do tipo D são bastante representativos na região dos troianos de Júpiter, conforme pode ser verificado na figura 2.8, apresentando principalmente predominância no ponto lagrangiano L5 o qual Antenor se encontra (Roig et al., 2008).

Capítulo 7

Exploração de Dados Astrométricos

7.1 Astrometria de TNOs e Centauros

Neste trabalho, a determinação das posições astrométricas de TNOs e Centauros provenientes das observações do DES foi feita de duas formas: (i): A partir dos catálogos single-epoch (SE) do DES e (ii): diretamente das imagens SE do DES. Para se obter as posições diretamente das imagens, utilizou-se o pacote PRAIA ([Assafin, 2023a](#)) e como referência astrométrica, utiliza-se o Gaia EDR3 ([Lindegren et al., 2021](#)). Já os catálogos SE do DES utilizam a versão anterior, Gaia DR2 ([Lindegren et al., 2018](#)), como referência para astrometria ([Abbott et al., 2021](#)).

7.1.1 Astrometria do DES

Conforme mencionado e descrito por [Abbott et al. \(2021\)](#), a solução astrométrica do DES DR2 é derivada em duas etapas utilizando o software SCAMP com o Gaia DR2 como catálogo de referência. O SCAMP calcula eficientemente soluções astrométricas e fotométricas precisas para qualquer sequência arbitrária de imagens FITS de forma completamente automática ([Bertin, 2006](#)). Para o processamento single-epoch, as incertezas astrométricas internas são $g = 34$, $r = 28$, $i = 29$, $z = 34$ e $Y = 53$ mas, que são determinadas a partir da mediana de separações angulares bidimensionais entre as medidas repetidas de estrelas brilhantes de exposições individuais. Para exposições tiradas próximas à época de referência Gaia DR2, a astrometria relativa é mais precisa. O desvio padrão dos resíduos astrométricos 2D para cada exposição single-epoch em relação ao catálogo de referência Gaia DR2 é apresentado na figura 7.1. A tendência apresenta pelos mínimos de incerteza nesta figura é provavelmente devida aos movimentos próprios estelares que não são considerados na solução astrométrica do DES DR2.

Para uma etapa de refinamento astrométrico, o software SCAMP é utilizado para executar um ajuste astrométrico simultâneo a todas as imagens contribuindo para um dado bloco de coadição, no qual todas as bandas são consideradas. Estima-se a precisão

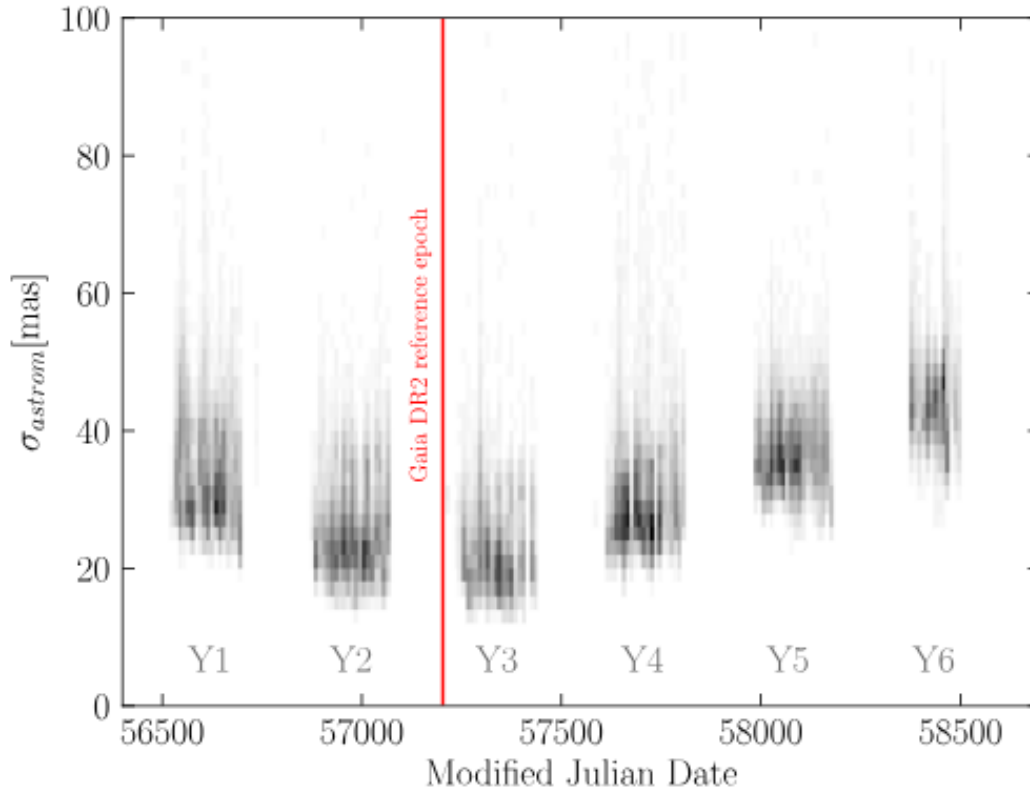


Figura 7.1: Precisão astrométrica por imagem single-epoch apresentado por [Abbott et al. \(2021\)](#), calculada como o desvio padrão dos resíduos astrométricos 2D com relação catálogo de referência Gaia DR2. Todas as bandas estão incluídas.

astrométrica a partir do desvio padrão dos resíduos de tais ajustes. A mediana desse valor sobre todos os blocos de coadição no DES DR2 é de aproximadamente 27 mas. De toda forma, ressaltamos que, neste trabalho, não utilizamos imagens coadicionadas.

7.1.2 PRAIA Astrometry

O pacote PRAIA permite obter as posições astrométricas diretamente das imagens. Conforme já mencionado no capítulo 6, PRAIA é um pacote autônomo totalmente desenvolvido em FORTRAN sem interfaces gráficas, composto de múltiplas tarefas independentes. O PRAIA Astrometry é um ferramenta fundamental utilizada pela colaboração do Grupo do Rio e Projeto Lucky Star. Ela têm sido utilizada no estudo de sistemas de referência, astrometria de satélites naturais e NEAs, para trabalhos de dinâmica e efemérides, e na predição precisa de ocultações estelares. Instruções detalhadas de instalação/uso, código, arquivos de entrada e documentação estão disponíveis publicamente¹.

O PRAIA identifica automaticamente objetos numa dada imagem FITS e determina seus centroides. Ainda, com auxílio da astrometria realizada pela missão espacial Gaia,

¹Documentação do PRAIA disponível publicamente em: <https://ov.ufrj.br/en/PRAIA/>

objetos Gaia são identificados na imagem para servirem como referência astrométrica. O artigo de referência para o PRAIA (Assafin, 2023a), embora descreva funcionalidades da versão utilizada neste trabalho, refere-se a uma versão mais moderna e com mais recursos que não estava ainda disponível quando da determinação dos resultados aqui apresentados.

A partir dessa identificação, a relação entre coordenadas (ξ, η) no plano tangente das estrelas de referência e coordenadas (x, y) sobre o CCD das contrapartidas Gaia presentes nas imagens, é feita através de modelos polinomiais. As coordenadas (ξ, η) são obtidas através da projeção gnomônica das coordenadas equatoriais das estrelas Gaia EDR3 (Early Data Release 3, Lindegren et al., 2021) após compensá-las, ao menos, por suas paralaxes e por seus movimentos espaciais.

No presente caso, o modelo utilizado é dado por um polinômio completo de terceiro grau apenas. Coordenadas (x, y) sobre o CCD são determinadas através do ajuste de uma gaussiana circular. Na versão mais recente do PRAIA, entre outras melhorias, diversos modelos para descrever o perfil de distribuição do fluxo de objetos celestes estão disponíveis.

De maneira geral, tem-se o seguinte:

$$\xi = a_1x^3 + a_2y^3 + a_3x^2y + a_4xy^2 + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7xy + a_8x + a_9y + a_{10} \quad (7.1)$$

$$\eta = b_1x^3 + b_2y^3 + b_3x^2y + b_4xy^2 + b_5x^2 + b_6y^2 + b_7xy + b_8x + b_9y + b_{10} \quad (7.2)$$

onde as coordenadas (ξ, η) e (x, y) , num primeiro momento, dizem respeito apenas às estrelas de referência. Os coeficientes a_i e b_i ($i = 1 \dots 10$), por sua vez, são determinados por mínimos quadrados. Com esses coeficientes em mãos, então, coordenadas (ξ, η) do alvo são obtidas e transformadas em (α, δ) através da transformação gnomônica inversa. Caso um arquivo, em formato pré-determinado, com posições aproximadas do alvo seja fornecido pelo usuário, o PRAIA criará um arquivo de saída que contém apenas as medidas relativas a esse objeto.

Como função da densidade de estrelas, o PRAIA leva tipicamente de 1 a 60 segundos para realizar a astrometria dos objetos identificados em uma imagem. Ainda, junto com uma medida aproximada da magnitude observada, magnitudes J , H e K_s do catálogo 2MASS (Skrutskie et al., 2006) são fornecidas quando disponíveis.

7.1.3 Resultados astrométricos

Conforme já mencionado, as posições dos TNOs e Centauros conhecidos observados pelo DES foi determinada a partir dos catálogos SE e também diretamente das imagens utilizando o pacote PRAIA. A figura 7.2 apresenta a comparação entre as duas fontes de astrometria. Pode-se perceber que os offsets (posições calculadas menos observadas) e desvios padrão em ambas as coordenadas equatoriais são similares, como corroborado pela tabela 7.1. Tais resultados reforçam a boa qualidade da astrometria proveniente dos catálogos do DES durante os seis anos de observação para o estudo desses pequenos corpos distantes e fracos. Tais resultados também

apontam um pequeno offset entre as posições observadas e as efemérides do JPL.

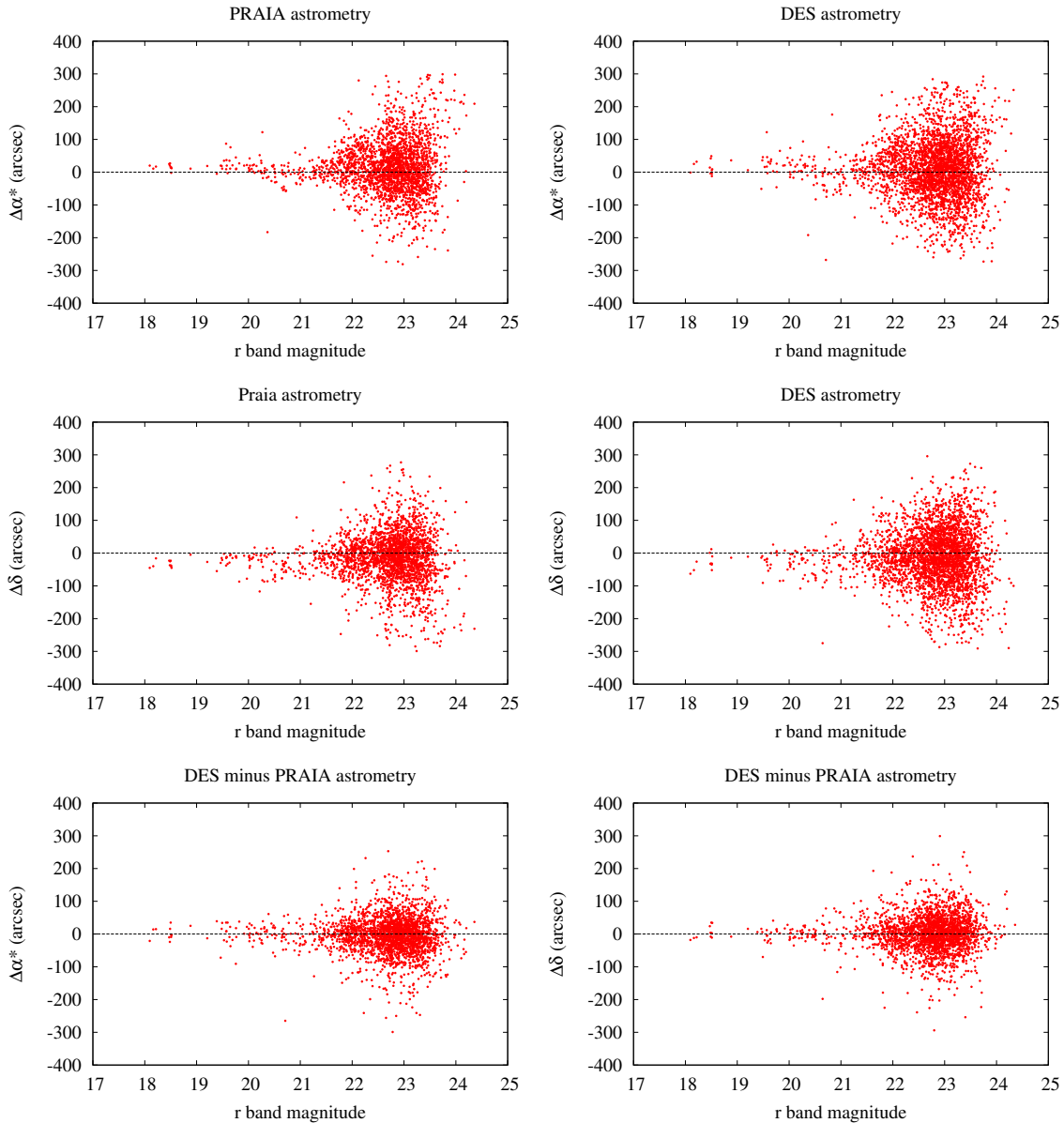


Figura 7.2: Posições observadas menos efemérides de TNOs e Centauros em mili-segundos de arco. Painel Esquerdo: Astrometria de TNOs e Centauros proveniente da imagens do DES utilizando o PRAIA e GAIA EDR3. Painel direito: Astrometria de TNOs e Centauros dos catálogos SE do DES utilizando o Gaia DR2 como referência

7.2 Astrometria de (2207) Antenor

Através da técnica de ocultações estelares, a posição astrométrica geocêntrica de (2207) Antenor pode ser obtida para os instantes de ocultação. Esses instantes são aqueles do *closest approach*, ou seja, do instante em que ocorre a menor distância angular entre a sombra do objeto e o geocentro. Tais resultados estão presentes na tabela 7.2. Com o objetivo de verificar como os

	$\langle \Delta\alpha^* \rangle$	$\langle \Delta\delta \rangle$	N
	mas		
PRAIA menos JPL	15(± 80)	-14(± 80)	2422
DES menos JPL	9(± 90)	-12(± 80)	3110
DES menos PRAIA	-4(± 60)	2(± 50)	2422

Tabela 7.1: Resultados astrométricos das imagens do DES para TNOs e Centauros conhecidos. A astrometria obtida com o pacote PRAIA e com os catálogos SE são comparadas com as efemérides do JPL. Coluna1: Offset médio e desvio padrão da amostra em ascensão reta. Coluna2: Offset médio e desvio padrão da amostra em declinação. Coluna 3: Número de medidas na banda r que contribuiu para os resultados das colunas 1 e 2.

dados obtidos pela ocultação melhoram as efemérides do troiano, utiliza-se o NIMA (Desmars et al., 2015) para o ajuste de dois conjuntos de dados: (i) todos os dados disponíveis no MPC, dados do GaiaFPR (Tanga et al., 2023) e posições astrométricas obtidas por observações no Observatório do Pico dos Dias - OPD e Observatório de Haute-Provence - OHP; e (ii) com o primeiro conjunto do item anterior mais as posições preferidas (solução ao sul presente na figura 6.6) de ocultações presentes neste trabalho.

O NIMA inicia com os parâmetros orbitais já existentes e efetua a determinação do vetor estado que minimiza as diferenças entre posições observadas e calculadas. Essa determinação é obtida corrigindo-se iterativamente cada componente do vetor estado através do algoritmo de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

O NIMA utiliza um esquema de pesagem bastante específico e voltado para se determinar órbitas precisas para um período que se estende não muito além (< 1 ano) após a última observação utilizada para refinar a efeméride. Isto é particularmente prático e útil para as ocultações. As figuras 7.3 e 7.4 mostram os ajustes orbitais e a diferença entre as novas efemérides do NIMA v5 e a solução do JPL62.

Data (UTC)	Ascensão Reta (RA)	Declinação (DEC)	Comentário
2021-06-12 01:49:42.980	$18^h45^m29^s.6915281 \pm 0.567$ mas	$-15^\circ38'53''.980590 \pm 1.617$ mas	Centro ao Norte
2021-06-12 01:49:42.980	$18^h45^m29^s.6915814 \pm 0.598$ mas	$-15^\circ38'53''.996995 \pm 1.641$ mas	Centro ao Sul (*)
2021-06-12 01:49:42.980	$18^h45^m29^s.6915555 \pm 0.968$ mas	$-15^\circ38'53''.988804 \pm 9.827$ mas	Solução Combinada
2021-07-10 00:56:52.520	$18^h31^m04^s.3100087 \pm 0.507$ mas	$-15^\circ58'43''.998811 \pm 0.932$ mas	Mesma forma que 2021-08-26
2021-08-26 04:01:15.580	$18^h15^m46^s.3494335 \pm 0.815$ mas	$-17^\circ02'49''.230749 \pm 0.519$ mas	Mesma forma que 2021-07-10

(*) Solução preferida devido ao menor offset relativo para efemérides de (2207) Antenor.

Tabela 7.2: Posição Astrométrica de (2207) Antenor

O ajuste orbital usando NIMA forneceu efemérides com incertezas abaixo de 15 mas até 2026, o que se traduz em 46 km projetados à distância de Antenor. Sem usar esses dados de ocultações estelares, as efemérides de Antenor teriam incertezas de 30 mas até 2026 (92 km à distância de Antenor), o que é maior do que o raio de Antenor de 50,83 km. Esta nova efeméride permite a previsão de ocultações estelares precisas para um futuro não distante (cerca de 2 anos no presente caso) com uma alta taxa de sucesso esperada. Esta nova efeméride está disponível publicamente na página da Lucky Star².

²Disponível em <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=1045>

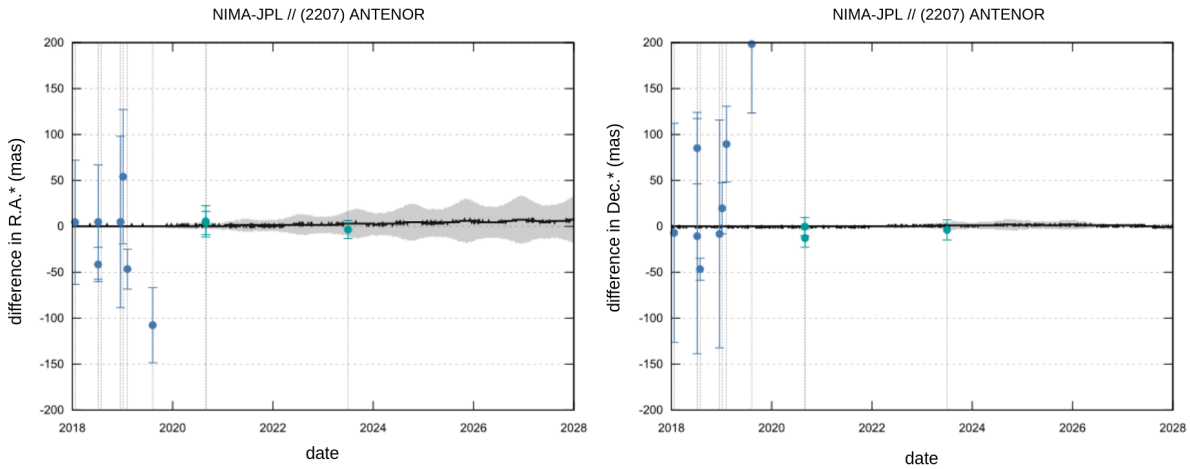


Figura 7.3: Diferença entre as efemérides do JPL e Solução do NIMA em RA (painel esquerdo) e DEC (painel direito) considerando todos os dados disponíveis no MPC e posições astrométricas obtidas pelo OPD e OHP (pontos ciano), mais dados do GaiaFPR (pontos azuis). A região cinza delimita a incerteza de $1\text{-}\sigma$.

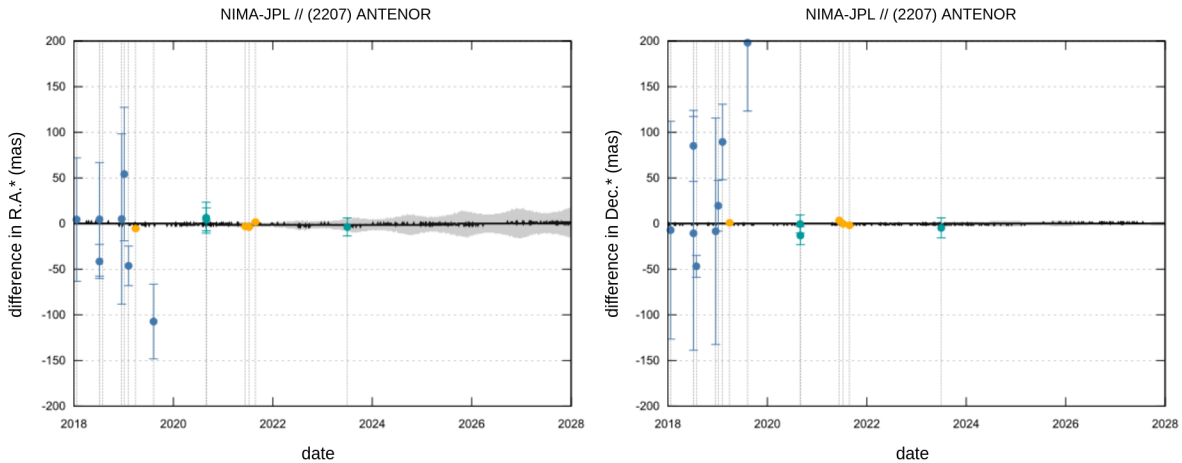


Figura 7.4: Diferença entre efemérides do JPL e solução do NIMA com os dados presentes na figura 7.3 mais a posição astrométrica preferida apresentada na tabela 7.2 (pontos amarelos). Note que a região cinza que delimita a incerteza de $1\text{-}\sigma$ é menor do que a apresentada na figura 7.3 por um fator de ~ 2 .

Capítulo 8

Conclusões

Considerados remanescentes colisionais da formação do Sistema Solar, os pequenos corpos carregam informações essenciais sobre as condições iniciais do disco protoplanetário. Apesar de representarem uma fração muito pequena da massa total dos planetas, o estudo de suas diferentes populações, que vão desde regiões mais internas até a borda externa, e devido a sua diversidade de formas, tamanho, massa e estrutura interna, nos permite compreender melhor suas regiões de formação e como os processos evolutivos de nosso sistema planetário podem ter ocorrido.

Neste contexto, grandes levantamentos (surveys) astronômicos têm desempenhado um papel essencial para o estudo de pequenos corpos. A partir do mapeamento multibanda de céu profundo e de amplas regiões, com o levantamento de grandes amostras, é possível investigar padrões das propriedades físico-químicas desses objetos em diferentes populações estabelecendo seus traços evolutivos, além de possibilitarem um melhor refinamento das órbitas contribuindo para a identificação de objetos de interesse para futuras missões espaciais.

Neste cenário, com o mapeamento de 5.000 graus quadrados do hemisfério sul celeste, o DES possibilitou a observação de mais de 399.000 pequenos corpos em 5 filtros ópticos (*grizY*). Mesmo que não tenha sido originalmente destinado para estudos do Sistema Solar, o levantamento tem feito contribuições importantes para a análise fotométrica, astrométrica e dinâmica de pequenos corpos com distâncias heliocêntricas que variam do Sistema Solar interno até seus limites mais externos.

No que diz respeito ao estudo de objetos mais externos, a alta qualidade das medições fotométricas do DES resultou em cores confiáveis de TNOs e Centauros. Apesar da ausência de informações rotacionais precisas, apresentamos nesta tese uma classificação taxonômica a partir de três cores para esses objetos que foi determinada com base em procedimentos bem estabelecidos e aceitos na literatura. Classificamos nosso conjunto de dados de 144 objetos em um sistema taxonômico de 4 classes proposto por [Barucci et al. \(2005\)](#) para TNOs e Centauros. Deste conjunto de objetos aqui apresentados, não encontramos na literatura uma classificação taxonômica disponível no esquema de 4 classes para 132 deles.

Nós classificamos um conjunto de 137 TNOs e 7 Centauros em 4 classes que vão de objetos desde neutro até os mais avermelhados em relação ao Sol - *BB*, *BR*, *IR* e *RR*. Sendo os objetos

do grupo *BB* aqueles que possuem espectro de reflectância neutro (ou azulados) e os do tipo *RR* os objetos mais avermelhados do Sistema Solar. Obtida a classificação desses objetos, buscamos possíveis correlações entre as cores e parâmetros orbitais e físicos.

No que diz respeito à distribuição das classes dinâmicas por taxonomia para o nosso conjunto de dados, nota-se que os poucos Centauros tendem a apresentar uma distribuição bimodal (mas deve-se ter em conta o pequeno número desses objetos neste trabalho), concentrando-se nos grupos *BB* e *RR*, concordando com resultados apresentados por [Fulchignoni et al. \(2008\)](#) e [Perna et al. \(2010\)](#) e também que a classe *IR* é mais frequente para os objetos em ressonância orbital com Netuno.

Na busca por correlações entre cor e inclinação orbital, obteve-se uma correlação fraca, porém clara, para os objetos ressonantes. Para essa correlação, nota-se que a presença dos objetos mais azulados (*BB*) é bastante relevante. Além disso, foram também obtidas correlações fracas, porém claras, entre cor e inclinações de fase. A partir dos limites de região ($e < 0.42$, $i < 21^\circ$) apresentados por [Ali-Dib et al. \(2021\)](#); [Marsset et al. \(2019\)](#), notamos que a fração de nossos objetos mais vermelhos *RR* é maior do que dos objetos mais azulados *BB* nesta região. Destaca-se que, em nossa amostra, o limite de excentricidade se mantém apenas quando as classes extremas (*BB* e *RR*) são consideradas. O limite de inclinação, por outro lado, também se mantém quando duas classes (*BB* mais *BR* - azul e *IR* mais *RR* - vermelho) são consideradas. TNOs mais vermelhos e mais azuis têm composições de superfícies diferentes e há evidências dinâmicas ([Nesvorný et al., 2020](#)) de que possuem diferentes origens. Resultados espectroscópicos ([Merlin et al., 2017](#)) estão em boa concordância com os objetos mais azuis e mais vermelhos no esquema de classificação taxonômica de 4 classes apresentado por [Barucci et al. \(2005\)](#), aqui utilizado. Portanto, nossos objetos *BB* e *RR* são uma contribuição relevante para modelos de evolução dinâmica do Sistema Solar. Vale destacar, no entanto, que temos uma mistura de cores para $13 \lesssim a \lesssim 75$ AU, onde a maioria dos TNOs e Centauros de nosso conjunto de dados está localizada.

Ainda para esse conjunto de dados, os diâmetros para todos os objetos foram determinados com o auxílio de magnitudes absolutas combinadas com os valores medianos de albedos para cada classe dinâmica apresentado por [Müller et al. \(2020\)](#). Foi encontrada uma tendência de que nossos objetos mais azuis tendem a apresentar diâmetros maiores, em comparação com nossos objetos mais vermelhos. Isso corrobora a hipótese de que objetos maiores podem ter modificado ou reconstruído suas superfícies a partir de processos que não estão presentes nos menores ([Fraser and Brown, 2012](#)). Além disso, destacamos que nenhum objeto grande ($D \gtrsim 400$ km, barras de erro não incluídas) foi encontrado na população Clássica Fria, o que está de acordo com [Kavelaars et al. \(2022\)](#).

Conforme discutido neste trabalho, verifica-se na literatura diferentes abordagens para determinar classes taxonômicas para TNOs e Centauros. Sendo assim, o número exato de classes taxonômicas não é um consenso. Este trabalho não tem como objetivo defender qualquer método específico para classificar superfícies TNOs e Centauros por meio de suas cores ópticas, nem apresentar qualquer novo método desse tipo. Embora o uso do sistema taxonômico de 4 classes possa ser considerado uma opção neste trabalho, o próprio conjunto de dados fornece algum suporte

para, pelo menos, um número mínimo de três classes. Os objetos nas classes BR e IR mostram espectros médios misturados, indicando que pelo menos parte dos objetos não mostra nenhuma preferência particular pela classe *BB* ou *RR*.

Destacamos os tipos superficiais apresentados por [Fraser et al. \(2023\)](#) (2 grupos) e por [Pinilla-Alonso et al. \(2025\)](#) (3 grupos) e comparamos as classificações de TNOs e Centauros de nossa base de dados em comum os trabalhos citados. Notamos que a classificação obtida neste trabalho é bastante coerente. Tal resultado reforça a qualidade das medidas fotométricas a partir do DES.

No que diz respeito a asteroides do cinturão principal, em colaboração com o Dr. Valerio Carruba (UNESP/SP), os dados do DES, cruzados com dados de outros levantamentos, foram utilizados para fornecer informações sobre propriedades físicas de asteroides, investigando como suas taxonomias são refletidas nos dados do DES. Através de Machine Learning, otimizada com algoritmos genéricos, foi efetuada uma classificação de asteroides que anteriormente não possuíam informações taxonômicas. Além disso, os dados do DES foram utilizados para identificar 410 possíveis novos objetos do tipo V, cuja distribuição no domínio próprio (a , $sen(i)$) é consistente com a localização de objetos do tipo V conhecidos.

Ainda neste trabalho, utilizamos a técnica de ocultações estelares para determinação do tamanho e forma 2D do troiano de Júpiter (2207) Antenor. Conforme destacado, a ocultação estelar é uma técnica poderosa para estudar propriedades físicas de pequenos corpos. Sendo assim, a partir de três eventos de 2021, determinamos um raio equatorial aparente 2D de $54,30 \pm 0,99$ km no momento das ocultações, com um achatamento aparente de $0,144 \pm 0,051$, para (2207) Antenor. Ainda para essas ocultações destacamos a detecção positiva do evento de 12 de Junho de 2021 que apresentou um aumento de fluxo no meio da ocultação, que pode ser atribuído ao reaparecimento da estrela ocultada durante a ocultação. Tal fenômeno pode indicar uma grande característica topográfica do corpo ou binariedade. Verificamos que a região no meio da ocultação tem um tamanho de $11,38 \pm 2,98$ km, um valor muito grande (22%) considerando o raio equivalente de área determinado. Além disso, nossa estimativa de primeira ordem coloca esta corda a uma distância de 25,43 km do centro de Antenor, o que concorda com um objeto binário, conforme já sugerido por [Stephens et al. \(2018\)](#). Destacamos que mais dados observacionais são necessários para restringir melhor este cenário e identificar os tamanhos individuais dos componentes.

Estudar as características física e dinâmica de pequenos corpos é de extrema importância para construir modelos que nos possibilitem compreender a origem do Sistema Solar e como ele evoluiu até o que conhecemos hoje. Neste contexto, a alta qualidade dos dados obtidos pelo DES tem apresentado contribuições relevantes para a ciência do Sistema Solar mesmo não tendo sido concebido, originalmente, para este fim. Assim, este levantamento é um predecessor genuinamente importante do sem precedentes Legacy Survey of the Space and Time (LSST; [LSST Science Collaboration et al. 2009](#); [Ivezic et al. 2019](#)), o levantamento de 10 anos do céu do Hemisfério Sul que ocorrerá no Observatório Vera C. Rubin e obterá imagens do céu visível a partir de Cerro Pachón duas vezes por semana, iluminando inúmeras áreas da Astronomia em comprimentos de onda visíveis, em particular o Sistema Solar. Levantamentos como o DES

forneem uma base de dados e de experiências técnicas que podem permitir ao LSST maximizar a eficiência na descoberta e caracterização de objetos do Sistema Solar. Por outro lado, destacamos também a técnica de ocultações estelares que tem permitido a determinação, além do tamanho e forma, de características topográficas, atmosféricas e detecção de anéis de pequenos corpos. Sob amplo aspecto, com o início das observações de ciência do LSST, temos o marco de uma nova e excitante era para a Astronomia em geral.

Referências Bibliográficas

Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Allam, S., Amara, A., Annis, J., Asorey, J., Avila, S., Ballester, O., Banerji, M., Barkhouse, W., Baruah, L., Baumer, M., Bechtol, K., Becker, M. R., Benoit-Lévy, A., Bernstein, G. M., Bertin, E., Blazek, J., Bocquet, S., Brooks, D., Brout, D., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Busti, V., Campisano, R., Cardiel-Sas, L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Castander, F. J., Cawthon, R., Chang, C., Chen, X., Conselice, C., Costa, G., Croce, M., Cunha, C. E., D'Andrea, C. B., da Costa, L. N., Das, R., Daues, G., Davis, T. M., Davis, C., De Vicente, J., DePoy, D. L., DeRose, J., Desai, S., Diehl, H. T., Dietrich, J. P., Dodelson, S., Doel, P., Drlica-Wagner, A., Eifler, T. F., Elliott, A. E., Evrard, A. E., Farahi, A., Fausti Neto, A., Fernandez, E., Finley, D. A., Flaugher, B., Foley, R. J., Fosalba, P., Friedel, D. N., Frieman, J., García-Bellido, J., Gaztanaga, E., Gerdes, D. W., Giannantonio, T., Gill, M. S. S., Glazebrook, K., Goldstein, D. A., Gower, M., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gschwend, J., Gupta, R. R., Gutierrez, G., Hamilton, S., Hartley, W. G., Hinton, S. R., Hislop, J. M., Hollowood, D., Honscheid, K., Hoyle, B., Huterer, D., Jain, B., James, D. J., Jeltama, T., Johnson, M. W. G., Johnson, M. D., Kacprzak, T., Kent, S., Khullar, G., Klein, M., Kovacs, A., Koziol, A. M. G., Krause, E., Kremin, A., Kron, R., Kuehn, K., Kuhlmann, S., Kuropatkin, N., Lahav, O., Lasker, J., Li, T. S., Li, R. T., Liddle, A. R., Lima, M., Lin, H., López-Reyes, P., MacCrann, N., Maia, M. A. G., Maloney, J. D., Manera, M., March, M., Marriner, J., Marshall, J. L., Martini, P., McClintock, T., McKay, T., McMahan, R. G., Melchior, P., Menanteau, F., Miller, C. J., Miquel, R., Mohr, J. J., Morganson, E., Mould, J., Neilsen, E., Nichol, R. C., Nogueira, F., Nord, B., Nugent, P., Nunes, L., Ogando, R. L. C., Old, L., Pace, A. B., Palmese, A., Paz-Chinchón, F., Peiris, H. V., Percival, W. J., Petravick, D., Plazas, A. A., Poh, J., Pond, C., Porredon, A., Pujol, A., Refregier, A., Reil, K., Ricker, P. M., Rollins, R. P., Romer, A. K., Roodman, A., Rooney, P., Ross, A. J., Rykoff, E. S., Sako, M., Sanchez, M. L., Sanchez, E., Santiago, B., Saro, A., Scarpine, V., Scolnic, D., Serrano, S., Sevilla-Noarbe, I., Sheldon, E., Shipp, N., Silveira, M. L., Smith, M., Smith, R. C., Smith, J. A., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Song, J., Stebbins, A., Suchyta, E., Sullivan, M., Swanson, M. E. C., Tarle, G., Thaler, J., Thomas, D., Thomas, R. C., Troxel, M. A., Tucker, D. L., Vikram, V., Vivas, A. K., Walker, A. R., Wechsler, R. H., Weller, J., Wester, W., Wolf, R. C., Wu, H., Yanny, B., Zenteno, A., Zhang, Y., Zuntz, J., DES Collaboration, Juneau, S., Fitzpatrick, M., Nikutta, R., Nidever, D., Olsen, K., Scott, A., and NOAO Data Lab

- (2018). The Dark Energy Survey: Data Release 1. *Astrophys. J. Suppl.*, 239(2):18.
- Abbott, T. M. C., Adamów, M., Aguena, M., Allam, S., Amon, A., Annis, J., Avila, S., Bacon, D., Banerji, M., Bechtol, K., Becker, M. R., Bernstein, G. M., Bertin, E., Bhargava, S., Bridle, S. L., Brooks, D., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Castander, F. J., Cawthon, R., Chang, C., Choi, A., Conselice, C., Costanzi, M., Croce, M., da Costa, L. N., Davis, T. M., De Vicente, J., DeRose, J., Desai, S., Diehl, H. T., Dietrich, J. P., Drlica-Wagner, A., Eckert, K., Elvin-Poole, J., Everett, S., Evrard, A. E., Ferrero, I., Ferté, A., Flaugher, B., Fosalba, P., Friedel, D., Frieman, J., García-Bellido, J., Gaztanaga, E., Gelman, L., Gerdes, D. W., Giannantonio, T., Gill, M. S. S., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gschwend, J., Gutierrez, G., Hartley, W. G., Hinton, S. R., Hollowood, D. L., Honscheid, K., Huterer, D., James, D. J., Jeltama, T., Johnson, M. D., Kent, S., Kron, R., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Li, T. S., Lidman, C., Lin, H., MacCrann, N., Maia, M. A. G., Manning, T. A., Maloney, J. D., March, M., Marshall, J. L., Martini, P., Melchior, P., Menanteau, F., Miquel, R., Morgan, R., Myles, J., Neilsen, E., Ogando, R. L. C., Palmese, A., Paz-Chinchón, F., Petravick, D., Pieres, A., Plazas, A. A., Pond, C., Rodriguez-Monroy, M., Romer, A. K., Roodman, A., Rykoff, E. S., Sako, M., Sanchez, E., Santiago, B., Scarpine, V., Serrano, S., Sevilla-Noarbe, I., Smith, J. A., Smith, M., Soares-Santos, M., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarle, G., Thomas, D., To, C., Tremblay, P. E., Troxel, M. A., Tucker, D. L., Turner, D. J., Varga, T. N., Walker, A. R., Wechsler, R. H., Weller, J., Wester, W., Wilkinson, R. D., Yanny, B., Zhang, Y., Nikutta, R., Fitzpatrick, M., Jacques, A., Scott, A., Olsen, K., Huang, L., Herrera, D., Juneau, S., Nidever, D., Weaver, B. A., Adean, C., Correia, V., de Freitas, M., Freitas, F. N., Singulani, C., Vila-Verde, G., and Linea Science Server (2021). The Dark Energy Survey Data Release 2. *Astrophys. J. Suppl.*, 255(2):20.
- Ali-Dib, M., Marsset, M., Wong, W.-C., and Dbouk, R. (2021). The Rarity of Very Red Trans-Neptunian Objects in the Scattered Disk. *Astron. J.*, 162(1):19.
- Alvarez-Candal, A., Ayala-Loera, C., Gil-Hutton, R., Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., and Duffard, R. (2019). Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: correlations and populations. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 488(3):3035–3044.
- Anderson, T. W. and Darling, D. A. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49(268):765–769.
- Assafin, M. (2023a). Astrometry with PRAIA. *Planet. Space Sci.*, 238:105801.
- Assafin, M. (2023b). Differential aperture photometry and digital coronagraphy with PRAIA. *Planet. Space Sci.*, 239:105816.
- Ayala-Loera, C., Alvarez-Candal, A., Ortiz, J. L., Duffard, R., Fernández-Valenzuela, E., Santos-Sanz, P., and Morales, N. (2018). Absolute colours and phase co-

- efficients of trans-Neptunian objects: $H_V - H_R$ and relative phase coefficients. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 481(2):1848–1857.
- Barbee, B. W., Sarli, B., Lyzhoft, J., Nuth, J., Purves, L., and Lewis, R. (2020). Key Near-Earth Object Characteristics Measurements for Planetary Defense. In LPI Editorial Board, editor, Apophis T-9 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense, volume 2242 of LPI Contributions, page 2009.
- Barucci, M. A., Belskaya, I. N., Fulchignoni, M., and Birlan, M. (2005). Taxonomy of Centaurs and Trans-Neptunian Objects. Astron. J., 130(3):1291–1298.
- Barucci, M. A., Brown, M. E., Emery, J. P., and Merlin, F. (2008). Composition and Surface Properties of Transneptunian Objects and Centaurs. In Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., and Dotson, R., editors, The Solar System Beyond Neptune, pages 143–160.
- Barucci, M. A., Capria, M. T., Coradini, A., and Fulchignoni, M. (1987). Classification of asteroids using G-mode analysis. Icarus, 72(2):304–324.
- Barucci, M. A. and Peixinho, N. (2006). Trans-Neptunian objects’ surface properties. In Lazaro, D., Ferraz-Mello, S., and Fernández, J. A., editors, Asteroids, Comets, Meteors, volume 229, pages 171–190.
- Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., Dekany, R., Smith, R. M., Riddle, R., Masci, F. J., Helou, G., Prince, T. A., Adams, S. M., Barbarino, C., Barlow, T., Bauer, J., Beck, R., Belicki, J., Biswas, R., Blagorodnova, N., Bodewits, D., Bolin, B., Brinnel, V., Brooke, T., Bue, B., Bulla, M., Burruss, R., Cenko, S. B., Chang, C.-K., Connolly, A., Coughlin, M., Cromer, J., Cunningham, V., De, K., Delacroix, A., Desai, V., Duev, D. A., Eadie, G., Farnham, T. L., Feeney, M., Feindt, U., Flynn, D., Franckowiak, A., Frederick, S., Fremling, C., Gal-Yam, A., Gezari, S., Giomi, M., Goldstein, D. A., Golkhou, V. Z., Goobar, A., Groom, S., Hacopians, E., Hale, D., Henning, J., Ho, A. Y. Q., Hover, D., Howell, J., Hung, T., Huppenkothen, D., Imel, D., Ip, W.-H., Ivezić, Ž., Jackson, E., Jones, L., Juric, M., Kasliwal, M. M., Kaspi, S., Kaye, S., Kelley, M. S. P., Kowalski, M., Kramer, E., Kupfer, T., Landry, W., Laher, R. R., Lee, C.-D., Lin, H. W., Lin, Z.-Y., Lunnan, R., Giomi, M., Mahabal, A., Mao, P., Miller, A. A., Monkewitz, S., Murphy, P., Ngeow, C.-C., Nordin, J., Nugent, P., Ofek, E., Patterson, M. T., Penprase, B., Porter, M., Rauch, L., Rebbapragada, U., Reiley, D., Rigault, M., Rodriguez, H., van Roestel, J., Rusholme, B., van Santen, J., Schulze, S., Shupe, D. L., Singer, L. P., Soumagnac, M. T., Stein, R., Surace, J., Sollerman, J., Szkody, P., Taddia, F., Terek, S., Van Sistine, A., van Velzen, S., Vestrand, W. T., Walters, R., Ward, C., Ye, Q.-Z., Yu, P.-C., Yan, L., and Zolkower, J. (2019). The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results. Publ. Astron. Soc. Pacific, 131(995):018002.

- Belskaya, I. N., Barucci, M. A., Fulchignoni, M., and Dovgopoul, A. N. (2015). Updated taxonomy of trans-neptunian objects and centaurs: Influence of albedo. *Icarus*, 250:482–491.
- Bernardinelli, P. H., Bernstein, G. M., Jindal, N., Abbott, T. M. C., Agüena, M., Andrade-Oliveira, F., Annis, J., Bacon, D., Bertin, E., Brooks, D., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., da Costa, L. N., Pereira, M. E. S., Davis, T. M., Desai, S., Diehl, H. T., Doel, P., Everett, S., Ferrero, I., Friedel, D., Frieman, J., García-Bellido, J., Giannini, G., Gruen, D., Herner, K., Hinton, S. R., Hollowood, D. L., Honscheid, K., James, D. J., Kuehn, K., Mena-Fernández, J., Menanteau, F., Miquel, R., Ogando, R. L. C., Pieres, A., Plazas Malagón, A. A., Raveri, M., Sanchez, E., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarle, G., To, C., Walker, A. R., Wiseman, P., and Zhang, Y. (2023). Photometry of outer Solar System objects from the Dark Energy Survey I: photometric methods, light curve distributions and trans-Neptunian binaries. [arXiv e-prints](https://arxiv.org/abs/2304.03017), page arXiv:2304.03017.
- Bernardinelli, P. H., Bernstein, G. M., Montet, B. T., Weryk, R., Wainscoat, R., Agüena, M., Allam, S., Andrade-Oliveira, F., Annis, J., Avila, S., Bertin, E., Brooks, D., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Cawthon, R., Conselice, C., Costanzi, M., da Costa, L. N., Pereira, M. E. S., De Vicente, J., Diehl, H. T., Everett, S., Ferrero, I., Flaugher, B., Frieman, J., García-Bellido, J., Gaztanaga, E., Gerdes, D. W., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gschwend, J., Gutierrez, G., Hinton, S. R., Hollowood, D. L., Honscheid, K., James, D. J., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Maia, M. A. G., Marshall, J. L., Menanteau, F., Miquel, R., Morgan, R., Ogando, R. L. C., Paz-Chinchón, F., Pieres, A., Malagón, A. A. P., Rodriguez-Monroy, M., Romer, A. K., Roodman, A., Sanchez, E., Schubnell, M., Serrano, S., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Soares-Santos, M., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarle, G., To, C., Troxel, M. A., Varga, T. N., Walker, A. R., Zhang, Y., and DES Collaboration (2021). C/2014 UN₂₇₁ (Bernardinelli-Bernstein): The Nearly Spherical Cow of Comets. *Astrophys. J. Lett.*, 921(2):L37.
- Bernardinelli, P. H., Bernstein, G. M., Sako, M., Yanny, B., Agüena, M., Allam, S., Andrade-Oliveira, F., Bertin, E., Brooks, D., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Conselice, C., Costanzi, M., da Costa, L. N., De Vicente, J., Desai, S., Diehl, H. T., Dietrich, J. P., Doel, P., Eckert, K., Everett, S., Ferrero, I., Flaugher, B., Fosalba, P., Frieman, J., García-Bellido, J., Gerdes, D. W., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gschwend, J., Hinton, S. R., Hollowood, D. L., Honscheid, K., James, D. J., Kent, S., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Maia, M. A. G., March, M., Menanteau, F., Miquel, R., Morgan, R., Myles, J., Ogando, R. L. C., Palmese, A., Paz-Chinchón, F., Pieres, A., Plazas Malagón, A. A., Romer, A. K., Roodman, A., Sanchez, E., Scarpine, V., Schubnell, M., Serrano, S., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Soares-Santos, M., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarle, G., To, C.,

- Varga, T. N., and Walker, A. R. (2022). A Search of the Full Six Years of the Dark Energy Survey for Outer Solar System Objects. *Astrophys. J. Suppl.*, 258(2):41.
- Berthier, J., Vachier, F., Thuillot, W., Fernique, P., Ochsenbein, F., Genova, F., Lainey, V., and Arlot, J. E. (2006). SkyBoT, a new VO service to identify Solar System objects. In Gabriel, C., Arviset, C., Ponz, D., and Enrique, S., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, volume 351 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 367.
- Bertin, E. (2006). Automatic Astrometric and Photometric Calibration with SCAMP. In Gabriel, C., Arviset, C., Ponz, D., and Enrique, S., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, volume 351 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 112.
- Betzler, A. S. and Borges, E. P. (2012). Nonextensive distributions of asteroid rotation periods and diameters. *Astron. Astrophys.*, 539:A158.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 243–256.
- Binzel, R. P. and Xu, S. (1993). Chips off of Asteroid 4 Vesta: Evidence for the Parent Body of Basaltic Achondrite Meteorites. *Science*, 260(5105):186–191.
- Blitzstein, J. K. and Hwang, J. (2019). *Introduction to Probability*. CRC press.
- Bodifee, G. (1979). Pluton a un satellite. *L’Astronomie*, 93:179.
- Bottke, W. F., J., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P. (2002). An Overview of the Asteroids: The Asteroids III Perspective. In *Asteroids III*, pages 3–15.
- Bottke, W. F., Marschall, R., Nesvorný, D., and Vokrouhlický, D. (2023). Origin and Evolution of Jupiter’s Trojan Asteroids. *Space Sci. Rev.*, 219(8):83.
- Boulade, O., Charlot, X., Abbon, P., Aune, S., Borgeaud, P., Carton, P.-H., Carty, M., Da Costa, J., Deschamps, H., Desforge, D., Eppellé, D., Gallais, P., Gosset, L., Granelli, R., Gros, M., de Kat, J., Loiseau, D., Ritou, J. ., Roussé, J. Y., Starzynski, P., Vignal, N., and Vigroux, L. G. (2003). MegaCam: the new Canada-France-Hawaii Telescope wide-field imaging camera. In Iye, M. and Moorwood, A. F. M., editors, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, volume 4841 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 72–81.
- Bourdelle de Micas, J., Fornasier, S., Avdellidou, C., Delbo, M., van Belle, G., Ochner, P., Grundy, W., and Moskovitz, N. (2022). Composition of inner main-belt planetesimals. *Astron. Astrophys.*, 665:A83.

- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J., and Harris, A. W. (1989). Application of photometric models to asteroids. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, Asteroids II, pages 524–556.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Lellouch, E., Tancredi, G., Lecacheux, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Behrend, R., Vachier, F., Colas, F., Morales, N., Maury, A., Emilio, M., Amorim, A., Unda-Sanzana, E., Roland, S., Bruzzone, S., Almeida, L. A., Rodrigues, C. V., Jacques, C., Gil-Hutton, R., Vanzi, L., Milone, A. C., Schoenell, W., Salvo, R., Almenares, L., Jehin, E., Manfroid, J., Sposetti, S., Tanga, P., Klotz, A., Frappa, E., Cacella, P., Colque, J. P., Neves, C., Alvarez, E. M., Gillon, M., Pimentel, E., Giacchini, B., Roques, F., Widemann, T., Magalhães, V. S., Thirouin, A., Duffard, R., Leiva, R., Toledo, I., Capeche, J., Beisker, W., Pollock, J., Cedeño Montaña, C. E., Ivarsen, K., Reichart, D., Haislip, J., and Lacluyze, A. (2013). The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations. Astrophys. J., 773(1):26.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Snodgrass, C., Roques, F., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Duffard, R., Jehin, E., Pollock, J., Leiva, R., Emilio, M., Machado, D. I., Colazo, C., Lellouch, E., Skottfelt, J., Gillon, M., Ligier, N., Maquet, L., Benedetti-Rossi, G., Gomes, A. R., Kervella, P., Monteiro, H., Sfair, R., El Moutamid, M., Tancredi, G., Spagnotto, J., Maury, A., Morales, N., Gil-Hutton, R., Roland, S., Ceretta, A., Gu, S. H., Wang, X. B., Harpsøe, K., Rabus, M., Manfroid, J., Opitom, C., Vanzi, L., Mehret, L., Lorenzini, L., Schneiter, E. M., Melia, R., Lecacheux, J., Colas, F., Vachier, F., Widemann, T., Almenares, L., Sandness, R. G., Char, F., Perez, V., Lemos, P., Martinez, N., Jørgensen, U. G., Dominik, M., Roig, F., Reichart, D. E., Lacluyze, A. P., Haislip, J. B., Ivarsen, K. M., Moore, J. P., Frank, N. R., and Lambas, D. G. (2014). A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. Nature, 508(7494):72–75.
- Brown, M. E. (2012). The Compositions of Kuiper Belt Objects. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 40(1):467–494.
- Brown, M. E., Schaller, E. L., and Fraser, W. C. (2011). A Hypothesis for the Color Diversity of the Kuiper Belt. Astrophys. J. Lett., 739(2):L60.
- Burbine, T. H., Buchanan, P. C., Binzel, R. P., Bus, S. J., Hiroi, T., Hinrichs, J. L., Meibom, A., and McCoy, T. J. (2001). Vesta, Vestoids, and the howardite, eucrite, diogenite group: Relationships and the origin of spectral differences. , 36(6):761–781.
- Burke, D. L., Rykoff, E. S., Allam, S., Annis, J., Bechtol, K., Bernstein, G. M., Drlica-Wagner, A., Finley, D. A., Gruendl, R. A., James, D. J., Kent, S., Kessler, R., Kuhlmann, S., Lasker, J., Li, T. S., Scolnic, D., Smith, J., Tucker, D. L., Wester, W., Yanny, B., Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Benoit-Lévy, A., Bertin, E., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Cunha, C. E., D’Andrea, C. B., da Costa,

- L. N., Desai, S., Diehl, H. T., Doel, P., Estrada, J., García-Bellido, J., Gruen, D., Gutierrez, G., Honscheid, K., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Maia, M. A. G., March, M., Marshall, J. L., Melchior, P., Menanteau, F., Miquel, R., Plazas, A. A., Sako, M., Sanchez, E., Scarpine, V., Schindler, R., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Suchyta, E., Tarle, G., Walker, A. R., and DES Collaboration (2018). Forward Global Photometric Calibration of the Dark Energy Survey. *Astron. J.*, 155(1):41.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158(1):146–177.
- Butkevich, A. G. and Lindegren, L. (2014). Rigorous treatment of barycentric stellar motion. Perspective and light-time effects in astrometric and radial velocity data. *Astron. Astrophys.*, 570:A62.
- Carruba, V., Aljbaae, S., and Domingos, R. C. (2021). Identification of asteroid groups in the z_1 and z_2 nonlinear secular resonances through genetic algorithms. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 133(6):24.
- Carruba, V., Domingos, R. C., Nesvorný, D., Roig, F., Huaman, M. E., and Souami, D. (2013). A multidomain approach to asteroid families' identification. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 433(3):2075–2096.
- Carruba, V., Huaman, M. E., Domingos, R. C., Santos, C. R. D., and Souami, D. (2014). Dynamical evolution of V-type asteroids in the central main belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(3):3168–3179.
- Carry, B., Peloton, J., Le Montagner, R., Mahlke, M., and Berthier, J. (2024). Combined spin orientation and phase function of asteroids. *Astron. Astrophys.*, 687:A38.
- Carry, B., Solano, E., Eggl, S., and DeMeo, F. E. (2016). Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry. *Icarus*, 268:340–354.
- Carry, B., Vernazza, P., Vachier, F., Neveu, M., Berthier, J., Hanuš, J., Ferrais, M., Jorda, L., Marsset, M., Viikinkoski, M., Bartczak, P., Behrend, R., Benkhaldoun, Z., Birlan, M., Castillo-Rogez, J., Cipriani, F., Colas, F., Drouard, A., Dudziński, G. P., Desmars, J., Dumas, C., Ďurech, J., Fetick, R., Fusco, T., Grice, J., Jehin, E., Kaasalainen, M., Kryszczyńska, A., Lamy, P., Marchis, F., Marciniak, A., Michalowski, T., Michel, P., Pajuelo, M., Podlewska-Gaca, E., Rambaux, N., Santana-Ros, T., Storrs, A., Tanga, P., Vigan, A., Warner, B., Wiczorek, M., Witasse, O., and Yang, B. (2021). Evidence for differentiation of the most primitive small bodies. *Astron. Astrophys.*, 650:A129.
- Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., and Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *Astron. Astrophys.*, 510:A43.

- Chambers, K. C. and Pan-STARRS Team (2017). The Pan-STARRS1 Survey Data Release. In American Astronomical Society Meeting Abstracts #229, volume 229 of American Astronomical Society Meeting Abstracts, page 223.03.
- Chan, T. F., Golub, G. H., and LeVeque, R. J. (1979). Updating formulae and a pairwise algorithm for computing sample variances. Technical report, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Chandler, C. O., Kueny, J. K., Trujillo, C. A., Trilling, D. E., and Oldroyd, W. J. (2020). Cometary activity discovered on a distant centaur: A nonaqueous sublimation mechanism. The Astrophysical Journal Letters, 892(2):L38.
- Chen, Y.-T., Eduardo, M. R., Muñoz-Gutiérrez, M. A., Wang, S.-Y., Lehner, M. J., and Chang, C.-K. (2022). A Low-inclination Neutral Trans-Neptunian Object in an Extreme Orbit. Astrophys. J. Lett., 937(2):L22.
- Chen, P. W. and Wang, J. Y. and Lee H. (2004). Model selection of SVMs using GA approach. In 2004 IEEE international joint conference on neural networks (IEEE Cat No04CH37541), volume 3, pages 2035–2040.
- Cochran, A. L., Levasseur-Regourd, A.-C., Cordiner, M., Hadamcik, E., Lasue, J., Gicquel, A., Schleicher, D. G., Charnley, S. B., Mumma, M. J., Paganini, L., Bockelée-Morvan, D., Biver, N., and Kuan, Y.-J. (2015). The Composition of Comets. Space Sci. Rev., 197(1-4):9–46.
- Conover, W. (1971). Practical Nonparametric Statistics. Wiley.
- Coradini, A., Fulchignoni, M., Fanucci, O., and Gavrishin, A. I. (1977). A FORTRAN V program for a new classification technique: the g-mode central method. Computers and Geosciences, 3(1):85–105.
- Cortes, C. and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine learning, 20(3):273–297.
- Cunningham, C. J., Marsden, B. G., and Orchiston, W. (2009). How the first dwarf planet became the asteroid Ceres. Journal of Astronomical History and Heritage, 12(3):240–248.
- Dalle Ore, C. M., Dalle Ore, L. V., Roush, T. L., Cruikshank, D. P., Emery, J. P., Pinilla-Alonso, N., and Marzo, G. A. (2013). A compositional interpretation of trans-neptunian objects taxonomies. Icarus, 222(1):307–322.
- Daly, R. T., Barnouin, O. S., Cheng, A. F., Plescia, J. B., Richardson, D. C., DeMartini, J. V., Schmerr, N. C., Sunshine, J. M., Ernst, C. M., Denevi, B. W., Cahill, J. T., Davis, A. K., Chabot, N. C., and Loretta, D. S. (2020). The Planetary Defense and Science Case for a Mission to Study Apophis Before, During, and After Its Closest Earth Approach in 2029. In LPI Editorial Board, editor, Apophis T-9 Years: Knowledge

Opportunities for the Science of Planetary Defense, volume 2242 of LPI Contributions, page 2043.

- Dark Energy Survey Collaboration, Abbott, T., Abdalla, F. B., Aleksić, J., Allam, S., Amara, A., Bacon, D., Balbinot, E., Banerji, M., Bechtol, K., Benoit-Lévy, A., Bernstein, G. M., Bertin, E., Blazek, J., Bonnett, C., Bridle, S., Brooks, D., Brunner, R. J., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Caminha, G. B., Capozzi, D., Carlsen, J., Carnero-Rosell, A., Carollo, M., Carrasco-Kind, M., Carretero, J., Castander, F. J., Clerkin, L., Collett, T., Conselice, C., Croce, M., Cunha, C. E., D'Andrea, C. B., da Costa, L. N., Davis, T. M., Desai, S., Diehl, H. T., Dietrich, J. P., Dodelson, S., Doel, P., Drlica-Wagner, A., Estrada, J., Etherington, J., Evrard, A. E., Fabbri, J., Finley, D. A., Flaugher, B., Foley, R. J., Fosalba, P., Frieman, J., García-Bellido, J., Gaztanaga, E., Gerdes, D. W., Giannantonio, T., Goldstein, D. A., Gruen, D., Gruendl, R. A., Guarnieri, P., Gutierrez, G., Hartley, W., Honscheid, K., Jain, B., James, D. J., Jeltrema, T., Jouvel, S., Kessler, R., King, A., Kirk, D., Kron, R., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Li, T. S., Lima, M., Lin, H., Maia, M. A. G., Makler, M., Manera, M., Maraston, C., Marshall, J. L., Martini, P., McMahan, R. G., Melchior, P., Merson, A., Miller, C. J., Miquel, R., Mohr, J. J., Morice-Atkinson, X., Naidoo, K., Neilsen, E., Nichol, R. C., Nord, B., Ogando, R., Ostrovski, F., Palmese, A., Papadopoulos, A., Peiris, H. V., Peoples, J., Percival, W. J., Plazas, A. A., Reed, S. L., Refregier, A., Romer, A. K., Roodman, A., Ross, A., Roza, E., Rykoff, E. S., Sadeh, I., Sako, M., Sánchez, C., Sanchez, E., Santiago, B., Scarpine, V., Schubnell, M., Sevilla-Noarbe, I., Sheldon, E., Smith, M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Soumagnac, M., Suchyta, E., Sullivan, M., Swanson, M., Tarle, G., Thaler, J., Thomas, D., Thomas, R. C., Tucker, D., Vieira, J. D., Vikram, V., Walker, A. R., Wechsler, R. H., Weller, J., Wester, W., Whiteway, L., Wilcox, H., Yanny, B., Zhang, Y., and Zuntz, J. (2016). The Dark Energy Survey: more than dark energy - an overview. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 460(2):1270–1299.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Licandro, J., Serra-Ricart, M., Martino, S., de León, J., Chaudry, F., and Alarcón, M. R. (2021). The active centaur 2020 MK₄. Astron. Astrophys., 649:A85.
- de León, J., Licandro, J., and Pinilla-Alonso, N. (2018). The Diverse Population of Small Bodies of the Solar System. In Deeg, H. J. and Belmonte, J. A., editors, Handbook of Exoplanets, page 55.
- Delbo', M., Walsh, K., Bolin, B., Avdellidou, C., and Morbidelli, A. (2017). Identification of a primordial asteroid family constrains the original planetesimal population. Science, 357(6355):1026–1029.
- Delsanti, A., Hainaut, O., Jourdeuil, E., Meech, K. J., Boehnhardt, H., and Barrera, L. (2004). Simultaneous visible-near IR photometric study of Kuiper Belt Object surfaces with the ESO/Very Large Telescopes. Astron. Astrophys., 417:1145–1158.

- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1):160–180.
- DeMeo, F. E. and Carry, B. (2013). The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226(1):723–741.
- DeMeo, F. E. and Carry, B. (2014). Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505(7485):629–634.
- Desmars, J. (2015). Detection of Yarkovsky acceleration in the context of precovery observations and the future Gaia catalogue. *Astron. Astrophys.*, 575:A53.
- Desmars, J., Camargo, J. I. B., Braga-Ribas, F., Vieira-Martins, R., Assafin, M., Vachier, F., Colas, F., Ortiz, J. L., Duffard, R., Morales, N., Sicardy, B., Gomes-Júnior, A. R., and Benedetti-Rossi, G. (2015). Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astron. Astrophys.*, 584:A96.
- Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Braga-Ribas, F., Leiva, R., Vieira-Martins, R., Benedetti-Rossi, G., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Gomes-Júnior, A. R., Baug, T., Chandrasekhar, T., Desmars, J., Duffard, R., Santos-Sanz, P., Ergang, Z., Ganesh, S., Ikari, Y., Irawati, P., Jain, J., Liying, Z., Richichi, A., Shengbang, Q., Behrend, R., Benkhaldoun, Z., Brosch, N., Daassou, A., Frappa, E., Gal-Yam, A., Garcia-Lozano, R., Gillon, M., Jehin, E., Kaspi, S., Klotz, A., Lecacheux, J., Mahasena, P., Manfroid, J., Manulis, I., Maury, A., Mohan, V., Morales, N., Ofek, E., Rinner, C., Sharma, A., Sposetti, S., Tanga, P., Thirouin, A., Vachier, F., Widemann, T., Asai, A., Hayato, W., Hiroyuki, W., Owada, M., Yamamura, H., Hayamizu, T., Bradshaw, J., Kerr, S., Tomioka, H., Andersson, S., Dangl, G., Haymes, T., Naves, R., and Wortmann, G. (2017). Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ₈₄ from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features. *Astron. J.*, 154(1):22.
- Dobson, M. M., Schwamb, M. E., Benecchi, S. D., Verbiscer, A. J., Fitzsimmons, A., Shingles, L. J., Denneau, L., Heinze, A. N., Smith, K. W., Tonry, J. L., Weiland, H., and Young, D. R. (2023). Phase Curves of Kuiper Belt Objects, Centaurs, and Jupiter-family Comets from the ATLAS Survey. , 4(4):75.
- Dobson, M. M., Schwamb, M. E., Fitzsimmons, A., Schambeau, C., Beck, A., Denneau, L., Erasmus, N., Heinze, A. N., Shingles, L. J., Siverd, R. J., Smith, K. W., Tonry, J. L., Weiland, H., Young, D. R., Kelley, M. S. P., Lister, T., Bernardinelli, P. H., Ferrais, M., Jehin, E., Fedorets, G., Benecchi, S. D., Verbiscer, A. J., Murtagh, J., Duffard, R., Gomez, E., Chatelain, J., and Greenstreet, S. (2024). The Discovery and Evolution of a Possible New Epoch of Cometary Activity by the Centaur (2060) Chiron. , 5(7):165.
- Doressoundiram, A., Boehnhardt, H., Tegler, S. C., and Trujillo, C. (2008). Color Properties and Trends of the Transneptunian Objects. In Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., and Dotson, R., editors, *The Solar System Beyond Neptune*, pages 91–104.

- Doressoundiram, A., Peixinho, N., de Bergh, C., Fornasier, S., Thébault, P., Barucci, M. A., and Veillet, C. (2002). The Color Distribution in the Edgeworth-Kuiper Belt. *Astron. J.*, 124(4):2279–2296.
- Drlica-Wagner, A., Sevilla-Noarbe, I., Rykoff, E. S., Gruendl, R. A., Yanny, B., Tucker, D. L., Hoyle, B., Carnero Rosell, A., Bernstein, G. M., Bechtol, K., Becker, M. R., Benoit-Lévy, A., Bertin, E., Carrasco Kind, M., Davis, C., de Vicente, J., Diehl, H. T., Gruen, D., Hartley, W. G., Leistedt, B., Li, T. S., Marshall, J. L., Neilsen, E., Rau, M. M., Sheldon, E., Smith, J., Troxel, M. A., Wyatt, S., Zhang, Y., Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Allam, S., Banerji, M., Brooks, D., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Capozzi, D., Carretero, J., Cunha, C. E., D’Andrea, C. B., da Costa, L. N., DePoy, D. L., Desai, S., Dietrich, J. P., Doel, P., Evrard, A. E., Fausti Neto, A., Flaugher, B., Fosalba, P., Frieman, J., García-Bellido, J., Gerdes, D. W., Giannantonio, T., Gschwend, J., Gutierrez, G., Honscheid, K., James, D. J., Jeltama, T., Kuehn, K., Kuhlmann, S., Kuropatkin, N., Lahav, O., Lima, M., Lin, H., Maia, M. A. G., Martini, P., McMahon, R. G., Melchior, P., Menanteau, F., Miquel, R., Nichol, R. C., Ogando, R. L. C., Plazas, A. A., Romer, A. K., Roodman, A., Sanchez, E., Scarpine, V., Schindler, R., Schubnell, M., Smith, M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Suchyta, E., Tarle, G., Vikram, V., Walker, A. R., Wechsler, R. H., Zuntz, J., and DES Collaboration (2018). Dark Energy Survey Year 1 Results: The Photometric Data Set for Cosmology. *Astrophys. J. Suppl.*, 235(2):33.
- Duffard, R., Ortiz, J. L., Thirouin, A., Santos-Sanz, P., and Morales, N. (2009). Transneptunian objects and Centaurs from light curves. *Astron. Astrophys.*, 505(3):1283–1295.
- Edgeworth, K. E. (1949). The origin and evolution of the Solar System. *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, 109:600–609.
- Elliot, J. L. (1979). Stellar occultation studies of the solar system. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 17:445–475.
- Emery, J. P., Burr, D. M., and Cruikshank, D. P. (2011). Near-infrared Spectroscopy of Trojan Asteroids: Evidence for Two Compositional Groups. *Astron. J.*, 141(1):25.
- Fernandez, J. A. (1980). On the existence of a comet belt beyond Neptune. *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, 192:481–491.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., and Sheppard, S. S. (2002). Thermal Properties of Centaurs Asbolus and Chiron. *Astron. J.*, 123(2):1050–1055.
- Fernández, Y. R., Sheppard, S. S., and Jewitt, D. C. (2003). The Albedo Distribution of Jovian Trojan Asteroids. *Astron. J.*, 126(3):1563–1574.
- Fernández-Valenzuela, E., Pinilla-Alonso, N., Stansberry, J., Emery, J. P., Perkins, W., Van Laerhoven, C., Gladman, B. J., Fraser, W. C., Cruikshank, D., Lellouch, E., Müller, T. G., Grundy, W. M., Trilling, D., Fernandez, Y., and Dalle Ore, C. (2021). Compositional Study of Trans-Neptunian Objects at $\lambda \lesssim 2.2 \mu\text{m}$. *PSJ*, 2(1):10.

- Ferreira, J. F., Tanga, P., Machado, P., and Corsaro, E. (2020). A survey for occultation astrometry of main belt: expected astrometric performances. *Astron. Astrophys.*, 641:A81.
- Flaugher, B., Diehl, H. T., Honscheid, K., Abbott, T. M. C., Alvarez, O., Angstadt, R., Annis, J. T., Antonik, M., Ballester, O., Beaufore, L., Bernstein, G. M., Bernstein, R. A., Bigelow, B., Bonati, M., Boprie, D., Brooks, D., Buckley-Geer, E. J., Campa, J., Cardiel-Sas, L., Castander, F. J., Castilla, J., Cease, H., Cela-Ruiz, J. M., Chappa, S., Chi, E., Cooper, C., da Costa, L. N., Dede, E., Derylo, G., DePoy, D. L., de Vicente, J., Doel, P., Drlica-Wagner, A., Eiting, J., Elliott, A. E., Emes, J., Estrada, J., Fausti Neto, A., Finley, D. A., Flores, R., Frieman, J., Gerdes, D., Gladders, M. D., Gregory, B., Gutierrez, G. R., Hao, J., Holland, S. E., Holm, S., Huffman, D., Jackson, C., James, D. J., Jonas, M., Karcher, A., Karliner, I., Kent, S., Kessler, R., Kozlovsky, M., Kron, R. G., Kubik, D., Kuehn, K., Kuhlmann, S., Kuk, K., Lahav, O., Lathrop, A., Lee, J., Levi, M. E., Lewis, P., Li, T. S., Mandrichenko, I., Marshall, J. L., Martinez, G., Merritt, K. W., Miquel, R., Muñoz, F., Neilsen, E. H., Nichol, R. C., Nord, B., Ogando, R., Olsen, J., Palaio, N., Patton, K., Peoples, J., Plazas, A. A., Rauch, J., Reil, K., Rheault, J. P., Roe, N. A., Rogers, H., Roodman, A., Sanchez, E., Scarpine, V., Schindler, R. H., Schmidt, R., Schmitt, R., Schubnell, M., Schultz, K., Schurter, P., Scott, L., Serrano, S., Shaw, T. M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Stefanik, A., Stuermer, W., Suchyta, E., Sypniewski, A., Tarle, G., Thaler, J., Tighe, R., Tran, C., Tucker, D., Walker, A. R., Wang, G., Watson, M., Weaverdyck, C., Wester, W., Woods, R., Yanny, B., and DES Collaboration (2015). The Dark Energy Camera. *Astron. J.*, 150(5):150.
- Florczak, M., Lazzaro, D., and Duffard, R. (2002). Discovering New V-Type Asteroids in the Vicinity of 4 Vesta. *Icarus*, 159(1):178–182.
- Fornasier, S., Barucci, M. A., de Bergh, C., Alvarez-Candal, A., DeMeo, F., Merlin, F., Perna, D., Guilbert, A., Delsanti, A., Dotto, E., and Doressoundiram, A. (2009). Visible spectroscopy of the new ESO large programme on trans-Neptunian objects and Centaurs: final results. *Astron. Astrophys.*, 508(1):457–465.
- Fraser, W. C. and Brown, M. E. (2012). The Hubble Wide Field Camera 3 Test of Surfaces in the Outer Solar System: The Compositional Classes of the Kuiper Belt. *Astrophys. J.*, 749(1):33.
- Fraser, W. C., Brown, M. E., and Glass, F. (2015). The Hubble Wide Field Camera 3 Test of Surfaces in the Outer Solar System: Spectral Variation on Kuiper Belt Objects. *Astrophys. J.*, 804(1):31.
- Fraser, W. C., Brown, M. E., Morbidelli, A., Parker, A., and Batygin, K. (2014). The Absolute Magnitude Distribution of Kuiper Belt Objects. *Astrophys. J.*, 782(2):100.

- Fraser, W. C., Pike, R. E., Marsset, M., Schwamb, M. E., Bannister, M. T., Buchanan, L., Kavelaars, J. J., Benecchi, S. D., Tan, N. J., Peixinho, N., Gwyn, S. D. J., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gladman, B., and Volk, K. (2023). Col-OSSOS: The Two Types of Kuiper Belt Surfaces. , 4(5):80.
- Fulchignoni, M., Belskaya, I., Barucci, M. A., de Sanctis, M. C., and Doressoundiram, A. (2008). Transneptunian Object Taxonomy. In Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., and Dotson, R., editors, The Solar System Beyond Neptune, pages 181–192.
- Fulchignoni, M., Birlan, M., and Antonietta Barucci, M. (2000). The Extension of the G-Mode Asteroid Taxonomy. *Icarus*, 146(1):204–212.
- Gaia Collaboration (2022). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 3. Non-single stars (Gaia Collaboration, 2022). VizieR On-line Data Catalog: I/357. Originally published in: *Astron. Astrophys.*, in prep. (2022).
- Gerdes, D. W., Jennings, R. J., Bernstein, G. M., Sako, M., Adams, F., Goldstein, D., Kessler, R., Hamilton, S., Abbott, T., Abdalla, F. B., Allam, S., Benoit-Lévy, A., Bertin, E., Brooks, D., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Capozzi, D., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Cunha, C. E., D’Andrea, C. B., da Costa, L. N., DePoy, D. L., Desai, S., Dietrich, J. P., Doel, P., Eifler, T. F., Fausti Neto, A., Flaughner, B., Frieman, J., Gaztanaga, E., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gutierrez, G., Honscheid, K., James, D. J., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Li, T. S., Maia, M. A. G., March, M., Martini, P., Miller, C. J., Miquel, R., Nichol, R. C., Nord, B., Ogando, R., Plazas, A. A., Romer, A. K., Roodman, A., Sanchez, E., Santiago, B., Schubnell, M., Sevilla-Noarbe, I., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarlé, G., Thaler, J., Walker, A. R., Wester, W., Zhang, Y., and DES Collaboration (2016). Observation of Two New L4 Neptune Trojans in the Dark Energy Survey Supernova Fields. *Astron. J.*, 151(2):39.
- Gerdes, D. W., Sako, M., Hamilton, S., Zhang, K., Khain, T., Becker, J. C., Annis, J., Wester, W., Bernstein, G. M., Scheibner, C., Zullo, L., Adams, F., Bergin, E., Walker, A. R., Mueller, J. H., Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Allam, S., Bechtol, K., Benoit-Lévy, A., Bertin, E., Brooks, D., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Cunha, C. E., da Costa, L. N., Desai, S., Diehl, H. T., Eifler, T. F., Flaughner, B., Frieman, J., García-Bellido, J., Gaztanaga, E., Goldstein, D. A., Gruen, D., Gschwend, J., Gutierrez, G., Honscheid, K., James, D. J., Kent, S., Krause, E., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Li, T. S., Maia, M. A. G., March, M., Marshall, J. L., Martini, P., Menanteau, F., Miquel, R., Nichol, R. C., Plazas, A. A., Romer, A. K., Roodman, A., Sanchez, E., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Suchyta, E., Swanson, M. E. C., Tarle, G., Tucker, D. L., Zhang, Y., and DES Collaboration (2017). Discovery and Physical Characterization of a Large Scattered Disk Object at 92 au. *Astrophys. J. Lett.*, 839(1):L15.

- Gladman, B., Marsden, B. G., and Vanlaerhoven, C. (2008). Nomenclature in the Outer Solar System. In Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., and Dotson, R., editors, *The Solar System Beyond Neptune*, pages 43–57.
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041):466–469.
- Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., Bouffeur, R. C., Rommel, F. L., Banda-Huarca, M. V., Kilic, Y., Braga-Ribas, F., and Sicardy, B. (2022). SORA: Stellar occultation reduction and analysis. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 511(1):1167–1181.
- Grav, T., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Masiero, J. R., and Nugent, C. R. (2012). WISE/NEOWISE Observations of the Jovian Trojan Population: Taxonomy. *Astrophys. J.*, 759(1):49.
- Grundy, W. M., Noll, K. S., and Stephens, D. C. (2005). Diverse albedos of small trans-neptunian objects. *Icarus*, 176(1):184–191.
- Guilbert-Lepoutre, A. (2012). Survival of Amorphous Water Ice on Centaurs. *Astron. J.*, 144(4):97.
- Hainaut, O. R., Boehnhardt, H., and Protopapa, S. (2012). Colours of minor bodies in the outer solar system. II. A statistical analysis revisited. *Astron. Astrophys.*, 546:A115.
- Hainaut, O. R. and Delsanti, A. C. (2002). Colors of Minor Bodies in the Outer Solar System. A statistical analysis. *Astron. Astrophys.*, 389:641–664.
- Hanuš, J., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., Ďurech, J., Stephens, R., Benishek, V., Oey, J., and Pokorný, P. (2023). Shape models and spin states of Jupiter Trojans. Testing the streaming instability formation scenario. *Astron. Astrophys.*, 679:A56.
- Harris, A. W. and Burns, J. A. (1979). Asteroid rotation I. Tabulation and analysis of rates, pole positions and shapes. *Icarus*, 40(1):115–144.
- Harris, A. W. and Harris, A. W. (1997). On the Revision of Radiometric Albedos and Diameters of Asteroids. *Icarus*, 126(2):450–454.
- Hartmann, W. K., Tholen, D. J., and Cruikshank, D. P. (1987). The relationship of active comets, “extinct” comets, and dark asteroids. *Icarus*, 69(1):33–50.
- Hodapp, K. W., Jensen, J. B., Irwin, E. M., Yamada, H., Chung, R., Fletcher, K., Robertson, L., Hora, J. L., Simons, D. A., Mays, W., Nolan, R., Bec, M., Merrill, M., and Fowler, A. M. (2003). The Gemini Near-Infrared Imager (NIRI). *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 115(814):1388–1406.

- Hook, I. M., Jørgensen, I., Allington-Smith, J. R., Davies, R. L., Metcalfe, N., Murawinski, R. G., and Crampton, D. (2004). The Gemini-North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 116(819):425–440.
- Hsieh, H. H., Kelley, M. S. P., Lister, T. A., Usher, H., Gomez, E., Chatelain, J. P., and Greenstreet, S. (2023). Activity in Centaur-like Jupiter-family Comet 2023 RN₃. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 7(12):263.
- Huaman, M. E., Carruba, V., and Domingos, R. C. (2014). Dynamical evolution of V-type photometric candidates in the outer main belt. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 444(3):2985–2992.
- Huang, Y., Gladman, B., and Volk, K. (2022). Free Inclinations for Trans-Neptunian Objects in the Main Kuiper Belt. *Astrophys. J. Suppl.*, 259(2):54.
- Hughes, D. W. (2003). The absolute magnitude distribution of trans-Neptunian objects. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 345(3):981–984.
- Ieva, S., Dotto, E., Lazzaro, D., Fulvio, D., Perna, D., Mazzotta Epifani, E., Medeiros, H., and Fulchignoni, M. (2018). Basaltic material in the main belt: a tale of two (or more) parent bodies? *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 479(2):2607–2614.
- Ivezić, Ž., Kahn, S. M., Tyson, J. A., Abel, B., Acosta, E., Allsman, R., Alonso, D., AlSayyad, Y., Anderson, S. F., Andrew, J., Angel, J. R. P., Angeli, G. Z., Ansari, R., Antilogus, P., Araujo, C., Armstrong, R., Arndt, K. T., Astier, P., Aubourg, É., Auza, N., Axelrod, T. S., Bard, D. J., Barr, J. D., Barrau, A., Bartlett, J. G., Bauer, A. E., Bauman, B. J., Baumont, S., Bechtol, E., Bechtol, K., Becker, A. C., Becla, J., Beldica, C., Bellavia, S., Bianco, F. B., Biswas, R., Blanc, G., Blazek, J., Blandford, R. D., Bloom, J. S., Bogart, J., Bond, T. W., Booth, M. T., Borgland, A. W., Borne, K., Bosch, J. F., Boutigny, D., Brackett, C. A., Bradshaw, A., Brandt, W. N., Brown, M. E., Bullock, J. S., Burchat, P., Burke, D. L., Cagnoli, G., Calabrese, D., Callahan, S., Callen, A. L., Carlin, J. L., Carlson, E. L., Chandrasekharan, S., Charles-Emerson, G., Chesley, S., Cheu, E. C., Chiang, H.-F., Chiang, J., Chirino, C., Chow, D., Ciardi, D. R., Claver, C. F., Cohen-Tanugi, J., Cockrum, J. J., Coles, R., Connolly, A. J., Cook, K. H., Cooray, A., Covey, K. R., Cribbs, C., Cui, W., Cutri, R., Daly, P. N., Daniel, S. F., Daruich, F., Daubard, G., Dagues, G., Dawson, W., Delgado, F., Dellapenna, A., de Peyster, R., de Val-Borro, M., Digel, S. W., Doherty, P., Dubois, R., Dubois-Felsmann, G. P., Durech, J., Economou, F., Eifler, T., Eracleous, M., Emmons, B. L., Fausti Neto, A., Ferguson, H., Figueroa, E., Fisher-Levine, M., Focke, W., Foss, M. D., Frank, J., Freemon, M. D., Gangler, E., Gawiser, E., Geary, J. C., Gee, P., Geha, M., Gessner, C. J. B., Gibson, R. R., Gilmore, D. K., Glanzman, T., Glick, W., Goldina, T., Goldstein, D. A., Goodenow, I., Graham, M. L., Gressler, W. J., Gris, P., Guy, L. P., Guyonnet, A., Haller, G., Harris, R., Hascall, P. A., Haupt, J., Hernandez, F., Herrmann, S., Hileman, E., Hoblitt, J., Hodgson, J. A., Hogan, C.,

- Howard, J. D., Huang, D., Huffer, M. E., Ingraham, P., Innes, W. R., Jacoby, S. H., Jain, B., Jammes, F., Jee, M. J., Jenness, T., Jernigan, G., Jevremović, D., Johns, K., Johnson, A. S., Johnson, M. W. G., Jones, R. L., Juramy-Gilles, C., Jurić, M., Kalirai, J. S., Kallivayalil, N. J., Kalmbach, B., Kantor, J. P., Karst, P., Kasliwal, M. M., Kelly, H., Kessler, R., Kinnison, V., Kirkby, D., Knox, L., Kotov, I. V., Krabbendam, V. L., Krughoff, K. S., Kubánek, P., Kuczewski, J., Kulkarni, S., Ku, J., Kurita, N. R., Lage, C. S., Lambert, R., Lange, T., Langton, J. B., Le Guillou, L., Levine, D., Liang, M., Lim, K.-T., Lintott, C. J., Long, K. E., Lopez, M., Lotz, P. J., Lupton, R. H., Lust, N. B., MacArthur, L. A., Mahabal, A., Mandelbaum, R., Markiewicz, T. W., Marsh, D. S., Marshall, P. J., Marshall, S., May, M., McKercher, R., McQueen, M., Meyers, J., Migliore, M., Miller, M., Mills, D. J., Miraval, C., Moeyens, J., Moolekamp, F. E., Monet, D. G., Moniez, M., Monkewitz, S., Montgomery, C., Morrison, C. B., Mueller, F., Muller, G. P., Muñoz Arancibia, F., Neill, D. R., Newbry, S. P., Nief, J.-Y., Nomerotski, A., Nordby, M., O'Connor, P., Oliver, J., Olivier, S. S., Olsen, K., O'Mullane, W., Ortiz, S., Osier, S., Owen, R. E., Pain, R., Palecek, P. E., Parejko, J. K., Parsons, J. B., Pease, N. M., Peterson, J. M., Peterson, J. R., Petravick, D. L., Libby Petrick, M. E., Petry, C. E., Pierfederici, F., Pietrowicz, S., Pike, R., Pinto, P. A., Plante, R., Plate, S., Plutchak, J. P., Price, P. A., Prouza, M., Radeka, V., Rajagopal, J., Rasmussen, A. P., Regnault, N., Reil, K. A., Reiss, D. J., Reuter, M. A., Ridgway, S. T., Riot, V. J., Ritz, S., Robinson, S., Roby, W., Roodman, A., Rosing, W., Roucelle, C., Rumore, M. R., Russo, S., Saha, A., Sassolas, B., Schalk, T. L., Schellart, P., Schindler, R. H., Schmidt, S., Schneider, D. P., Schneider, M. D., Schoening, W., Schumacher, G., Schwamb, M. E., Sebag, J., Selvy, B., Sembroski, G. H., Seppala, L. G., Serio, A., Serrano, E., Shaw, R. A., Shipsey, I., Sick, J., Silvestri, N., Slater, C. T., Smith, J. A., Smith, R. C., Sobhani, S., Soldahl, C., Storrie-Lombardi, L., Stover, E., Strauss, M. A., Street, R. A., Stubbs, C. W., Sullivan, I. S., Sweeney, D., Swinbank, J. D., Szalay, A., Takacs, P., Tether, S. A., Thaler, J. J., Thayer, J. G., Thomas, S., Thornton, A. J., Thukral, V., Tice, J., Trilling, D. E., Turri, M., Van Berg, R., Vanden Berk, D., Vetter, K., Virieux, F., Vucina, T., Wahl, W., Walkowicz, L., Walsh, B., Walter, C. W., Wang, D. L., Wang, S.-Y., Warner, M., Wiecha, O., Willman, B., Winters, S. E., Wittman, D., Wolff, S. C., Wood-Vasey, W. M., Wu, X., Xin, B., Yoachim, P., and Zhan, H. (2019). LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. *Astrophys. J.*, 873(2):111.
- Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Jurić, M., Tabachnik, S., Quinn, T., Gunn, J. E., Knapp, G. R., Rockosi, C. M., and Brinkmann, J. (2002). Color Confirmation of Asteroid Families. *Astron. J.*, 124(5):2943–2948.
- Ivezić, Ž., Tabachnik, S., Rafikov, R., Lupton, R. H., Quinn, T., Hammergren, M., Eyer, L., Chu, J., Armstrong, J. C., Fan, X., Finlator, K., Geballe, T. R., Gunn, J. E., Hennessy, G. S., Knapp, G. R., Leggett, S. K., Munn, J. A., Pier, J. R., Rockosi, C. M., Schneider, D. P., Strauss, M. A., Yanny, B., Brinkmann, J., Csabai, I., Hindsley, R. B.,

- Kent, S., Lamb, D. Q., Margon, B., McKay, T. A., Smith, J. A., Waddel, P., York, D. G., and SDSS Collaboration (2001). Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *Astron. J.*, 122(5):2749–2784.
- Jewitt, D. (2009). The Active Centaurs. *Astron. J.*, 137(5):4296–4312.
- Jewitt, D. (2012). The Active Asteroids. *Astron. J.*, 143(3):66.
- Jewitt, D. and Luu, J. (1993). Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB₁. *Nature*, 362(6422):730–732.
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P. J. (2009). Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. John Wiley & Sons.
- Kavelaars, J., Jones, L., Gladman, B., Parker, J. W., and Petit, J. M. (2008). The Orbital and Spatial Distribution of the Kuiper Belt. In Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., and Dotson, R., editors, The Solar System Beyond Neptune, pages 59–69.
- Kavelaars, J., Petit, J.-M., Gladman, B., Bannister, M., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gwyn, S., and Volk, K. (2022). OSSOS finds an Exponential Cutoff in the Size Distribution of the Cold Classical Kuiper belt. In AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, volume 54 of AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, page 105.07.
- Kavelaars, J. J., Petit, J.-M., Gladman, B., Bannister, M. T., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gwyn, S. D. J., and Volk, K. (2021). OSSOS Finds an Exponential Cutoff in the Size Distribution of the Cold Classical Kuiper Belt. *Astrophys. J. Lett.*, 920(2):L28.
- Khare, B. N., Thompson, W. R., Cheng, L., Chyba, C., Sagan, C., Arakawa, E. T., Meisse, C., and Tuminello, P. S. (1993). Production and Optical Constants of Ice Tholin from Charged Particle Irradiation of (1:6) C₂H₆/H₂O at 77 K. *Icarus*, 103(2):290–300.
- Kilic, Y., Braga-Ribas, F., Kaplan, M., Erece, O., Souami, D., Dindar, M., Desmars, J., Sicardy, B., Morgado, B. E., Shameoni, M. N., Rommel, F. L., and Gomes-Júnior, A. R. (2022). Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 515(1):1346–1357.
- Kind, M., Drlica-Wagner, A., Koziol, A., and Petravick, D. (2019). easyaccess: Enhanced SQL command line interpreter for astronomical surveys. *The Journal of Open Source Software*, 4(33):1022.
- Kokhirova, G. I. and Babadzhanov, P. B. (2023). Current Knowledge of Objects Approaching the Earth. *Solar System Research*, 57(5):467–485.
- Kowal, C. T. (1989). A solar system survey. *Icarus*, 77(1):118–123.

- Królikowska, M. and Dybczyński, P. A. (2010). Where do long-period comets come from? 26 comets from the non-gravitational Oort spike. Mon. Not, Roy. Astron. Soc., 404(4):1886–1902.
- Lacerda, P., Fornasier, S., Lellouch, E., Kiss, C., Vilenius, E., Santos-Sanz, P., Rengel, M., Müller, T., Stansberry, J., Duffard, R., Delsanti, A., and Guilbert-Lepoutre, A. (2014). The Albedo-Color Diversity of Transneptunian Objects. Astrophys. J. Lett., 793(1):L2.
- Lacerda, P. and Luu, J. (2006). Analysis of the Rotational Properties of Kuiper Belt Objects. Astron. J., 131(4):2314–2326.
- Lazzaro, D. (2024). Nossa vizinhança cósmica: o sistema solar. Cadernos de Astronomia, 5(2):6–16.
- Lazzaro, D., Angeli, C. A., Carvano, J. M., Mothé-Diniz, T., Duffard, R., and Florczak, M. (2004). S³OS²: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids. Icarus, 172(1):179–220.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quarterly of Applied Mathematics, 2(2):164–168.
- Levison, H. F., Bottke, W. F., Gounelle, M., Morbidelli, A., Nesvorný, D., and Tsiganis, K. (2009). Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects. Nature, 460(7253):364–366.
- Levison, H. F., Morbidelli, A., Van Laerhoven, C., Gomes, R., and Tsiganis, K. (2008). Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. Icarus, 196(1):258–273.
- Licandro, J., Popescu, M., de León, J., Morate, D., Vaduvescu, O., De Prá, M., and Ali-Laoga, V. (2018). The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits. Astron. Astrophys., 618:A170.
- Lin, H. W., Gerdes, D. W., Hamilton, S. J., Adams, F. C., Bernstein, G. M., Sako, M., Bernardelli, P., Tucker, D., Allam, S., Becker, J. C., Khain, T., Markwardt, L., Franson, K., Abbott, T. M. C., Annis, J., Avila, S., Brooks, D., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Cunha, C. E., D’Andrea, C. B., da Costa, L. N., De Vicente, J., Doel, P., Eifler, T. F., Flaugher, B., García-Bellido, J., Hollowood, D. L., Honscheid, K., James, D. J., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Maia, M. A. G., Marshall, J. L., Miquel, R., Plazas, A. A., Romer, A. K., Sanchez, E., Scarpine, V., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Sobreira, F., Suchyta, E., Tarle, G., Walker, A. R., and Wester, W. (2019). Evidence for color dichotomy in the primordial Neptunian Trojan population. Icarus, 321:426–435.
- Lindgren, L., Hernández, J., Bombrun, A., Klioner, S., Bastian, U., Ramos-Lerate, M., de Torres, A., Steidelmüller, H., Stephenson, C., Hobbs, D., Lammers, U., Biermann,

- M., Geyer, R., Hilger, T., Michalik, D., Stampa, U., McMillan, P. J., Castañeda, J., Clotet, M., Comoretto, G., Davidson, M., Fabricius, C., Gracia, G., Hambly, N. C., Hutton, A., Mora, A., Portell, J., van Leeuwen, F., Abbas, U., Abreu, A., Altmann, M., Andrei, A., Anglada, E., Balaguer-Núñez, L., Barache, C., Becciani, U., Bertone, S., Bianchi, L., Bouquillon, S., Bourda, G., Brüsemeister, T., Bucciarelli, B., Busonero, D., Buzzi, R., Cancelliere, R., Carlucci, T., Charlot, P., Cheek, N., Crosta, M., Crowley, C., de Bruijne, J., de Felice, F., Drimmel, R., Esquej, P., Fienga, A., Fraile, E., Gai, M., Garralda, N., González-Vidal, J. J., Guerra, R., Hauser, M., Hofmann, W., Holl, B., Jordan, S., Lattanzi, M. G., Lenhardt, H., Liao, S., Licata, E., Lister, T., Löffler, W., Marchant, J., Martin-Fleitas, J. M., Messineo, R., Mignard, F., Morbidelli, R., Poggio, E., Riva, A., Rowell, N., Salguero, E., Sarasso, M., Sciacca, E., Siddiqui, H., Smart, R. L., Spagna, A., Steele, I., Taris, F., Torra, J., van Elteren, A., van Reeve, W., and Vecchiato, A. (2018). Gaia Data Release 2. The astrometric solution. *Astron. Astrophys.*, 616:A2.
- Lindgren, L., Klioner, S. A., Hernández, J., Bombrun, A., Ramos-Lerate, M., Steidelmüller, H., Bastian, U., Biermann, M., de Torres, A., Gerlach, E., Geyer, R., Hilger, T., Hobbs, D., Lammers, U., McMillan, P. J., Stephenson, C. A., Castañeda, J., Davidson, M., Fabricius, C., Gracia-Abril, G., Portell, J., Rowell, N., Teyssier, D., Torra, F., Bartolomé, S., Clotet, M., Garralda, N., González-Vidal, J. J., Torra, J., Abbas, U., Altmann, M., Anglada Varela, E., Balaguer-Núñez, L., Balog, Z., Barache, C., Becciani, U., Bernet, M., Bertone, S., Bianchi, L., Bouquillon, S., Brown, A. G. A., Bucciarelli, B., Busonero, D., Butkevich, A. G., Buzzi, R., Cancelliere, R., Carlucci, T., Charlot, P., Cioni, M. R. L., Crosta, M., Crowley, C., del Peloso, E. F., del Pozo, E., Drimmel, R., Esquej, P., Fienga, A., Fraile, E., Gai, M., Garcia-Reinaldos, M., Guerra, R., Hambly, N. C., Hauser, M., Janßen, K., Jordan, S., Kostrzewa-Rutkowska, Z., Lattanzi, M. G., Liao, S., Licata, E., Lister, T. A., Löffler, W., Marchant, J. M., Masip, A., Mignard, F., Mints, A., Molina, D., Mora, A., Morbidelli, R., Murphy, C. P., Pagani, C., Panuzzo, P., Peñalosa Esteller, X., Poggio, E., Re Fiorentin, P., Riva, A., Sagristà Sellés, A., Sanchez Gimenez, V., Sarasso, M., Sciacca, E., Siddiqui, H. I., Smart, R. L., Souami, D., Spagna, A., Steele, I. A., Taris, F., Utrilla, E., van Reeve, W., and Vecchiato, A. (2021). Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution. *Astron. Astrophys.*, 649:A2.
- Liu, P.-Y. and Ip, W.-H. (2019). An Investigation on the Origin of Centaurs' Color-Inclination Relation. *Astrophys. J.*, 880(2):71.
- LSST Science Collaboration, Abell, P. A., Allison, J., Anderson, S. F., Andrew, J. R., Angel, J. R. P., Armus, L., Arnett, D., Asztalos, S. J., Axelrod, T. S., Bailey, S., Ballantyne, D. R., Bankert, J. R., Barkhouse, W. A., Barr, J. D., Barrientos, L. F., Barth, A. J., Bartlett, J. G., Becker, A. C., Becla, J., Beers, T. C., Bernstein, J. P., Biswas, R., Blanton, M. R., Bloom, J. S., Bochanski, J. J., Boeshaar, P., Borne, K. D., Bradac, M., Brandt, W. N., Bridge, C. R., Brown, M. E., Brunner, R. J., Bullock, J. S.,

- Burgasser, A. J., Burge, J. H., Burke, D. L., Cargile, P. A., Chandrasekharan, S., Chartas, G., Chesley, S. R., Chu, Y.-H., Cinabro, D., Claire, M. W., Claver, C. F., Clowe, D., Connolly, A. J., Cook, K. H., Cooke, J., Cooray, A., Covey, K. R., Culliton, C. S., de Jong, R., de Vries, W. H., Debattista, V. P., Delgado, F., Dell'Antonio, I. P., Dhital, S., Di Stefano, R., Dickinson, M., Dilday, B., Djorgovski, S. G., Dobler, G., Donalek, C., Dubois-Felsmann, G., Durech, J., Eliasdottir, A., Eracleous, M., Eyer, L., Falco, E. E., Fan, X., Fassnacht, C. D., Ferguson, H. C., Fernandez, Y. R., Fields, B. D., Finkbeiner, D., Figueroa, E. E., Fox, D. B., Francke, H., Frank, J. S., Frieman, J., Fromenteau, S., Furqan, M., Galaz, G., Gal-Yam, A., Garnavich, P., Gawiser, E., Geary, J., Gee, P., Gibson, R. R., Gilmore, K., Grace, E. A., Green, R. F., Gressler, W. J., Grillmair, C. J., Habib, S., Haggerty, J. S., Hamuy, M., Harris, A. W., Hawley, S. L., Heavens, A. F., Hebb, L., Henry, T. J., Hileman, E., Hilton, E. J., Hoadley, K., Holberg, J. B., Holman, M. J., Howell, S. B., Infante, L., Ivezić, Z., Jacoby, S. H., Jain, B., R., Jedicke, Jee, M. J., Garrett Jernigan, J., Jha, S. W., Johnston, K. V., Jones, R. L., Juric, M., Kaasalainen, M., Styliani, Kafka, Kahn, S. M., Kaib, N. A., Kalirai, J., Kantor, J., Kasliwal, M. M., Keeton, C. R., Kessler, R., Knezevic, Z., Kowalski, A., Krabbendam, V. L., Krughoff, K. S., Kulkarni, S., Kuhlman, S., Lacy, M., Lepine, S., Liang, M., Lien, A., Lira, P., Long, K. S., Lorenz, S., Lotz, J. M., Lupton, R. H., Lutz, J., Macri, L. M., Mahabal, A. A., Mandelbaum, R., Marshall, P., May, M., McGehee, P. M., Meadows, B. T., Meert, A., Milani, A., Miller, C. J., Miller, M., Mills, D., Minniti, D., Monet, D., Mukadam, A. S., Nakar, E., Neill, D. R., Newman, J. A., Nikolaev, S., Nordby, M., O'Connor, P., Oguri, M., Oliver, J., Olivier, S. S., Olsen, J. K., Olsen, K., Olszewski, E. W., Oluseyi, H., Padilla, N. D., Parker, A., Pepper, J., Peterson, J. R., Petry, C., Pinto, P. A., Pizagno, J. L., Popescu, B., Prsa, A., Radcka, V., Raddick, M. J., Rasmussen, A., Rau, A., Rho, J., Rhoads, J. E., Richards, G. T., Ridgway, S. T., Robertson, B. E., Roskar, R., Saha, A., Sarajedini, A., Scannapieco, E., Schalk, T., Schindler, R., Schmidt, S., Schmidt, S., Schneider, D. P., Schumacher, G., Scranton, R., Sebag, J., Seppala, L. G., Shemmer, O., Simon, J. D., Sivertz, M., Smith, H. A., Allyn Smith, J., Smith, N., Spitz, A. H., Stanford, A., Stassun, K. G., Strader, J., Strauss, M. A., Stubbs, C. W., Sweeney, D. W., Szalay, A., Szkody, P., Takada, M., Thorman, P., Trilling, D. E., Trimble, V., Tyson, A., Van Berg, R., Vanden Berk, D., VanderPlas, J., Verde, L., Vrsnak, B., Walkowicz, L. M., Wandelt, B. D., Wang, S., Wang, Y., Warner, M., Wechsler, R. H., West, A. A., Wiecha, O., Williams, B. F., Willman, B., Wittman, D., Wolff, S. C., Wood-Vasey, W. M., Wozniak, P., Young, P., Zentner, A., and Zhan, H. (2009). LSST Science Book, Version 2.0. [arXiv e-prints](#), page arXiv:0912.0201.
- Luu, J. X. and Jewitt, D. C. (1990). Cometary Activity in 2060 Chiron. *Astron. J.*, 100:913.
- Mahlke, M., Carry, B., and Mattei, P. A. (2022). Asteroid taxonomy from cluster analysis of spectrometry and albedo. *Astron. Astrophys.*, 665:A26.
- Markwardt, L., Holler, B. J., Lin, H. W., Gerdes, D. W., Adams, F. C., Malhotra, R., and

- Napier, K. J. (2023). First Near-IR Spectroscopic Survey of Neptune Trojans with JWST: Distinct Surface Compositions of Red vs Ultra-Red Neptune Trojans. [arXiv e-prints](#), page arXiv:2310.03998.
- Markwardt, L., Wen Lin, H., Holler, B. J., Gerdes, D. W., Adams, F. C., Malhotra, R., and Napier, K. J. (2025). From Colors to Spectra and Back Again: First Near-IR Spectroscopic Survey of Neptunian Trojans. , 6(7):154.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. [Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics](#), 11(2):431–441.
- Marsset, M., Fraser, W. C., Pike, R. E., Bannister, M. T., Schwamb, M. E., Volk, K., Kavelaars, J. J., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gladman, B. J., Gwyn, S. D. J., Lehner, M. J., Peixinho, N., Petit, J.-M., and Wang, S.-Y. (2019). Col-OSSOS: Color and Inclination Are Correlated throughout the Kuiper Belt. [Astron. J.](#), 157(3):94.
- Marsset, M., Fraser, W. C., Schwamb, M. E., Buchanan, L. E., Pike, R. E., Volk, K., Peixinho, N., Benecchi, S., Bannister, M. T., Tan, N. J., and Kavelaars, J. J. (2023). Col-OSSOS: Evidence for a Compositional Gradient Inherited from the Protoplanetary Disk? , 4(9):160.
- Masci, F. J., Laher, R. R., Rusholme, B., Shupe, D. L., Groom, S., Surace, J., Jackson, E., Monkewitz, S., Beck, R., Flynn, D., Terek, S., Landry, W., Hacopians, E., Desai, V., Howell, J., Brooke, T., Imel, D., Wachter, S., Ye, Q.-Z., Lin, H.-W., Cenko, S. B., Cunningham, V., Rebbapragada, U., Bue, B., Miller, A. A., Mahabal, A., Bellm, E. C., Patterson, M. T., Jurić, M., Golkhov, V. Z., Ofek, E. O., Walters, R., Graham, M., Kasliwal, M. M., Dekany, R. G., Kupfer, T., Burdge, K., Cannella, C. B., Barlow, T., Van Sistine, A., Giomi, M., Fremling, C., Blagorodnova, N., Levitan, D., Riddle, R., Smith, R. M., Helou, G., Prince, T. A., and Kulkarni, S. R. (2019). The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive. [Publ. Astron. Soc. Pacific](#), 131(995):018003.
- Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Grav, T., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Nugent, C., and Cabrera, M. S. (2012). Preliminary Analysis of WISE/NEOWISE 3-Band Cryogenic and Post-cryogenic Observations of Main Belt Asteroids. [Astrophys. J. Lett.](#), 759(1):L8.
- Merlin, F., Hromakina, T., Perna, D., Hong, M. J., and Alvarez-Candal, A. (2017). Taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs as seen from spectroscopy. [Astron. Astrophys.](#), 604:A86.
- Merline, W. J., Close, L. M., Siegler, N., Potter, D., Chapman, C. R., Dumas, C., Menard, F., Slater, D. C., Baker, A. C., Edmunds, M. G., Mathlin, G., Guyon, O., and Roth, K. (2001). S/2001 (617) 1. [IAU Circ.](#), 7741:2.
- Michel, P. (2014). Formation and Physical Properties of Asteroids. [Elements](#), 10(1):19–24.
- Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F. (2015a). [Asteroids IV](#).

- Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F. (2015b). Asteroids: Recent Advances and New Perspectives. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 3–10.
- Miyazaki, S., Komiyama, Y., Sekiguchi, M., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Imi, K., Kimura, M., Nakata, F., Okada, N., Ouchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., and Yasuda, N. (2002). Subaru Prime Focus Camera – Suprime-Cam. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 54:833–853.
- Morbidelli, A. and Levison, H. F. (2003). Planetary science Kuiper-belt interlopers. *Nature*, 422(6927):30–31.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Gomes, R. (2005). Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435(7041):462–465.
- Morbidelli, A. and Nesvorný, D. (2020). Kuiper belt: formation and evolution. In Prialnik, D., Barucci, M. A., and Young, L., editors, *The Trans-Neptunian Solar System*, pages 25–59.
- Morgado, B. E., Bruno, G., Gomes-Júnior, A. R., Pagano, I., Sicardy, B., Fortier, A., Desmars, J., Maxted, P. F. L., Braga-Ribas, F., Queloz, D., Sousa, S. G., Ortiz, J. L., Brandeker, A., Collier Cameron, A., Pereira, C. L., Florén, H. G., Hara, N., Souami, D., Isaak, K. G., Olofsson, G., Santos-Sanz, P., Wilson, T. G., Broughton, J., Alibert, Y., Alonso, R., Anglada, G., Bárczy, T., Barrado, D., Barros, S. C. C., Baumjohann, W., Beck, M., Beck, T., Benz, W., Billot, N., Bonfils, X., Broeg, C., Cabrera, J., Charnoz, S., Csizmadia, S., Davies, M. B., Deleuil, M., Delrez, L., Demangeon, O. D. S., Demory, B. O., Ehrenreich, D., Erikson, A., Fossati, L., Fridlund, M., Gandolfi, D., Gillon, M., Güdel, M., Heng, K., Hoyer, S., Kiss, L. L., Laskar, J., Lecavelier des Etangs, A., Lendl, M., Lovis, C., Magrin, D., Marafatto, L., Nascimbeni, V., Ottensamer, R., Pallé, E., Peter, G., Piazza, D., Piotto, G., Pollacco, D., Ragazzoni, R., Rando, N., Ratti, F., Rauer, H., Reimers, C., Ribas, I., Santos, N. C., Scandariato, G., Ségransan, D., Simon, A. E., Smith, A. M. S., Steller, M., Szabó, G. M., Thomas, N., Udry, S., Van Grootel, V., Walton, N. A., and Westerdorff, K. (2022). A stellar occultation by the transneptunian object (50000) Quaoar observed by CHEOPS. *Astron. Astrophys.*, 664:L15.
- Morgado, B. E., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., Desmars, J., Gomes-Júnior, A. R., Bérard, D., Leiva, R., Ortiz, J. L., Vieira-Martins, R., Benedetti-Rossi, G., Santos-Sanz, P., Cargano, J. I. B., Duffard, R., Rommel, F. L., Assafin, M., Bouffeur, R. C., Colas, F., Kretlow, M., Beisker, W., Sfair, R., Snodgrass, C., Morales, N., Fernández-Valenzuela, E., Amaral, L. S., Amarante, A., Artola, R. A., Backes, M., Bath, K. L., Bouley, S., Buie, M. W., Cacella, P., Colazo, C. A., Colque, J. P., Dauvergne, J. L., Dominik, M., Emilio, M., Erickson, C., Evans, R., Fabrega-Polleri, J., Garcia-Lambas, D., Giacchini, B. L., Hanna, W., Herald, D., Hesler, G., Hinse, T. C., Jacques, C., Jehin, E., Jørgensen, U. G., Kerr, S., Kouprianov, V., Levine, S. E., Linder, T., Maley, P. D.,

- Machado, D. I., Maquet, L., Maury, A., Melia, R., Meza, E., Mondon, B., Moura, T., Newman, J., Payet, T., Pereira, C. L., Pollock, J., Poltronieri, R. C., Quispe-Huaynasi, F., Reichart, D., de Santana, T., Schneider, E. M., Sieyra, M. V., Skottfelt, J., Soulier, J. F., Starck, M., Thierry, P., Torres, P. J., Trabuco, L. L., Unda-Sanzana, E., Yamashita, T. A. R., Winter, O. C., Zapata, A., and Zuluaga, C. A. (2021). Refined physical parameters for Chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020. *Astron. Astrophys.*, 652:A141.
- Morgado, B. E., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., Ortiz, J. L., Salo, H., Vachier, F., Desmars, J., Pereira, C. L., Santos-Sanz, P., Sfair, R., de Santana, T., Assafin, M., Vieira-Martins, R., Gomes-Júnior, A. R., Margoti, G., Dhillon, V. S., Fernández-Valenzuela, E., Broughton, J., Bradshaw, J., Langersek, R., Benedetti-Rossi, G., Souami, D., Holler, B. J., Kretlow, M., Bouffleur, R. C., Camargo, J. I. B., Duffard, R., Beisker, W., Morales, N., Lecacheux, J., Rommel, F. L., Herald, D., Benz, W., Jehin, E., Jankowsky, F., Marsh, T. R., Littlefair, S. P., Bruno, G., Pagano, I., Brandeker, A., Collier-Cameron, A., Florén, H. G., Hara, N., Olofsson, G., Wilson, T. G., Benkhaldoun, Z., Busuttil, R., Burdanov, A., Ferrais, M., Gault, D., Gillon, M., Hanna, W., Kerr, S., Kolb, U., Nosworthy, P., Sebastian, D., Snodgrass, C., Teng, J. P., and de Wit, J. (2023). A dense ring of the trans-Neptunian object Quaoar outside its Roche limit. *Nature*, 614(7947):239–243.
- Morganson, E., Gruendl, R. A., Menanteau, F., Carrasco Kind, M., Chen, Y. C., Daves, G., Drlica-Wagner, A., Friedel, D. N., Gower, M., Johnson, M. W. G., Johnson, M. D., Kessler, R., Paz-Chinchón, F., Petravick, D., Pond, C., Yanny, B., Allam, S., Armstrong, R., Barkhouse, W., Bechtol, K., Benoit-Lévy, A., Bernstein, G. M., Bertin, E., Buckley-Geer, E., Covarrubias, R., Desai, S., Diehl, H. T., Goldstein, D. A., Gruen, D., Li, T. S., Lin, H., Marriner, J., Mohr, J. J., Neilsen, E., Ngeow, C. C., Paech, K., Rykoff, E. S., Sako, M., Sevilla-Noarbe, I., Sheldon, E., Sobreira, F., Tucker, D. L., Wester, W., and DES Collaboration (2018). The Dark Energy Survey Image Processing Pipeline. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 130(989):074501.
- Mottola, S., Di Martino, M., Erikson, A., Gonano-Beurer, M., Carbognani, A., Carsenty, U., Hahn, G., Schober, H.-J., Lahulla, F., Delbò, M., and Lagerkvist, C.-I. (2011). Rotational Properties of Jupiter Trojans. I. Light Curves of 80 Objects. *Astron. J.*, 141(5):170.
- Muñonen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., Delbò, M., Lévassour-Regourd, A.-C., Penttilä, A., and Tedesco, E. F. (2010). A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus*, 209(2):542–555.
- Müller, T., Lellouch, E., and Fornasier, S. (2020). Trans-Neptunian objects and Centaurs at thermal wavelengths. In Priyalnik, D., Barucci, M. A., and Young, L., editors, *The Trans-Neptunian Solar System*, pages 153–181.

- Müller, T. G., Lellouch, E., Stansberry, J., Kiss, C., Santos-Sanz, P., Vilenius, E., Protopapa, S., Moreno, R., Mueller, M., Delsanti, A., Duffard, R., Fornasier, S., Groussin, O., Harris, A. W., Henry, F., Horner, J., Lacerda, P., Lim, T., Mommert, M., Ortiz, J. L., Rengel, M., Thirouin, A., Trilling, D., Barucci, A., Crovisier, J., Doressoundiram, A., Dotto, E., Gutiérrez, P. J., Hainaut, O. R., Hartogh, P., Hestroffer, D., Kidger, M., Lara, L., Swinyard, B., and Thomas, N. (2010). “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. I. Results from the Herschel science demonstration phase (SDP). *Astron. Astrophys.*, 518:L146.
- Nabiyev, S., Yalim, J., Guliyev, A., and Guliyev, R. (2022). Hyperbolic comets as an indicator of a hypothetical planet 9 in the solar system. *Advances in Space Research*, 69(8):3182–3203.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (2025). Jpl horizons system. California Institute of Technology.
- Nesvorný, D., Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Morbidelli, A., and Jedicke, R. (2006). Asteroid families. In Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., and Fernández, J. A., editors, *Asteroids, Comets, Meteors*, volume 229 of *IAU Symposium*, pages 289–299.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., Alexandersen, M., Bannister, M. T., Buchanan, L. E., Chen, Y.-T., Gladman, B. J., Gwyn, S. D. J., Kavelaars, J. J., Petit, J.-M., Schwamb, M. E., and Volk, K. (2020). OSSOS XX: The Meaning of Kuiper Belt Colors. *Astron. J.*, 160(1):46.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Morbidelli, A. (2013). Capture of Trojans by Jumping Jupiter. *Astrophys. J.*, 768(1):45.
- Nicholson, S. B. (1961). The Trojan Asteroids. *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, 8(381):239.
- Novaković, B., Vokrouhlický, D., Spoto, F., and Nesvorný, D. (2022). Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 134(4):34.
- Nuth, III, J. A., Abreu, N., Ferguson, F. T., Glavin, D. P., Hergenrother, C., Hill, H. G. M., Johnson, N. M., Pajola, M., and Walsh, K. (2020). Volatile-rich Asteroids in the Inner Solar System. , 1(3):82.
- Ofek, E. O. (2012). Sloan Digital Sky Survey Observations of Kuiper Belt Objects: Colors and Variability. *Astrophys. J.*, 749(1):10.
- Oort, J. H. (1950). The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 11:91–110.
- Ortiz, J. L., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., Alvarez-Candal, A., Lellouch, E., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Ivanov, V. D., Littlefair, S. P., Camargo, J. I. B., Assafin, M.,

- Unda-Sanzana, E., Jehin, E., Morales, N., Tancredi, G., Gil-Hutton, R., de La Cueva, I., Colque, J. P., da Silva Neto, D. N., Manfroid, J., Thirouin, A., Gutiérrez, P. J., Lecacheux, J., Gillon, M., Maury, A., Colas, F., Licandro, J., Mueller, T., Jacques, C., Weaver, D., Milone, A., Salvo, R., Bruzzone, S., Organero, F., Behrend, R., Roland, S., Vieira-Martins, R., Widemann, T., Roques, F., Santos-Sanz, P., Hestroffer, D., Dhillon, V. S., Marsh, T. R., Harlinton, C., Campo Bagatin, A., Alonso, M. L., Ortiz, M., Colazo, C., Lima, H. J. F., Oliveira, A. S., Kerber, L. O., Smiljanic, R., Pimentel, E., Giacchini, B., Cacella, P., and Emilio, M. (2012). Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation. *Nature*, 491(7425):566–569.
- Oszkiewicz, D., Klimczak, H., Carry, B., Penttilä, A., Popescu, M., Krüger, J., and Aron Keniger, M. (2023). Spectral analysis of basaltic asteroids observed by the Gaia space mission. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 519(2):2917–2928.
- Pan, J., Lin, H. W., Gerdes, D. W., Napier, K. J., Wang, J., Abbott, T. M. C., Agüena, M., Allam, S., Alves, O., Bacon, D., Bernardinelli, P. H., Bernstein, G. M., Bertin, E., Brooks, D., Burke, D. L., Carnero Rosell, A., Carrasco Kind, M., Carretero, J., Costanzi, M., da Costa, L. N., Pereira, M. E. S., De Vicente, J., Desai, S., Doel, P., Ferrero, I., Friedel, D., Frieman, J., García-Bellido, J., Gatti, M., Gruendl, R. A., Gschwend, J., Herner, K., Hinton, S. R., Hollowood, D. L., Honscheid, K., James, D. J., Kuehn, K., Kuropatkin, N., March, M., Menanteau, F., Miquel, R., Paz-Chinchón, F., Pieres, A., Plazas Malagón, A. A., Raveri, M., Rodriguez-Monroy, M., Romer, A. K., Sanchez, E., Schubnell, M., Sevilla-Noarbe, I., Smith, M., Suchyta, E., Tarle, G., Tucker, D., Walker, A. R., and Weaverdyck, N. (2022). Photometric Properties of Jupiter Trojans Detected by the Dark Energy Survey. , 3(12):269.
- Peixinho, N., Delsanti, A., and Doressoundiram, A. (2015). Reanalyzing the visible colors of Centaurs and KBOs: what is there and what we might be missing. *Astron. Astrophys.*, 577:A35.
- Peixinho, N., Delsanti, A., Guilbert-Lepoutre, A., Gafeira, R., and Lacerda, P. (2012). The bimodal colors of Centaurs and small Kuiper belt objects. *Astron. Astrophys.*, 546:A86.
- Peixinho, N., Doressoundiram, A., Delsanti, A., Boehnhardt, H., Barucci, M. A., and Belskaya, I. (2003). Reopening the TNOs color controversy: Centaurs bimodality and TNOs unimodality. *Astron. Astrophys.*, 410:L29–L32.
- Peixinho, N., Lacerda, P., and Jewitt, D. (2008). Color-Inclination Relation of the Classical Kuiper Belt Objects. *Astron. J.*, 136(5):1837–1845.
- Peixinho, N., Thirouin, A., Tegler, S. C., Di Sisto, R., Delsanti, A., Guilbert-Lepoutre, A., and Bauer, J. G. (2020). From Centaurs to Comets - 40 years. In Prrialnik, D., Barucci, M. A., and Young, L., editors, *The Trans-Neptunian Solar System*, pages 307–329.

- Penttilä, A., Shevchenko, V. G., Wilkman, O., and Muinonen, K. (2016). H, G₁, G₂ photometric phase function extended to low-accuracy data. *Planet. Space Sci.*, 123:117–125.
- Pereira, C. L., Sicardy, B., Morgado, B. E., Braga-Ribas, F., Fernández-Valenzuela, E., Souami, D., Holler, B. J., Bouffeur, R. C., Margoti, G., Assafin, M., Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Epinat, B., Kervella, P., Desmars, J., Vieira-Martins, R., Kilic, Y., Gomes Júnior, A. R., Camargo, J. I. B., Emilio, M., Vara-Lubiano, M., Kretlow, M., Albert, L., Alcock, C., Ball, J. G., Bender, K., Buie, M. W., Butterfield, K., Camarca, M., Castro-Chacón, J. H., Dunford, R., Fisher, R. S., Gamble, D., Geary, J. C., Gnilk, C. L., Green, K. D., Hartman, Z. D., Huang, C. K., Januszewski, H., Johnston, J., Kagitani, M., Kamin, R., Kavelaars, J. J., Keller, J. M., de Kleer, K. R., Lehner, M. J., Luken, A., Marchis, F., Marlin, T., McGregor, K., Nikitin, V., Nolthenius, R., Patrick, C., Redfield, S., Rengstorf, A. W., Reyes-Ruiz, M., Seccul, T., Skrutskie, M. F., Smith, A. B., Sproul, M., Stephens, A. W., Szentgyorgyi, A., Sánchez-Sanjuán, S., Tatsumi, E., Verbiscer, A., Wang, S. Y., Yoshida, F., Young, R., and Zhang, Z. W. (2023). The two rings of (50000) Quaoar. *Astron. Astrophys.*, 673:L4.
- Perna, D., Barucci, M. A., Fornasier, S., DeMeo, F. E., Alvarez-Candal, A., Merlin, F., Dotto, E., Doressoundiram, A., and de Bergh, C. (2010). Colors and taxonomy of Centaurs and trans-Neptunian objects. *Astron. Astrophys.*, 510:A53.
- Perna, D., Dotto, E., Barucci, M. A., Mazzotta Epifani, E., Vilenius, E., Dall’Ora, M., Fornasier, S., and Müller, T. G. (2013). Photometry and taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs in support of a Herschel key program. *Astron. Astrophys.*, 554:A49.
- Pigatto, L. and Zanini, V. (2002). The 1900-1 opposition of 433 Eros, the solar parallax, and the contribution of Padova Observatory. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 5(2):141–153.
- Pike, R. E., Fraser, W. C., Schwamb, M. E., Kavelaars, J. J., Marsset, M., Bannister, M. T., Lehner, M. J., Wang, S.-Y., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gladman, B. J., Gwyn, S., Petit, J.-M., and Volk, K. (2017). Col-OSSOS: z-Band Photometry Reveals Three Distinct TNO Surface Types. *Astron. J.*, 154(3):101.
- Pike, R. E., Fraser, W. C., Volk, K., Kavelaars, J. J., Marsset, M., Peixinho, N., Schwamb, M. E., Bannister, M. T., Peltier, L., Buchanan, L. E., Benecchi, S., and Tan, N. J. (2023). Col-OSSOS: The Distribution of Surface Classes in Neptune’s Resonances. , 4(10):200.
- Pinilla-Alonso, N., Bannister, M., Brunetto, R., Cruikshank, D. P., De Pra, M. N., Emery, J. P., Guilbert-Lepoutre, A., Holler, B. J., Lorenzi, V., Muller, T., Peixinho, N., Pendleton, Y. J., Stansberry, J. A., and de Souza Feliciano, A. C. (2021). DiSCO-TNOs: Discovering the composition of the trans-Neptunian objects, icy embryos for planet formation. JWST Proposal. Cycle 1, ID. #2418.

- Pinilla-Alonso, N., Brunetto, R., De Prá, M. N., Holler, B. J., Hénault, E., Feliciano, A. C. d. S., Lorenzi, V., Pendleton, Y. J., Cruikshank, D. P., Müller, T. G., Stansberry, J. A., Emery, J. P., Schambeau, C. A., Licandro, J., Harvison, B., McClure, L., Guilbert-Lepoutre, A., Peixinho, N., Bannister, M. T., and Wong, I. (2025). A JWST/DiSCo-TNOs portrait of the primordial Solar System through its trans-Neptunian objects. *Nature Astronomy*, 9:230–244.
- Popescu, M., Licandro, J., Carvano, J. M., Stoicescu, R., de León, J., Morate, D., Boacă, I. L., and Cristescu, C. P. (2018). Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors. *Astron. Astrophys.*, 617:A12.
- Powell, M. J. D. (1994). A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. In Gomez, S. and Hennart, J.-P., editors, *Advances in Optimization and Numerical Analysis*, volume 275 of *Mathematics and Its Applications*, pages 51–67. Springer, Dordrecht.
- Pravec, P. and Harris, A. W. (2000). Fast and Slow Rotation of Asteroids. *Icarus*, 148(1):12–20.
- Pravec, P., Harris, A. W., and Michalowski, T. (2002). Asteroid Rotations. In Bottke, W. F., J., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, pages 113–122.
- Prialnik, D., Barucci, M. A., and Young, L. (2019). *The Trans-Neptunian Solar System*. Elsevier.
- R Core Team (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Roig, F., Ribeiro, A. O., and Gil-Hutton, R. (2008). Taxonomy of asteroid families among the Jupiter Trojans: comparison between spectroscopic data and the Sloan Digital Sky Survey colors. *Astron. Astrophys.*, 483(3):911–931.
- Rommel, F. L., Braga-Ribas, F., Desmars, J., Camargo, J. I. B., Ortiz, J. L., Sicardy, B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., Santos-Sanz, P., Duffard, R., Fernández-Valenzuela, E., Lecacheux, J., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., Gomes-Júnior, A. R., Pereira, C. L., Herald, D., Hanna, W., Bradshaw, J., Morales, N., Brimacombe, J., Burtovoi, A., Carruthers, T., de Barros, J. R., Fiori, M., Gilmore, A., Hooper, D., Hornoch, K., Jacques, C., Janik, T., Kerr, S., Kilmartin, P., Winkel, J. M., Naletto, G., Nardiello, D., Nascimbeni, V., Newman, J., Ossola, A., Pál, A., Pimentel, E., Pravec, P., Spottetti, S., Stechina, A., Szakáts, R., Ueno, Y., Zampieri, L., Broughton, J., Dunham, J. B., Dunham, D. W., Gault, D., Hayamizu, T., Hosoi, K., Jehin, E., Jones, R., Kitazaki, K., Komžík, R., Marciniak, A., Maury, A., Mikuž, H., Nosworthy, P., Fábrega Polleri, J., Rahvar, S., Sfair, R., Siqueira, P. B., Snodgrass, C., Sogorb, P., Tomioka, H., Tregloan-Reed, J., and Winter, O. C. (2020). Stellar occultations enable milli-arcsecond astrometry for Trans-Neptunian objects and Centaurs. *Astron. Astrophys.*, 644:A40.

- Rousselot, P. (2008). 174P/Echeclus: a strange case of outburst. Astron. Astrophys., 480(2):543–550.
- Russell, C. T., Raymond, C. A., Coradini, A., McSween, H. Y., Zuber, M. T., Nathues, A., De Sanctis, M. C., Jaumann, R., Konopliv, A. S., Preusker, F., Asmar, S. W., Park, R. S., Gaskell, R., Keller, H. U., Mottola, S., Roatsch, T., Scully, J. E. C., Smith, D. E., Tricarico, P., Toplis, M. J., Christensen, U. R., Feldman, W. C., Lawrence, D. J., McCoy, T. J., Prettyman, T. H., Reedy, R. C., Sykes, M. E., and Titus, T. N. (2012). Dawn at Vesta: Testing the Protoplanetary Paradigm. Science, 336(6082):684.
- Russell, H. N. (1916). On the Albedo of the Planets and Their Satellites. Astrophys. J., 43:173–196.
- Ryan, E. L. and Woodward, C. E. (2010). Rectified Asteroid Albedos and Diameters from IRAS and MSX Photometry Catalogs. Astron. J., 140(4):933–943.
- Sagan, C. and Khare, B. N. (1979). Tholins: organic chemistry of interstellar grains and gas. Nature, 277(5692):102–107.
- Santos-Sanz, P., Ortiz, J. L., Barrera, L., and Boehnhardt, H. (2009). New BVRI photometry results on Kuiper Belt Objects from the ESO VLT. Astron. Astrophys., 494(2):693–706.
- Schemel, M. and Brown, M. E. (2021). Zwicky Transient Facility Observations of Trojan Asteroids: A Thousand Colors, Rotation Amplitudes, and Phase Functions. , 2(1):40.
- Scholz, F. W. and Stephens, M. A. (1987). K-sample anderson–darling tests. Journal of the American Statistical Association, 82(399):918–924.
- Schwamb, M. E. (2014). Solar System: Stranded in no-man’s-land. Nature, 507(7493):435–436.
- Schwamb, M. E., Fraser, W. C., Bannister, M. T., Marsset, M., Pike, R. E., Kavelaars, J. J., Benecchi, S. D., Lehner, M. J., Wang, S.-Y., Thirouin, A., Delsanti, A., Peixinho, N., Volk, K., Alexandersen, M., Chen, Y.-T., Gladman, B., Gwyn, S. D. J., and Petit, J.-M. (2019). Col-OSSOS: The Colors of the Outer Solar System Origins Survey. Astrophys. J. Suppl., 243(1):12.
- Sergeyev, A. V. and Carry, B. (2021). A million asteroid observations in the Sloan Digital Sky Survey. Astron. Astrophys., 652:A59.
- Sheppard, S. S. and Jewitt, D. C. (2002). Time-resolved Photometry of Kuiper Belt Objects: Rotations, Shapes, and Phase Functions. Astron. J., 124(3):1757–1775.
- Sheppard, S. S., Lacerda, P., and Ortiz, J. L. (2008). Photometric Lightcurves of Transneptunian Objects and Centaurs: Rotations, Shapes, and Densities, pages 129–142.

- Shober, P. M., Tancredi, G., Vaubaillon, J., Devillepoix, H. A. R., Deam, S., Anghel, S., Sansom, E. K., Colas, F., and Martino, S. (2024). Comparing the dynamics of Jupiter-family Comets and comet-like fireballs. *Astron. Astrophys.*, 687:A181.
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., Jehin, E., Maury, A., Lellouch, E., Hutton, R. G., Braga-Ribas, F., Colas, F., Hestroffer, D., Lecacheux, J., Roques, F., Santos-Sanz, P., Widemann, T., Morales, N., Duffard, R., Thirouin, A., Castro-Tirado, A. J., Jelínek, M., Kubánek, P., Sota, A., Sánchez-Ramírez, R., Andrei, A. H., Camargo, J. I. B., da Silva Neto, D. N., Gomes, A. R., Martins, R. V., Gillon, M., Manfroid, J., Tozzi, G. P., Harlingten, C., Saravia, S., Behrend, R., Mottola, S., Melendo, E. G., Peris, V., Fabregat, J., Madiedo, J. M., Cuesta, L., Eibe, M. T., Ullán, A., Organero, F., Pastor, S., de Los Reyes, J. A., Pedraz, S., Castro, A., de La Cueva, I., Muler, G., Steele, I. A., Cebrián, M., Montañés-Rodríguez, P., Oscoz, A., Weaver, D., Jacques, C., Corradi, W. J. B., Santos, F. P., Reis, W., Milone, A., Emilio, M., Gutiérrez, L., Vázquez, R., and Hernández-Toledo, H. (2011). A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, 478(7370):493–496.
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., Howard, E., Evans, T., Fowler, J., Fullmer, L., Hurt, R., Light, R., Kopan, E. L., Marsh, K. A., McCallon, H. L., Tam, R., Van Dyk, S., and Wheelock, S. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astron. J.*, 131(2):1163–1183.
- Stephens, R. and Warner, B. D. (2018). The ALCDEF Database and the NASA SBN/PDS: The Perfect Merger. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, volume 50 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 417.03.
- Stephens, R. D. and Coley, D. R. (2017). Lightcurve Analysis of Trojan Asteroids at the Center for Solar System Studies 2017 January - March. *Minor Planet Bulletin*, 44(3):252–257.
- Stephens, R. D., Coley, D. R., and French, L. M. (2016). A Report from the L5 Trojan Camp - Lightcurves of Jovian Trojan Asteroids from the Center for Solar System Studies. *Minor Planet Bulletin*, 43(3):265–270.
- Stephens, R. D., Pravec, P., Kuěáková, H., Kusnirak, P., Hornoch, K., Benishek, V., Aznar Macias, A., and Warner, B. D. (2018). 2207 Antenor: A Suspected Jovian Trojan Binary. *Minor Planet Bulletin*, 45(4):341–342.
- Stephens, R. D. and Warner, B. D. (2019). Lightcurve Analysis of L5 Trojan Asteroids at the Center for Solar System Studies: 2019 January to March. *Minor Planet Bulletin*, 46(3):315–317.
- Stephens, R. D., Warner, B. D., and Harris, A. W. (2010). A Proposed Standard For Reporting Asteroid Lightcurve Data. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*

- #42, volume 42 of AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, page 39.14.
- Szabó, G. M., Ivezić, Ž., Jurić, M., Lupton, R., and Kiss, L. L. (2004). Colour variability of asteroids in the Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 348(3):987–998.
- Tanga, P., Berthier, J., Cellino, A., David, P., Delbo, M., Dell’Oro, A., Galluccio, L., Hestroffer, D., Pauwels, T., Mignard, F., Muinonen, K., Ordénovic, C., Oreshina-Slezak, I., Roux, W., and Spoto, F. (2023). The Gaia Solar System Survey: From Gaia DR3 to the Focused Product Release 2023. In LPI Contributions, volume 2851 of LPI Contributions, page 2209.
- Tegler, S. C. and Romanishin, W. (1998). Two distinct populations of Kuiper-belt objects. Nature, 392(6671):49–51.
- Tegler, S. C. and Romanishin, W. (2000). Extremely red Kuiper-belt objects in near-circular orbits beyond 40 AU. Nature, 407(6807):979–981.
- Tegler, S. C., Romanishin, W., Consolmagno, G. J., and J., S. (2016). Two Color Populations of Kuiper Belt and Centaur Objects and the Smaller Orbital Inclinations of Red Centaur Objects. Astron. J., 152(6):210.
- The Dark Energy Survey Collaboration (2005). The Dark Energy Survey. arXiv e-prints, pages astro-ph/0510346.
- Tholen, D. J. (1984). Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry. PhD thesis, University of Arizona.
- Tiscareno, M. S. and Malhotra, R. (2003). The Dynamics of Known Centaurs. Astron. J., 126(6):3122–3131.
- Tombaugh, C. W. (1946). The Search for the Ninth Planet, Pluto. Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific, 5(209):73.
- Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., Doherty, P., Shivvers, I. S., Burgett, W. S., Chambers, K. C., Hodapp, K. W., Kaiser, N., Kudritzki, R. P., Magnier, E. A., Morgan, J. S., Price, P. A., and Wainscoat, R. J. (2012). The Pan-STARRS1 Photometric System. Astrophys. J., 750(2):99.
- Trujillo, C. A. and Brown, M. E. (2002). A Correlation between Inclination and Color in the Classical Kuiper Belt. Astrophys. J. Lett., 566(2):L125–L128.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., and Levison, H. F. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. Nature, 435(7041):459–461.
- Usui, F., Kasuga, T., Hasegawa, S., Ishiguro, M., Kuroda, D., Müller, T. G., Ootsubo, T., and Matsuhara, H. (2013). Albedo Properties of Main Belt Asteroids Based on the All-Sky Survey of the Infrared Astronomical Satellite AKARI. Astrophys. J., 762(1):56.

- Usui, F., Kuroda, D., Müller, T. G., Hasegawa, S., Ishiguro, M., Ootsubo, T., Ishihara, D., Kataza, H., Takita, S., Oyabu, S., Ueno, M., Matsuhara, H., and Onaka, T. (2011). Asteroid Catalog Using Akari: AKARI/IRC Mid-Infrared Asteroid Survey. Publ. Astron. Soc. Japan, 63:1117–1138.
- VALENTIN, M. (2020). Astrometria, predição de ocultações estelares e exploração de dados fotométricos do des para tnos e centauros em preparação ao lsst.
- Vernazza, P. and Beck, P. (2017). Composition of Solar System Small Bodies. In Elkins-Tanton, L. T. and Weiss, B. P., editors, Planetesimals: Early Differentiation and Consequences for Planets, pages 269–297.
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O’Brien, D. P., and Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration. Nature, 475(7355):206–209.
- Warner, B. D., Stephens, R. D., and Harris, A. W. (2011). Save the Lightcurves. Minor Planet Bulletin, 38(3):172–174.
- Weissman, P. R., Bottke, W. F., J., and Levison, H. F. (2002). Evolution of Comets into Asteroids. In Bottke, W. F., J., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, Asteroids III, pages 669–686.
- Wells, D. C., Greisen, E. W., and Harten, R. H. (1981). FITS - a Flexible Image Transport System. Astron. Astrophys. Suppl., 44:363.
- Whipple, F. L. (1950). On tests of the icy conglomerate model for comets. Astron. J., 55:83.
- Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., Martínez, C., Beisker, W., Bredner, E., Dunham, D., Maley, P., Lellouch, E., Arlot, J. E., Berthier, J., Colas, F., Hubbard, W. B., Hill, R., Lecacheux, J., Lecampion, J. F., Pau, S., Rapaport, M., Roques, F., Thuillot, W., Hills, C. R., Elliott, A. J., Miles, R., Platt, T., Cremaschini, C., Dubreuil, P., Cavadore, C., Demeautis, C., Henriquet, P., Labrevoir, O., Rau, G., Coliac, J. F., Piraux, J., Marlot, C., Marlot, C., Gorry, F., Sire, C., Bayle, B., Simian, E., Blommers, A. M., Fulgence, J., Leyrat, C., Sauzeaud, C., Stephanus, B., Rafaelli, T., Buil, C., Delmas, R., Desnoux, V., Jasinski, C., Klotz, A., Marchais, D., Rieugnié, M., Boudrand, G., Cazard, J. P., Lambin, C., Pujat, P. O., Schwartz, F., Burlot, P., Langlais, P., Rivaud, S., Brochard, E., Dupouy, P., Lavayssière, M., Chaptal, O., Daifallah, K., Clarasso-Llauger, C., Aloy Doménech, J., Gabaldá-Sánchez, M., Otazu-Porter, X., Fernández, D., Masana, E., Ardanuy, A., Casas, R., Ros, J. A., Casarramona, F., Schnabel, C., Roca, A., Labordena, C., Canales-Moreno, O., Ferrer, V., Rivas, L., Ortiz, J. L., Fernández-Arozena, J., Martín-Rodríguez, L. L., Cidadão, A., Coelho, P., Figueredo, P., Gonçalves, R., Marciano, C., Nunes, R., Ré, P., Saraiva, C., Tonel, F., Clérigo, J., Oliveira, C., Reis, C., Ewen-Smith, B. M., Ward, S., Ford, D., Gonçalves, J., Porto, J., Laurindo Sobrinho, J., Teodoro de Gois, F., Joaquim, M., Afonso da Silva Mendes, J., van Ballegoij, E., Jones, R., Callender, H., Sutherland, W., Bumgarner, S., Imbert, M., Mitchell, B., Lockhart, J., Barrow, W., Cornwall, D., Arnal, A., Eleizalde, G.,























































- Valencia, A., Ladino, V., Lizardo, T., Guillén, C., Sánchez, G., Peña, A., Radaelli, S., Santiago, J., Vieira, K., Mendt, H., Rosenzweig, P., Naranjo, O., Contreras, O., Díaz, F., Guzmán, E., Moreno, F., Omar Porras, L., Recalde, E., Mascaró, M., Birnbaum, C., Cósias, R., López, E., Pallo, E., Percz, R., Pulupa, D., Simbaña, X., Yajamín, A., Rodas, P., Denzau, H., Kretlow, M., Valdés Sada, P., Hernández, R., Hernández, A., Wilson, B., Castro, E., and Winkel, J. M. (2009). Titania's radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199(2):458–476.
- Willmer, C. N. A. (2018). The Absolute Magnitude of the Sun in Several Filters. *Astrophys. J. Suppl.*, 236(2):47.
- Yu, Y., Richardson, D. C., Michel, P., Schwartz, S. R., and Ballouz, R.-L. (2014). Numerical predictions of surface effects during the 2029 close approach of Asteroid 99942 Apophis. *Icarus*, 242:82–96.
- Zappalà, V., Bendjoya, P., Cellino, A., Farinella, P., and Froeschlé, C. (1995). Asteroid families: Search of a 12,487-asteroid sample using two different clustering techniques. *Icarus*, 116(2):291–314.

Apêndice A

Artigos Publicados

Apresentamos, aqui, três artigos desenvolvidos ao longo deste doutorado. Dois deles estão publicados na Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), sendo eu o primeiro autor de um, e outro no Astronomical Journal (AJ), do qual também sou primeiro autor.

Main belt asteroids taxonomical information from dark energy survey data

V. Carruba ^{1,2*} J. I. B. Camargo ^{2,3} S. Aljbae ⁴ F. S. Ferreira ^{2,3} E. Lin ⁵
 V. Figueiredo-Peixoto ^{2,3,6} M. V. Banda-Huarca ^{2,3} A. Pieres ² R. C. Bouffeur ^{2,3} 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 ^{2,13,14} 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 ^{15,32} A. Palmese ³³ A. A. Plazas Malagón ^{34,35}
 M. Rodríguez-Monroy ³⁶ E. Sanchez ¹⁸ B. Santiago ^{2,37} M. Schubnell ⁵ M. Smith ³⁸
 E. Suchyta ³⁹ M. E. C. Swanson [†] G. Tarle ⁵ A. R. Walker ⁷ N. Weaverdyck ^{5,40} and
 P. Wiseman ³⁸ (DES Collaboration)

Affiliations are listed at the end of the paper

Accepted 2023 November 2. Received 2023 October 24; in original form 2023 August 2

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 data base with other data bases, 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* colours, we detected 409 new possible V-type asteroids. Their orbital distribution is highly consistent with that of other known V-type objects.

Key words: catalogues – celestial mechanics – minor planets, asteroids: general.

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 time-scales 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 Sloan Digital Sky Survey-Moving Object Catalogue data (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 colours, 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 colour 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

* E-mail: valerio.carruba@unesp.br

† Independent Researcher

1 micrometre, 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 (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 deg² 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 disc 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 colour and light curve catalogue, facilitated the development of techniques to obtain optimal measurements of fluxes, colours, 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* colours, where the classification method of DeMeo & Carry (2013) can be applied, and a much larger (*g* – *r*, *g* – *i*) data base. We then cross-referenced the DES data with taxonomical, SDSS-MOC4, and albedo information, to understand how asteroid taxonomies are mapped in the new data set. Based on the distribution of known asteroid taxonomies, predictions on unlabelled bodies can then be made, using machine learning methods, optimized by the use of genetic algorithms (Chen, Wang & Lee 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 were obtained from the DES data base 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 colours 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 data base (Abbott et al. 2021) 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, Drlica-Wagner & Koziol 2018) for all queries of the DES data base.

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 the

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

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 sections 1 and 4.8 in Morganson et al. 2018, for more details about the finalcut catalogue).

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 catalogue 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 colours 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 SkyBoT classification.¹ 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 catalogues 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 colours of small objects, since observations of a same object in different filters may be separated by long periods of time and we do not have accurate enough rotational information to correct for rotational effects. As a result, we formed colours for a given object using only observations that were obtained within 10 min of each other (Abbott et al. 2021).

If we were to conduct an observational run specifically dedicated to measuring the colours of small objects, 10 min 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 & Harris 2010; Warner, Stephens & Harris 2011; Stephens & Warner 2018) website displays a plot² indicating that

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

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

Table 2. DES ($g - r$) colours for inner main belt asteroids. We report the standard deviations of measurements in ($g - r$), the number of colours 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 ($g - r$) colour, regardless whether they were utilized in this study.

Stand. Dev in ($g - r$)	# of ($g - r$) colours per object	Total number of ($g - r$) colours used
0.041	1 to 3	20 825
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

most asteroids have rotational periods longer than 2 h, with many falling between 4 and 10 h. If we consider the shortest period of 2 h, 10 min of observations corresponds to a rotation of 30 deg, while for a 7-h period, we have a rotation of only 8.6 deg. Therefore, our decision to group observations of the same object that were acquired within 10 min appears to be a good compromise between minimizing the impact of rotational effects on colours 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 data base. 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-h rotation period, a 10-min separation between observations corresponds to a magnitude change of approximately $10/(4 \times 60/4) \times 0.5 \simeq 0.083$. For a 10-h rotation period, the magnitude change would be only 0.033. Fast-rotating asteroids ($\simeq 4$ h period) would generally have smaller amplitudes because elongated objects are more prone to breaking (see fig. 9 in Chang et al. 2019). In most cases, the rotational effect on colour should be of the order of 10^{-2} , and should not exceed 0.1.

Albedo variations, however, do exist and have statistical significance on colour variations [see discussion in Szabó et al. (2004)]. Its overall impact can be inferred from table 2. The colour of a given object (e.g. $g - r$) is determined by the mean value of multiple measurements of that colour and its uncertainty is represented by the respective standard deviation. One might reasonably anticipate that colour uncertainties in colour 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 Sections 3 and 4), we transformed DES colours into SDSS (Sloan Digital Sky Survey) ones using the transformation equations from Abbott et al. (2021).

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

specifically, the DES to SDSS colour transformations used were

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

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

3 DES DATA BASE: DEMEO AND CARRY TAXONOMY

As a preliminary step of our analysis, we selected asteroids from the DES data base for which both gri slopes and $i - z$ colours are both available. The colour 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 $Rf, v = 10^{-0.4[(M_f - M_v) - (M_{\odot f} - M_{\odot v})]}$. The spectral gradient, or slope, is then given by [with λ in nanometres, see also Sabater et al. (2009)]:

$$S(\lambda_1, \lambda_2) = 10^4 \frac{Rf_{2,v} - Rf_{1,v}}{|\lambda_2 - \lambda_1|}. \quad (2)$$

In our case, v is the SDSS g filter.

This slope, as given above, is expressed as a percentage per 100 nanometres. To calculate the Rf, 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 per cent/100 nm.

These parameters are necessary to classify the asteroid taxonomies according to the method of DeMeo & Carry (2013), which is based on data from the SDSS-MOC4 (Ivezić et al. 2001). Our objective here is to identify asteroids present in both catalogues and to infer what taxonomical properties can be obtained from DES data. Given their temporal constraints, 17 154 asteroids with gri slopes and $i - z$ colours are present in the DES data base. To eliminate outliers, we only consider asteroids within the 0.15 to 0.85 quantile interval for both parameter distributions.³ 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 Fig. 1. For statistical reasons, we will exclude outliers from our analysis, hereafter, yielding a sample of 17 135 asteroids, 10 685 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 Fig. 1, and most of them are not shown in Fig. 1. Therefore, removing these

³Quantiles 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).

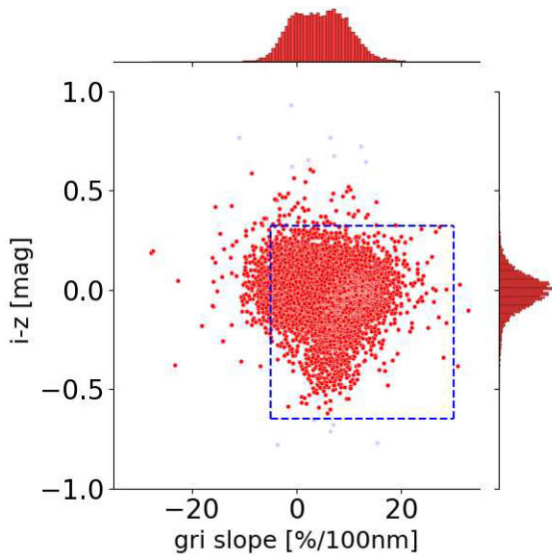


Figure 1. A joint plot of asteroids with available DES data, showing their (gri slope, $i - z$) values (transparent full circles). The full circles represent asteroids with values of the two parameters within the 0.15 to 0.85 quantile interval in the gri slope and $i - z$ colour distributions. The dashed 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 $i - z$ colours distributions without outliers, respectively.

objects does not cause any significant loss of information.⁴ 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 Fig. 1, we display histograms of gri slope and $i - z$ colours 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 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 towards the right and one towards 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 percent 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

⁴Other 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.

(gri slope, $i - z$) plane, as shown in the left panel of Fig. 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 SDSS-MOC4 or SDSS, for brevity (Ivezić et al. 2001). The right panel of Fig. 2 shows histograms of absolute magnitude distributions for the two surveys. Absolute magnitude H were obtained from the Asteroid Families Portal AFP [<http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/index.php>], Radović et al. (2017), accessed on 2023 June]. 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 Fig. 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 SDSS-MOC4 (Ivezić et al. 2001). Although the taxonomical information from the SDSS-MOC4 data has some limitations, as it is based on photometrical colours, it can still provide useful preliminary information on asteroids' physical properties. First, we eliminate asteroids with large errors in gri slope (error larger than 10 per cent/100nm) and $i - z$ colour (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 Fig. 4 displays the position in the plane of $i - z$ colour 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 cross-correlations with the three data sets: C-types and V-types

⁵The same authors found that there is a systematic negative offset of absolute magnitudes in catalogues, 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 $H \simeq 14$.

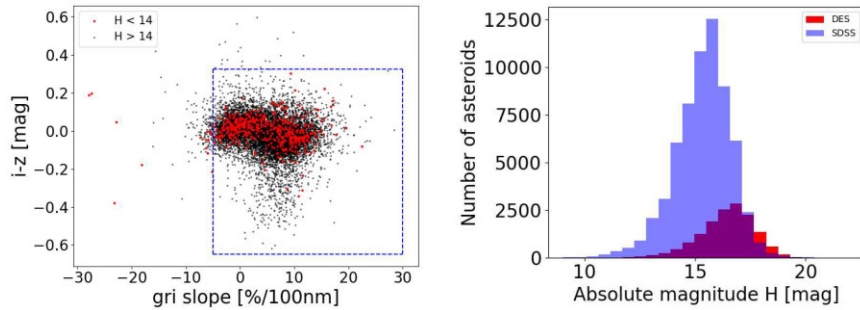


Figure 2. Left panel: a projection in the (gri slope, $i - z$) plane of DES large ($H < 14$) and small ($H > 14$) asteroids. The distribution of the two populations is not significantly different. In the right panel, we show the absolute magnitude distribution of asteroids in the SDSS-MOC4 data base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

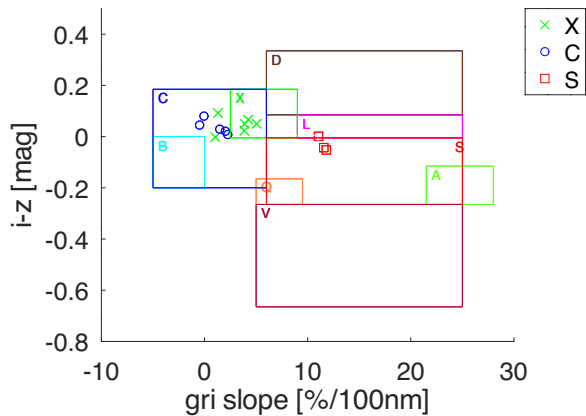


Figure 3. $i - z$ colours versus gri slope for asteroids with taxonomical data present in the DES data base. The coloured boxes represent the boundaries of the DeMeo & Carry (2013) taxonomical classes.

can be classified by DES data with purities, defined as the fraction of DES taxonomic labels correctly classified as such, as of 50 per cent or higher, while the other types have low purity percentages. Interestingly, 44.4 per cent 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 Fig. 4 and Table 4. The purities for both complexes are now above 75.0 per cent, suggesting that this simplified scheme could be applied more successfully. Following the analysis of Ivezić et al. (2002), we also plot in Fig. 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 Eunomia 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 data set with albedo data in the WISE and NEOWISE, AKARI, or IRAS databases (Ryan & Woodward 2010; Usui et al. 2011; Masiero et al. 2012), and we identified 1573 asteroids, as shown in Fig. 6. Albedo data correlates rather well with the position of asteroids in the plane of $i - z$ colour versus gri slope: 81.5 per cent of objects identified as C-complex have values of $p_V < 0.12$, and 94.6 per cent 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 hyperparameters, that work best for our data set, we use genetic algorithms (Chen, Wang & Lee 2004), according to the procedure described in Carruba, Aljbaae & Domingos (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 per cent 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, Golub & LeVeque 1979). GNB is a classification technique used in ML based on the probabilistic approach and Gaussian distribution. GNB assumes that each parameter (also called features or predictors) has an independent capacity of predicting 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 the higher probability. Finally, since we are dealing with a multiclassification 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,

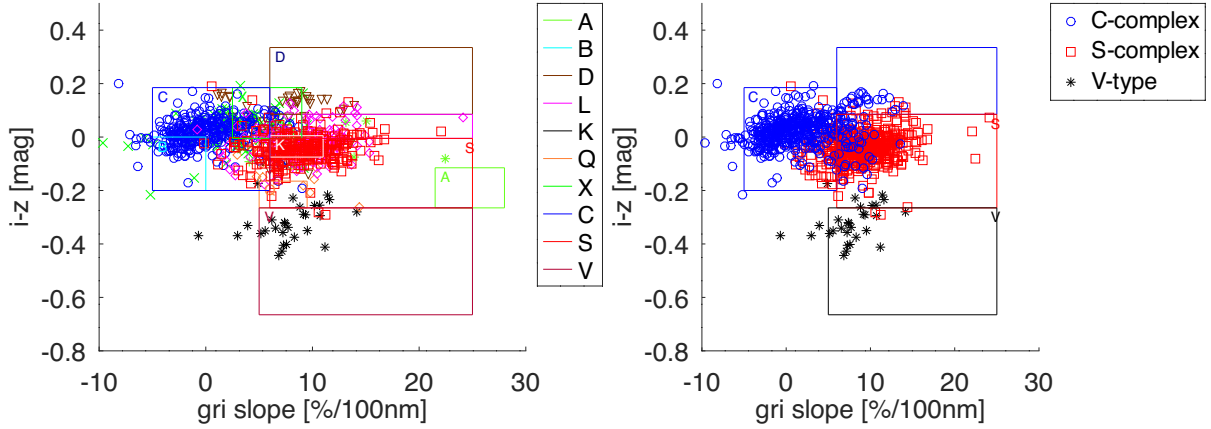


Figure 4. $i - z$ colour versus gri slope of asteroids with data in both the SDSS-MOC4 and DES data base. The boundaries of the DeMeo & Carry (2013) taxonomical classes are identified by the coloured boxes. The left panel displays the positions of these asteroids for all DeMeo & Carry (2013) available 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 data bases.

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 data bases 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

rather than the more commonly used accuracy. The model had an f_1 score of 91.6 per cent.

Fig. 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 Fig. 7 is caused by the presence of D-type objects that extends the boundaries of C-complex upwards and rightwards. 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 DATA BASE: (G-R, G-I) PLANE

The number of asteroids with DES data increases significantly if we consider the $g - r$ and $g - i$ colours instead of the $i - z$ and gri slope, passing from 17 078 to 61493. Their distribution in the ($g - r$, $g -$

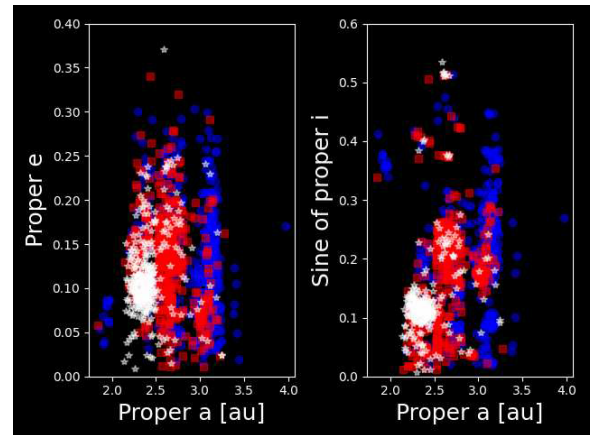


Figure 5. Projections in the proper (a , e) and proper (a , $\sin(i)$) of the C-complex (full circles), S-complex (full squares), and V-type objects (asterisks), identified in both the DES and SDSS-MOC4 data bases, and as listed in Table 4. Proper elements were obtained from *AFP*.

i) plane is shown in Fig. 8, with g , r , i being the photometric bands of the SDSS *'ugriz'* system. While some of the brightest objects can have negative values of these colours, 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 colour distributions, which corresponds to the interval $-0.266 < g - r < 1.393$ and $-0.326 < g - i < 1.746$.

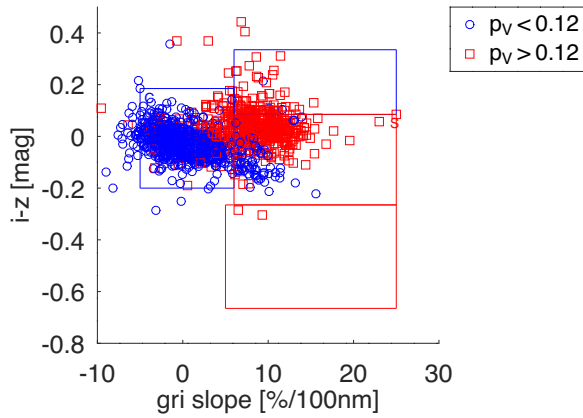


Figure 6. $i - z$ colour versus gri slope for asteroids with albedo data and present in the DES data base.

Table 5. Percentage of asteroids with C and S-complexes 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

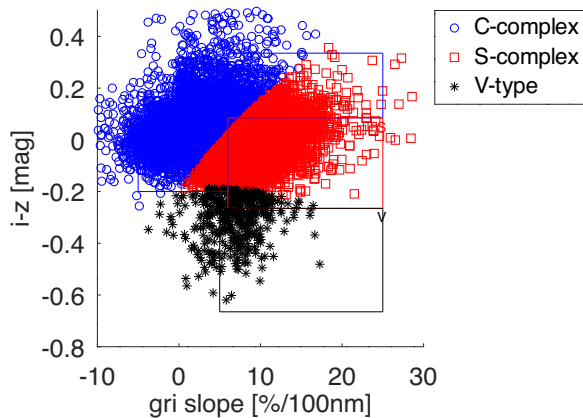


Figure 7. $i - z$ colour versus gri slope of the ML predicted data for asteroids in the DES data base with no SDSS-MOC4 data.

Outliers are displayed as blue full circles in the figure, while red full circles show the positions of the rest of the data set. We will exclude outliers from our analysis, henceforth. After removing the outliers, we ended up with a data set of 61 142 asteroids. Fig. 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 Fig. 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

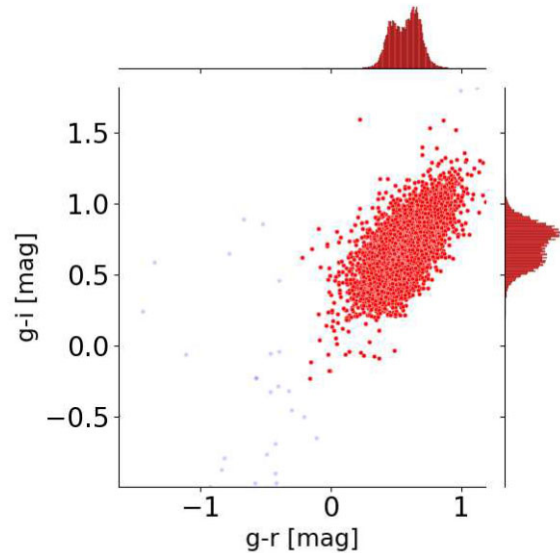


Figure 8. A joint plot of the $(g - r, g - i)$ colours for asteroids with available DES data. The blue full transparent circles indicate outlier data in the distributions of both colours. The histograms of the two colours distributions, without the outliers, are displayed on the top and right sides,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

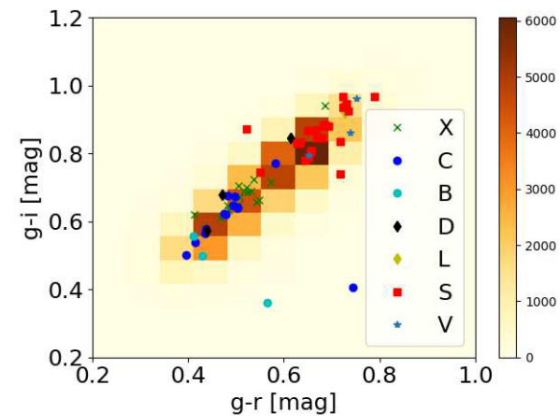


Figure 9. A 2D histogram in the $(g - r, g - i)$ plane of the asteroids with DES data. The symbols are objects for which taxonomical information is available in the Bus & Binzel (2002), Lazzaro et al. (2004), and DeMeo et al. (2009) surveys, according to the code shown in the legend.

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 SDSS-MOC4 (Ivezić et al. 2001). 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 data bases, of which 1514 are within the C-complex, and 1833 are within the S-complex. Fig. 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 Fig. 10 for simplicity.

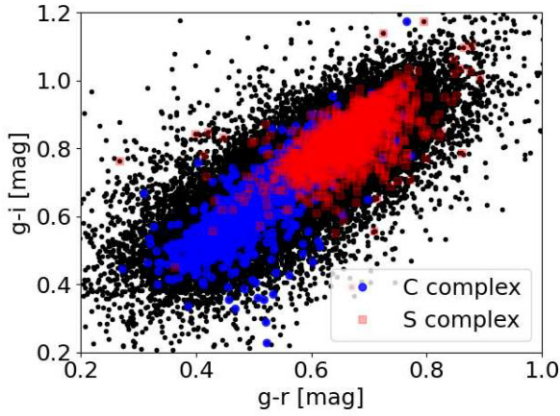


Figure 10. Projection in the $(g - r, g - i)$ plane of the asteroids with DES data and SDSS-MOC4 taxonomies. Circles identify asteroids likely to belong to the C-complex, while squares display asteroids with more likely to belong to the S-complex. Points are asteroids with no SDSS-MOC4 data.

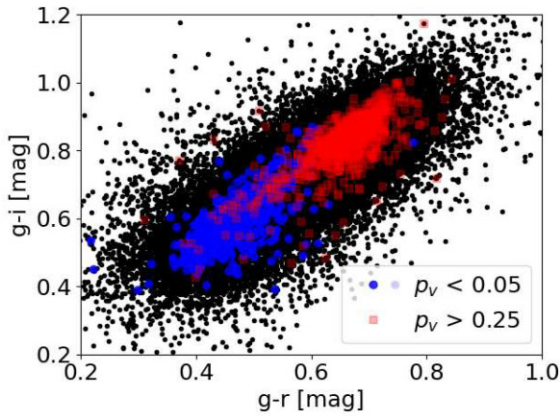


Figure 11. Projection in the $(g - r, g - i)$ plane of the asteroids with DES data and albedo values. Circles identify asteroids with albedo p_V lower than 0.05, while squares display asteroids with $p_V > 0.25$.

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 data set with albedo data in the *WISE* and *NEOWISE*, *AKARI*, or *IRAS* data bases, and identified 5122 asteroids, as shown in Fig. 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

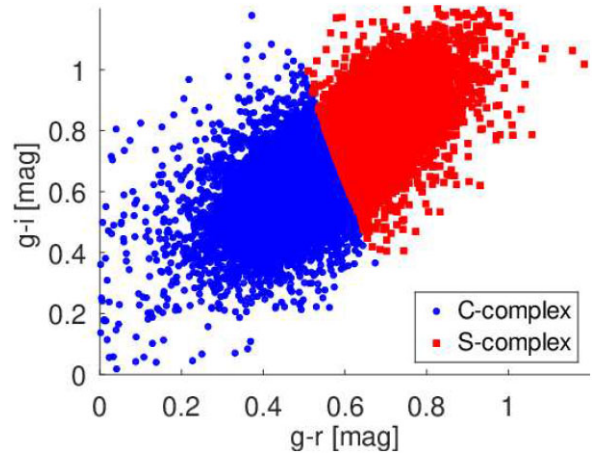


Figure 12. $(g - r, g - i)$ colours of the ML predicted data for asteroids in the DES data base.

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 $1/l$, 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 per cent on the validation set, which, as in the previous section, was 20 per cent of the original training set.

Fig. 12 shows predictions for 58 118 new asteroids with no prior complex information. Our analysis suggests that 28871 of these objects belong to the C-complex, while 29 247 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 $(gri$ slope, $i - z$) plane can be explained by the fact that, in the $(g - r, g - i)$ 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 $i - z$ colour plane was higher (65.6 per cent) 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 $i - z$ colour 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.

Fig. 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.

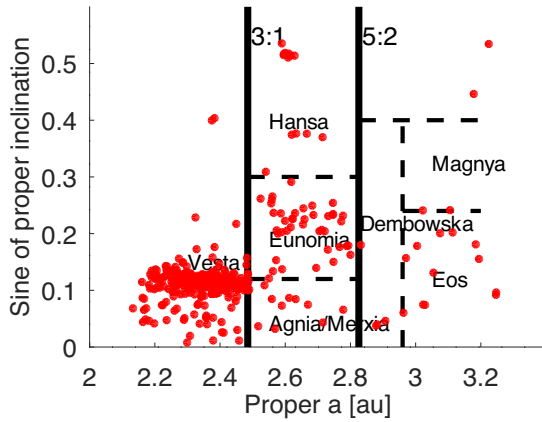


Figure 13. A proper (a , $\sin(i)$) projection of the V-type candidate asteroids identified using DES data. Vertical full lines identify the dynamical boundaries of the inner, central, and outer main belt. The dashed lines show the location of the dynamical regions associated with possible local sources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

(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, Carruba & Domingos (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.

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 $i - z$ colours 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 17 135 asteroids. However, with the exception of V-type and possibly C-type asteroids, DES data in this plane are insufficient to identify all the DeMeo & Carry (2013) taxonomies. None the less, we can still distinguish between C- and S-complex taxonomies. We utilized machine learning approaches, optimized using genetic algorithms, to predict complex labels for 10 213 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 61 493 asteroids with such data obtained after outlier removal. We employed machine learning algorithms to predict the complex labels of 58 118 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.

CODE AVAILABILITY

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

ACKNOWLEDGEMENTS

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). JIBC acknowledges grants 305917/2019-6, 306691/2022-1 (CNPq) and 201.681/2019 (Rio de Janeiro State Research Support Foundation, FAPERJ). This research used computational resources from the Interinstitutional Laboratory of e-Astronomy (LIneA) with financial support from the National Institute of Science and Technology (INCT) of the e-Universo (Process number 465376/2014-2). FSF acknowledges the support of Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. VF 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 the Spanish Ministry of Science and Innovation, MICINN, under grants ESP2017-89838, PGC2018-094773, PGC2018-102021, SEV-2016-0588, SEV-2016-0597, and MDM-2015-0509, some of which include European Regional Development Funds, ERDF, funds from the European Union. IFAE is partially funded by the Centres de Recerca de Catalunya, 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 European Research Council, 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.

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, colours, and slope parameters for asteroids from the Dark Energy Survey V1.0. urn:nasa:pds:gbo.ast.des.taxonomy::1.0. NASA Planetary Data System; <https://doi.org/10.26033/m95p-bn08>.

REFERENCES

- Abbott T. M. C. et al., 2021, *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, *ApJS*, 269, 17
- Berthier J., Vachier F., Thuillot W., Fernique P., Ochsenein F., Genova F., Lainey V., Arlot J. E., 2006, in Gabriel C., Arviset C., Ponz D., Enrique S. eds, ASP Conf. Ser. Vol. 351, Astronomical Data Analysis Software and Systems XV. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 367
- Blitzstein J. K., Hwang J., 2019, Introduction to Probability. CRC Press, Boca Raton
- 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
- Carruba V., Huaman M. E., Domingos R. C., Santos C. R. D., Souami D., 2014, *MNRAS*, 439, 3168
- Carruba V., Aljbaae S., Domingos R. C., 2021, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 133, 24
- 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. NASA Planetary Data System, available at: <https://doi.org/10.26033/m95p-bn08>
- 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, *ApJS*, 241, 6
- Chen P. W., Wang J. Y., Lee H., 2004, in 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat No04CH37541). IEEE, New York, p. 2035
- Cortes C., Vapnik V., 1995, *Mach. Learn.*, 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. Fermi National Accelerator Lab. (FNAL), Batavia, IL. available at: <https://www.osti.gov/biblio/1596042/>
- Flaugher B., 2005, *Int. J. Mod. Phys. A*, 20, 3121
- Flaugher B. et al., 2015, *AJ*, 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., Paolicchi P., 2014, *Icarus*, 239, 46
- Morganson E. et al., 2018, *PASP*, 130, 074501
- Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D., 2022, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 134, 34
- Pan J. et al., 2022, *Planet. Sci. J.*, 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, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50, 417.03
- Stephens R. D., Warner B. D., Harris A. W., 2010, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42, 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. Bullet.*, 38, 172
- Willmer C. N. A., 2018, *ApJS*, 236, 47

SUPPORTING INFORMATION

Supplementary data are available at *MNRAS* online.

Please note: Oxford University Press is not responsible for the content or functionality of any supporting materials supplied by the authors. Any queries (other than missing material) should be directed to the corresponding author for the article.

¹School of Natural Sciences and Engineering, São Paulo State University (UNESP), 12516.410-Guaratingueta-SP, Brasil.

²Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA, 20765-000-Rio de Janeiro-RJ, Brazil

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

⁴National Space Research Institute (INPE), Division of Space Mechanics and Control, C.P. 515, São José dos Campos SP-12227-310, Brazil

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

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

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

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







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

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

- ¹¹Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7095, Institut d'Astrophysique de Paris, F-75014 Paris, France
- ¹²Department of Physics and Astronomy, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, UK
- ¹³Instituto de Astrofísica de Canarias, E-38205 La Laguna, Tenerife, Spain
- ¹⁴Universidad de La Laguna, Dpto. Astrofísica, E-38206 La Laguna, Tenerife, Spain
- ¹⁵Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB, E-08193 Bellaterra (Barcelona), Spain
- ¹⁶Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg, Gojenbergsweg 112, D-21029 Hamburg, Germany
- ¹⁷School of Mathematics and Physics, University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia
- ¹⁸Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) 28040, Madrid, Spain
- ¹⁹Department of Physics, IIT Hyderabad, Kandi, Telangana 502285, India
- ²⁰Institute of Theoretical Astrophysics, University of Oslo. P.O. Box 1029 Blindern, NO-0315 Oslo, Norway
- ²¹Center for Astrophysical Surveys, National Center for Supercomputing Applications, 1205 West Clark St., Urbana, IL 61801, USA
- ²²Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA
- ²³Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Universidad Autónoma de Madrid, E-28049 Madrid, Spain
- ²⁴Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA
- ²⁵University Observatory, Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-Universität, Scheinerstr. 1, D-81679 Munich, Germany
- ²⁶Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 W. Green Street, Urbana, IL 61801, USA
- ²⁷Santa Cruz Institute for Particle Physics, Santa Cruz, CA 95064, USA
- ²⁸Center for Astrophysics, Harvard and Smithsonian, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA
- ²⁹Australian Astronomical Optics, Macquarie University, North Ryde, NSW 2113, Australia
- ³⁰Lowell Observatory, 1400 Mars Hill Rd, Flagstaff, AZ 86001, USA
- ³¹George 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
- ³²Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, E-08010 Barcelona, Spain
- ³³Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15312, USA
- ³⁴Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, P. O. Box 2450, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA
- ³⁵SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA
- ³⁶Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, CNRS Université Paris-Saclay, Bât. 100, Faculté des sciences, F-91405 Orsay Cedex, France
- ³⁷Instituto de Física, UFRGS, Caixa Postal 15051, Porto Alegre, RS - 91501-970, Brazil
- ³⁸School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK
- ³⁹Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA
- ⁴⁰Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

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

Year six photometric measurements of known Trans-Neptunian Objects and Centaurs by the Dark Energy Survey

F. S. Ferreira ^{1,2}★ J. I. B. Camargo ^{1,2} R. Bouffleur,^{1,2} M. V. Banda-Huarca,^{1,2} A. Pieres ^{1,2}, V. F. Peixoto,^{2,3} M. Assafin ^{2,3} P. H. Bernardinelli,⁴ H. W. Lin ⁵ F. Braga-Ribas,^{1,2,6} A. Gomes-Junior ^{2,7} R. Vieira-Martins,^{1,2} L. N. da Costa,² T. M. C. Abbott,⁸ M. Agüena,² Sahar S. Allam,⁹ O. Alves,⁵ J. Annis,⁹ D. Bacon,¹⁰ D. Brooks,¹¹ D. L. Burke,^{12,13} A. Carneiro Rosell,^{2,14} J. Carretero,¹⁵ S. Desai,¹⁶ P. Doel,¹¹ S. Everett,¹⁷ I. Ferrero,¹⁸ J. Frieman,^{9,19} J. García-Bellido,²⁰ M. Gatti,²¹ E. Gaztañaga,^{10,22,23} G. Giannini,^{15,19} D. Gruen,²⁴ R. A. Gruendl,^{25,26} K. Herner,⁹ S. R. Hinton,^{27,28} D. L. Hollowood,²⁹ K. Honscheid,³⁰ D. J. James,³¹ K. Kuehn,^{32,33} S. Lee,¹⁷ J. L. Marshall,³⁴ J. Mena-Fernández,³⁵ R. Miquel,^{15,36} J. Myles,³⁷ A. Palmese,³⁸ A. A. Plazas Malagón,^{12,13} M. E. S. Pereira,³⁹ S. Samuroff,⁴⁰ E. Sanchez,⁴¹ D. Sanchez Cid,⁴¹ I. Servila-Noarbe,⁴¹ M. Smith,⁴² E. Suchyta,⁴³ M. E. C. Swanson,²⁵ G. Tarle,⁵ C. To,³⁰ D. L. Tucker,⁹ J. de Vicente,⁴¹ V. Vikram,⁴⁴ A. R. Walker,⁸ and N. Weaverdyck^{45,46} (DES Collaboration)

Affiliations are listed at the end of the paper

Accepted 2025 April 11. Received 2025 April 11; in original form 2024 August 9

ABSTRACT

We identified known Trans-Neptunian Objects (TNOs) and Centaurs in the complete Dark Energy Survey (DES) year six catalogue (DES Y6) through the Sky Body Tracker (SkyBoT) tool. We classified our data set of 144 objects into a widely used 4-class taxonomic system of TNOs. No such previous classification was available in the literature for most of these objects. From absolute magnitudes and average albedos, an estimation of the diameters of all these objects is obtained. Correlations involving colours, orbital parameters, dynamical classes, and sizes are also discussed. In particular, our largest reddest object has a diameter of 390_{-53}^{+68} km and our largest cold classical, 255_{-17}^{+19} km. Also, a weak correlation between colour and inclination is found within the population of resonant TNOs in addition to weak correlations between colour and phase slope in different bands.

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

1 INTRODUCTION

Small bodies are seen as fundamental pieces to understand the history and evolution of the Solar system. Trans-Neptunian Objects (TNOs), located beyond the orbit of Neptune at ~ 30 au from the Sun), in particular, are regarded as collisional and dynamical remnants of an evolved planetesimal disc and, due to their large heliocentric distances, they are also relatively unaltered relics of the Solar system formation, providing important constraints of how this formation process worked (Morbidelli & Nesvorný 2020). Thus, 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 with their dynamical evolution mostly perturbed

by the Giant Planets. It is widely accepted that they are a transient population between the distant, cold Kuiper Belt Objects (KBOs) and the rapidly sublimating Jupiter family comets in the hotter region (Liu & Ip 2019). In fact, also according to Fernández, Jewitt & Sheppard (2002), 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 obtain important information about the chemical processes of the outer protoplanetary disc formation as reported by, for instance, Perna et al. (2010), Lacerda et al. (2014), Marsset et al. (2019), and Buchanan et al. (2022), helping us to develop theories about the birth and growth of our planetary system.

Because of their faint magnitudes, however, these objects are difficult to observe. Spectroscopy is a powerful tool to investigate TNOs surface composition, but only the brightest ones are suited for that technique. Even with the world's largest telescopes, most of the TNOs and Centaurs are too faint for spectroscopic observations (Barucci & Peixinho 2005) preventing, at least in the immediate future, compositional analysis with sufficient quality from ground-

* E-mail: felipheferreira@on.br

based facilities (see Pinilla-Alonso et al. 2021). On the other hand, multiband photometry provides access to all those pieces of information, faint objects included, although much less accurately.

Observations from photometric surveys have revealed a wide range of colours that, even though cannot be used to derive precise surface composition, are suitable to segregate objects into groups with colour similarities (see for instance Tegler & Romanishin 1998; Peixinho et al. 2003, 2012; Tegler, Romanishin & Consolmagno 2003; Barucci et al. 2005, 2008; Fulchignoni et al. 2008; Fraser & Brown 2012; Fraser, Brown & Glass 2015; Peixinho, Delsanti & Doressoundiram 2015; Tegler et al. 2016; Nesvorný et al. 2020).

The wide colour diversity of TNOs may be a result of physical processes acting on their surfaces and/or possible differences in composition (Doressoundiram et al. 2008). These icy bodies could be seen as a compilation of remnants transferred from different locations of the Solar system during planetary migration. The dynamically cold objects are thought to have been formed *in situ* and have preserved their original orbits after the migration of Neptune, whereas many of the dynamically hot objects were perturbed/scattered by Neptune. Thus, their current locations carry records of years of interactions (Brown 2012; Chen et al. 2022). Also, the current size distribution of these objects is relevant to understand scenarios involving accretion and collisional erosion processes they have undergone (Petit et al. 2008). It is important to note that the definition of cold classicals takes into consideration ranges of semimajor axis and inclination. In particular, the concept of free-inclination (i_{free} , see Gladman & Volk 2021; Huang, Gladman & Volk 2022; Kavelaars et al. 2022) may be adopted. We are using, instead, osculating elements only here.

Diameter and albedo are also important parameters to infer the composition and internal structure of TNOs. Given that TNOs are not spatially resolved in general, the determination of their sizes can not be measured directly (Barucci, Doressoundiram & Cruikshank 2004). The majority of diameters and albedos of small bodies are obtained from observations of these objects in thermal and optical wavelengths (see, for instance, Müller et al. 2010; Gerdes et al. 2017). Less frequently, but with an increasing number of measurements (see, for instance, Ortiz et al. 2020), accurate sizes/shapes can be obtained from stellar occultations (e.g. Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Braga-Ribas et al. 2014; Ortiz et al. 2017; Morgado et al. 2023). Then, from absolute magnitudes, their albedos can be inferred (see discussion in Section 4).

In general, as a consequence of their large distances from the Sun, TNOs have surface temperatures that are low enough to retain, in addition to water ice, highly volatile ices such as carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), carbon monoxide (CO), and nitrogen (N_2) (Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Braga-Ribas et al. 2014; Ortiz et al. 2017; Fernández-Valenzuela et al. 2021). Their surfaces also show signs of complex organic elements known as tholins. These materials are formed through processes of radiation of ultraviolet and cosmic rays, causing a reddish colouring in these distant bodies (Sagan & Khare 1979; Khare et al. 1993; Fernández-Valenzuela et al. 2021). It is worth mentioning, in this context, that volatile sublimation and space weathering at smaller distances from the Sun favours a positive correlation between albedo and size/perihelion distance (Müller, Lellouch & Fornasier 2020).

In this context, wide area, multiband deep sky surveys like Dark Energy Survey (DES) provide invaluable information to a variety of Solar systems studies from their accurate photometric measurements. Although originally not aimed at Solar system studies, DES has made key contributions to the photometric and astrometric/dynamical analysis of small bodies with heliocentric distances ranging from the inner Solar system to its outskirts (Becker et al. 2018; Khain et al.

2018; Banda-Huarca et al. 2019; Bernardinelli et al. 2020a, b; Khain et al. 2020; Henghes et al. 2021; Napier et al. 2021; Pan et al. 2022; Bernstein et al. 2023; Carruba et al. 2024), including the discoveries of a large-scattered disc object (2014 UZ224 – Gerdes et al. 2017), of a messenger from the hypothesized Oort cloud (C/2014 UN271 – Bernardinelli et al. 2021), of four L4 Neptunian Trojans in which one of them [2013 VX30, classified as a scattered disc object by SkyBoT (Sky Body Tracker), described later in the text] has shown a significantly similar colour to that of the reddest TNOs (Gerdes et al. 2016; Lin et al. 2019), in addition to the compilation of one of the two largest catalogues of TNOs (Bernardinelli et al. 2022) as well as the largest TNO colour and light-curve catalogue (Bernardinelli et al. 2023).

Following the series of these contributions, this paper concentrates on photometric measurements of TNOs and Centaurs. Section 3, briefly describes the identification of known TNOs and Centaurs in the DES observations. Absolute magnitudes, in Section 4, are determined from the DES photometry and used to obtain diameters and a taxonomic classification.

Different approaches to determine taxonomic classes for TNOs and Centaurs have been proposed by many authors. Pinilla-Alonso et al. (2025) revealed the existence of three main spectral groups of TNOs corresponding to different surface compositions from spectroscopic observations from the *JWST*. Fraser & Brown (2012) and Fraser et al. (2015) found that the surfaces of dynamically excited small TNOs and Centaurs are well describe by two mixture models of two components. Later, Fraser et al. (2023) presented a new interpretation of KBO colours, again in two populations, that occupy different optical–near-infrared (NIR) colour regions following the reddening curve, the curve of constant spectral slope through colour space. Dalle Ore et al. (2013), using modified *K*-means clustering technique applied to multiband optical photometry and optical albedos, found 10 surface types. Pike et al. (2017) found three distinct TNO surface types that result from *g*-, *r*-, and *z*-band photometry. Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008) use a clustering process (*G* mode, see Coradini et al. 1977; Fulchignoni, Birlan & Antonietta Barucci 2000) to justify and present four different classes. We adopt in this work the classification proposed by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008) (see Section 4), although an exact number of classes is not a consensus in the literature. A discussion about the taxonomic scheme adopted here and correlations involving colours, orbital parameters, dynamical classes, and sizes is also presented.

2 THE DARK ENERGY SURVEY

DES is an international collaborative effort designed to investigate the nature of the dark energy, responsible to accelerate the expansion of our universe. Over six years of observations (2013–2019), the collaboration used night and half-night of observations equivalent to 575 full nights which imaged 5000 sq deg of the celestial Southern hemisphere in five optical filters, *grizY*. Besides the explored galaxies, the survey allowed the observation of more than 300 000 objects within the Solar system (see Table 1) and has discovered hundreds of TNOs (Dark Energy Survey Collaboration 2016; Bernardinelli et al. 2022), being an astrometric and photometric treasure to the study of small bodies.

The observations within the survey were made with an extremely sensitive 570-Megapixel digital camera, The Dark Energy Camera – DECam (Flaugher et al. 2015), a mosaic of 62 2k × 4k red-sensitive CCDs with a hexagonal pattern located on the prime focus of the Blanco 4-m Telescope at Cerro Tololo Inter-American Observatory,

Table 1. Number of objects that could have DES images identified by SkyBoT. These figures may change each time the SkyBoT database is updated.

Dyn. class	Number
Main Belt	366 706
Hungaria	12 199
NEAs	9400
Mars-Crossers	8213
TNOs	758
Centaur	129
Trojans (Jupiter)	1684
Comets	423
Total	399 512

in Chile. The camera has an effective field of view (FOV) of ~ 3.0 sq deg and the CCDs have $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ pixels with a plate scale of 0.263 pixel^{-1} . The DES wide-area survey images have a nominal 10σ limiting magnitudes of $g = 23.57$, $r = 23.34$, $i = 22.78$, $z = 22.10$, and $Y = 20.69$, with the final co-added depth being roughly one magnitude deeper (Morganson et al. 2018).

3 DATA AND TOOLS

The basic pieces of information used in this paper are derived from photometric measurements from DES for known TNOs and Centaurs.

A first step in this study is to locate which single epoch CCDs, and respective catalogues, contain observations of a TNO or a Centaur. The next step is then, among all astrometric and photometric measurements from a given selected CCD/catalogue, retrieve those of the target. Procedures and tools to accomplish these tasks are detailed below.

3.1 Observational data

Following the procedures adopted by Banda-Huarca et al. (2019), we identified all CCD frames, acquired during the six years of observations with the DECam within DES, that could contain the image(s) of one or more known small Solar system object(s). We then searched, for each CCD obtained from that identification, the corresponding DES catalogue containing astrometric and photometric measurements. These catalogues are a compilation under the name Year-6 (Y6) with full name Y6A1_FINALCUT_OBJECTS (refer to sections 1 and 4.8 in Morganson et al. 2018, for more details about the finalcut catalogue). The magnitude zero-points of each CCD were determined by the collaboration through the Forward Global Calibration Method (Burke et al. 2018). Relevant pieces of information to this work were the CCD unique identification, bandpass, flux measurements and their respective uncertainties, ICRS positions, exposure time and date, and time of observation.

The download of CCD frames from the DES database was necessary for an independent measurement of the full width at half-maximum (FWHM) of the target objects. One important point to be mentioned is that the image header key OPENSHT is available from image headers only and not from DES tables accessible via the `easyaccess` tool (Carrasco Kind, Drlica-Wagner & Koziol 2018). The OPENSHT key contains the accurate UTC time when the shutter opens, a fundamental quantity when determining the positions of small bodies and fast varying photometry.

In fact, an image key header that contains time and is readily accessible via `easyaccess` is DATE-OBS. It differs from the respective OPENSHT value by a fraction of a second in most cases.

The identification of a Solar system object in a given DES catalogue (see also Section 3.4) requires the knowledge of the mean observation time (i.e. the time shown by OPENSHT plus half of the exposure time). Due the large FOV of DECam, the shutter takes around 1 s to cover (or uncover) the FOV. A small correction to the mean observation time due to this fact is applied (see Flaughner et al. 2015; Banda-Huarca et al. 2019).

3.2 Object search in the DES database

The identification of all known small bodies in the DES images/catalogues from the six years of observations is done through the SkyBoT (Berthier et al. 2006). This project provides a virtual observatory developed by the Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (Paris Observatory), which seeks and identifies every Solar system object in an astronomical image by knowing the pointing, observing date and site, and FOV.

A cone-search with SkyBoT delivers an output in text or VOTable format containing, among others, J2000 equatorial coordinates, name and number (if numbered), estimated V magnitude and dynamical classification. The number and class of known objects identified so far in DES are shown in Table 1. The dynamical classification is that provided by SkyBoT.¹ It should be also stressed there are no overlaps between the different dynamical classifications. For instance, an object classified as classical, will not appear in any other dynamical group (resonants, SDO, etc.). In particular, we have no objects from the Haumea family.

The dynamical parameters of asteroids in SkyBoT come from the ASTORB (The Asteroidal Orbital Elements, Lowell Observatory). If an object is not in ASTORB or if SkyBoT was not updated when an object was included in ASTORB, then this object is unknown to SkyBoT. To avoid frequent and time consuming operations related to the queries on the DES database and on SkyBoT, the number of Solar system objects presented here is that obtained on 2022 May 31, close to the date this work started. In this context, the current numbers of known objects today are certainly larger than those shown in Table 1.

3.3 TNOs and Centaurs

The number of known such objects found by SkyBoT within the DES footprint amounted to 758 TNOs and 129 Centaurs. This, however, does not mean that all of them were effectively detected or identified. In fact, objects whose magnitudes are too faint to have been detected by a single-epoch image or whose positional uncertainties are too large do not appear in this work.

We select in a first step, for photometric studies, all TNOs/Centaurs with at least three measurements in each *griz* filter. Then, the absolute magnitudes in each filter from equation (2) were calculated as a way to attenuate systematic issues in colours from rotational effects (see discussion later in the text). With the values for the absolute magnitudes, it is possible to obtain colour indices for these bodies from which a taxonomic classification can be inferred.

¹The dynamical classification used by the SkyBoT can be readily accessed from <https://ssp.imcce.fr/webservices/skybot/>.

Table 2. Column 1: exposure time interval; and columns 2–5: median FWHM as obtained from all target observations with exposure time intervals given by column 1. FWHM were determined with the astrometric package PRAIA (Assafin 2023); and column 6: number of measurements used in the determination of the median FWHM.

Exposure time (s)	Centaurs				Number of measurements
	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	
$t \leq 90$	1.16	1.01	0.93	0.87	432
$t > 90$	1.07	1.17	1.15	0.92	254

Table 3. Same as Table 2.

Exposure time (s)	TNOs				Number of measurements
	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	
$t \leq 90$	1.10	0.98	0.91	0.90	7110
$90 < t \leq 300$	1.21	1.10	1.02	0.99	1844
$t > 300$	1.01	1.03	0.99	0.91	1607

3.4 Photometric measurements

In this work, photometric data come exclusively from the single-epoch DES Y6 (last season of survey) catalogues. A description of image processing and determination of magnitudes is given by Morganson et al. (2018). It is also important to emphasize that these measurements result from the same instrument and went through the same and well-defined reduction process (see Morganson et al. 2018).

The identification of an object present in the catalogue is made by comparing the observed positions from DES with those predicted by the small body and planetary ephemerides from the NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL).

The calculated (ephemeris) positions were obtained with the help of the SPICE/NAIF system (Acton 1996; Acton et al. 2018).

Our DECam single exposures were processed by DES Data Management, in a set known as ‘Final Cut’, since the data is the final selection to co-add Y6. The photometry in this work is the PSF (point spread function) photometry (the only exception is mentioned below) resulting from SOURCEEXTRACTOR in single epoch exposures (see section 3 in Abbott et al. 2019, DR1 paper), with improved calibration (see section 3.1 in Abbott et al. 2021) over ‘First Cut’ (see again Morganson et al. 2018).

Single exposures are typically 90 s (wide area survey) for *griz* and 45 s for *Y* (DR2 paper). More information as the typical seeing, limiting magnitude, and sky brightness can be accessed in table 1 of the DR2 paper, as well as details about the photometry in single exposures.

In addition to wide area survey, where most of our data comes from, this work also profits from observations from the supernova program, where longer (up to 400 s) exposure times were used (see Kessler et al. 2015; Diehl et al. 2016).

The impact of trailing from long exposure times may be generally estimated by measuring the FWHM of targets in different exposure times. This can be seen in Tables 2 and 3. It is interesting to note in those tables that the values of the FWHM are similar regardless the exposure time.

One object, however, required special attention: the Centaur 2009 HH36. It has an orbital period of 45.58 yr and combines the shortest orbital period with the longest exposure time along our objects (Table 4). In fact, a few hundreds of seconds of exposure time for this centaur implies a trail with size comparable to the DECam pixel scale ($0.263 \text{ arcsec pixel}^{-1}$, see Abbott et al. 2021). All other objects were checked and their differential displacements with respect to the stars represent just a small fraction of the pixel size during their respective exposure times in each filter.

In order to avoid loss of flux in the case of 2009 HH36 due to the use of PSF photometry, we used the results from MAG_APER_8, that is, flux measurement in a circular aperture of 5.84 arcsec in diameter (see Abbott et al. 2018). That aperture is large enough to contain all the flux from the object. All images that contributed to a measurement of the magnitude of 2009 HH36 were visually inspected to search for the presence of contaminating flux sources and none was found.

4 RESULTS

As previously mentioned, an exact number of taxonomic classes for TNOs and Centaurs is not a consensus in the literature and this work does not aim at finding it. The one we adopt here is that by Barucci et al. (2005) and Lichignoni et al. (2008). Further discussion on this is provided later in the text.

4.1 Colours from absolute magnitudes

Given the observational cadence of the DES, it is difficult to obtain the rotational light curve of all objects. As a consequence, colours are not reliably obtained from the direct combination of multiband photometric measurements because it is not possible to assure that observations in different bands are taken in the same (or nearly the same) rotational phase. A simple approach to overcome this problem involves the determination of the absolute magnitude, the solar phase slope, and the consideration, as described in Section 4.2, of the amplitude of an unknown rotational light curve.

The absolute magnitude H is given by equation (1) (e.g. Hughes 2003).

$$H = m - 5 \log(R\Delta) + 2.5 \log \phi(\alpha), \quad (1)$$

where m is the apparent magnitude at the date of observation, R is the heliocentric distance of the object, Δ is the observer distance of the object and $\phi(\alpha)$ is the phase function such that, for $\alpha = 0^\circ$ (opposition) and $\phi(0) = 1$. H is the observed magnitude with $\alpha = 0^\circ$ and $R = \Delta = 1 \text{ au}$.

Such a determination is straightforward from least squares, for objects with three or more observations, from the more simple equation (2)

$$H_f + \alpha\beta_f = m_f - 5 \log(R\Delta) \quad (2)$$

where m_f is the observed magnitude at a given filter f , α is the phase angle, β_f is the slope coefficient, and H_f is the absolute magnitude at the given filter. The only unknowns are, therefore, H_f and β_f . The second member of equation (2) is known as reduced magnitude (object’s magnitude at a distance of 1 au from the observer and the Sun for a given phase angle). Phase angles and distances (heliocentric and from the observer) are directly determined from small body ephemerides provided by the JPL.

A linear function was preferred instead of more complex models such as phase curve fit, e.g. $H-G$ model (Bowell et al. 1989), $H - G_1 - G_2$ (Muinonen et al. 2010), or $H - G_{12}$ (Muinonen et al. 2010; Penttilä et al. 2016) to describe the behaviour of the reduced

Table 4. TNOs and Centaurs from DES photometry that were classified into four groups, from neutral (BB) to very red (RR) colours, following the taxonomic scheme presented by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008).

Number	Object	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Dyn. class	Diam. (km)	This work	[1]	[2]	[3]	[4]
1	136199 Eris	-0.79394 (± 0.07528)	0.09808 (± 0.25213)	0.07163 (± 0.25544)	0.06074 (± 0.17728)	0.04952 (± 0.18036)	0.543 (± 0.110)	0.643 (± 0.107)	0.565 (± 0.114)	Detached	2221 ⁺⁴⁸ ₋₁₃₄ 2221 ⁺¹³⁸ ₋₁₈₇	BB	BB	BB	BB	BB
2	2010 TJ	5.53982 (± 0.14384)	0.29991 (± 0.13438)	0.19426 (± 0.13947)	0.07153 (± 0.15380)	0.13612 (± 0.25686)	0.320 (± 0.206)	0.293 (± 0.224)	0.444 (± 0.324)	Detached	291 ⁺⁹¹ ₋₅₇	BB				
3	2001 QF298	5.53246 (± 0.09742)	0.29852 (± 0.23679)	0.19902 (± 0.09962)	0.26912 (± 0.12557)	0.47137 (± 0.14845)	0.414 (± 0.118)	0.533 (± 0.123)	0.872 (± 0.156)	Resonant (3:2)	430 ⁺⁷⁶ ₋₇₀	BB	BB	BB	BB	BB
4	2013 RP98*	7.40231 (± 0.07621)	0.22567 (± 0.09138)	0.34171 (± 0.10924)	0.111560 (± 0.13618)	-0.09845 (± 0.19814)	0.511 (± 0.116)	0.542 (± 0.122)	0.692 (± 0.177)	Hot classical	171 ⁺²⁵ ₋₂₀	BB				
5	2013 UF31*	8.09176 (± 0.07970)	0.30394 (± 0.07019)	0.11381 (± 0.06992)	0.02994 (± 0.07201)	-0.01640 (± 0.08362)	0.412 (± 0.116)	0.553 (± 0.120)	0.688 (± 0.138)	Resonant (3:2)	118 ⁺¹⁶ ₋₁₃	BB				
6	2014 SO373*	7.23976 (± 0.15824)	0.29655 (± 0.13266)	0.16157 (± 0.10073)	0.17332 (± 0.09401)	0.13179 (± 0.13038)	0.400 (± 0.198)	0.556 (± 0.185)	0.610 (± 0.220)	Resonant (5:3)	129 ⁺²² ₋₁₈	BB				
7	2014 TB86	6.84360 (± 0.07690)	0.41719 (± 0.10056)	0.08067 (± 0.09960)	0.08172 (± 0.09132)	0.25496 (± 0.09738)	0.373 (± 0.112)	0.565 (± 0.117)	0.853 (± 0.109)	Hot classical	214 ⁺³¹ ₋₂₅	BB				
8	2014 QA442	5.68230 (± 0.14541)	-0.05429 (± 0.11717)	0.00004 (± 0.08470)	0.02561 (± 0.10506)	0.04887 (± 0.12349)	0.513 (± 0.179)	0.607 (± 0.198)	0.647 (± 0.206)	Resonant (7:4)	271 ⁺⁴⁴ ₋₃₆	BB				
9	2015 PF312	6.45139 (± 0.05107)	0.30061 (± 0.05381)	0.25433 (± 0.04923)	0.21917 (± 0.04622)	0.05303 (± 0.03368)	0.437 (± 0.068)	0.656 (± 0.065)	0.611 (± 0.060)	Resonant (11:6)	187 ⁺²⁰ ₋₁₆	BB				
10	2013 QP95*	7.74242 (± 0.05856)	0.12226 (± 0.05895)	-0.01617 (± 0.06033)	-0.02547 (± 0.04773)	-0.07487 (± 0.03408)	0.435 (± 0.091)	0.688 (± 0.078)	0.782 (± 0.068)	SDO	174 ⁺³⁵ ₋₁₂	BB				
11	2013 RQ109*	8.23591 (± 0.12223)	0.19321 (± 0.13125)	0.17525 (± 0.08999)	0.02098 (± 0.09897)	0.03374 (± 0.07580)	0.576 (± 0.143)	0.538 (± 0.169)	0.839 (± 0.146)	Resonant (4:3)	85 ⁺¹² ₋₁₀	BB				
12	2013 UE31*	6.70687 (± 0.40096)	0.27306 (± 0.33276)	0.14883 (± 0.20583)	0.06850 (± 0.28874)	0.08448 (± 0.14106)	0.369 (± 0.482)	0.312 (± 0.531)	0.534 (± 0.441)	Resonant (2:1)	164 ⁺⁵⁴ ₋₄₀	BB				
13	2016 SA56	7.44205 (± 0.14072)	0.43923 (± 0.20291)	0.30282 (± 0.15005)	-0.01304 (± 0.12885)	0.24630 (± 0.16775)	0.474 (± 0.183)	0.569 (± 0.190)	0.909 (± 0.210)	Resonant (19:9)	120 ⁺¹⁹ ₋₁₆	BB				
14	2016 SJ57	7.67754 (± 0.07861)	0.21672 (± 0.08344)	0.18157 (± 0.06830)	-0.11235 (± 0.07114)	0.26501 (± 0.27215)	0.464 (± 0.103)	0.403 (± 0.102)	0.719 (± 0.182)	Resonant (4:3)	107 ⁺¹³ ₋₁₁	BB				
15	2012 WD36*	6.89609 (± 0.08294)	0.31022 (± 0.08968)	0.41056 (± 0.08231)	-0.03538 (± 0.08225)	0.30903 (± 0.09167)	0.473 (± 0.108)	0.441 (± 0.108)	0.831 (± 0.111)	Detached	161 ⁺²⁷ ₋₂₇	BB				
16	2014 XB48*	7.63211 (± 0.14438)	0.29415 (± 0.12444)	0.11191 (± 0.10770)	-0.00378 (± 0.11494)	-0.05191 (± 0.15572)	0.409 (± 0.199)	0.451 (± 0.205)	0.685 (± 0.231)	Resonant (7:2)	108 ⁺¹⁴ ₋₁₄	BB				
17	2013 RO124*	7.53653 (± 0.05261)	0.46101 (± 0.09708)	0.23375 (± 0.06971)	0.02174 (± 0.10047)	0.03940 (± 0.12783)	0.428 (± 0.078)	0.474 (± 0.079)	0.889 (± 0.134)	SDO	192 ⁺²¹ ₋₂₁	BB				
18	2010 TY53	5.86531 (± 0.09339)	0.09790 (± 0.07533)	0.08043 (± 0.06939)	0.000861 (± 0.10386)	0.09818 (± 0.13778)	0.466 (± 0.129)	0.486 (± 0.180)	0.741 (± 0.172)	SDO	417 ⁺⁶⁸ ₋₃₅	BB				
19	2060 Chiron	5.86356 (± 0.09885)	0.11535 (± 0.05570)	0.06482 (± 0.08063)	0.06090 (± 0.06757)	0.06845 (± 0.07174)	0.327 (± 0.162)	0.372 (± 0.160)	0.409 (± 0.179)	Centaur	236 ⁺⁴⁹ ₋₃₆	BB	BB	BB	BB	BB
20	2014 QS441*	5.81261 (± 0.05328)	-0.01010 (± 0.06385)	0.15697 (± 0.05234)	0.11716 (± 0.05754)	0.07723 (± 0.03992)	0.503 (± 0.069)	0.510 (± 0.073)	0.459 (± 0.064)	Hot classical	355 ⁺⁴⁶ ₋₃₆	BB				
21	2014 WCS36	7.60884 (± 0.13716)	0.12156 (± 0.10782)	0.13956 (± 0.15195)	0.05753 (± 0.11455)	0.03818 (± 0.07601)	0.575 (± 0.258)	0.456 (± 0.213)	0.615 (± 0.172)	Resonant (3:2)	153 ⁺²⁷ ₋₂₂	BB				
22	2014 OB394	6.73129 (± 0.06412)	-0.04612 (± 0.10586)	0.08842 (± 0.06640)	0.05996 (± 0.14293)	0.08770 (± 0.19349)	0.603 (± 0.091)	0.780 (± 0.105)	0.907 (± 0.158)	SDO	289 ⁺⁴² ₋₃₅	BR				
23	2013 TE172*	7.66070 (± 0.09444)	0.42728 (± 0.13007)	0.13958 (± 0.09885)	0.11383 (± 0.09860)	0.09770 (± 0.05556)	0.650 (± 0.147)	0.896 (± 0.149)	0.891 (± 0.113)	SDO	190 ⁺³² ₋₂₅	BR				
24	2014 SN363*	7.61910 (± 0.17640)	0.07633 (± 0.23269)	0.18157 (± 0.11847)	-0.01193 (± 0.09711)	0.12165 (± 0.20377)	0.663 (± 0.213)	0.713 (± 0.206)	1.019 (± 0.247)	Resonant (11:6)	115 ⁺²¹ ₋₁₇	BR				
25	2013 RD109*	8.61443 (± 0.06608)	0.17465 (± 0.05832)	0.21956 (± 0.07559)	0.21806 (± 0.07087)	-0.10940 (± 0.10454)	0.710 (± 0.124)	0.855 (± 0.108)	0.854 (± 0.149)	SDO	125 ⁺¹⁹ ₋₁₅	BR				
26	2014 NIB66	6.12518 (± 0.05103)	0.09186 (± 0.10797)	0.24101 (± 0.11722)	0.08763 (± 0.11039)	-0.26592 (± 0.27117)	0.717 (± 0.088)	0.927 (± 0.087)	0.989 (± 0.115)	Cold classical	255 ⁺¹⁹ ₋₁₇	BR				
27	2013 SO102*	8.05735 (± 0.07414)	0.06123 (± 0.09041)	-0.07443 (± 0.13397)	0.01514 (± 0.06201)	0.15878 (± 0.07811)	0.505 (± 0.117)	0.601 (± 0.103)	0.994 (± 0.113)	Resonant (3:2)	123 ⁺¹⁶ ₋₁₃	BR				
28	2013 SA100	9.30524 (± 0.07263)	0.36306 (± 0.12542)	0.34469 (± 0.18486)	0.06865 (± 0.12099)	-0.14421 (± 0.13887)	0.621 (± 0.143)	0.654 (± 0.102)	0.796 (± 0.113)	Hot classical	291 ⁺⁴³ ₋₃₄	BR				
29	2013 TZ171*	7.71058 (± 0.07739)	0.17679 (± 0.06203)	0.13537 (± 0.05302)	0.101743 (± 0.07968)	0.24026 (± 0.10805)	0.510 (± 0.101)	0.665 (± 0.120)	1.020 (± 0.166)	Hot classical	148 ⁺²¹ ₋₁₇	BR				
30	2013 RS109	7.37979 (± 0.05889)	0.14294 (± 0.12170)	-0.05004 (± 0.09235)	0.00846 (± 0.11723)	-0.14598 (± 0.08187)	0.518 (± 0.087)	0.708 (± 0.101)	1.023 (± 0.086)	Resonant (11:6)	124 ⁺¹⁴ ₋₁₁	BR				
31	2007 RW10	7.12967 (± 0.07410)	0.10114 (± 0.06339)	0.11567 (± 0.08207)	0.10778 (± 0.07492)	0.07811 (± 0.08708)	0.570 (± 0.120)	0.710 (± 0.103)	0.789 (± 0.126)	SDO	174 ⁺⁷⁴ ₋₃₀	BR				
32	2013 SP102	6.47372 (± 0.08709)	0.12799 (± 0.13515)	0.17615 (± 0.11970)	0.12303 (± 0.07671)	0.03422 (± 0.09583)	0.626 (± 0.123)	0.719 (± 0.109)	0.860 (± 0.123)	Resonant (3:2)	262 ⁺³⁵ ₋₂₉	BR				

Table 4 – continued

Number	Object	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Dyn. class	Diam. (km)	This work	[1]	[2]	[3]	[4]
33	2013 RN124	7.05427 (± 0.07582)	0.31776 (± 0.10988)	0.25068 (± 0.08854)	0.26507 (± 0.09388)	0.05383 (± 0.25931)	0.627 (± 0.104)	0.719 (± 0.091)	0.952 (± 0.132)	Hot classical	206 $^{+30}_{-23}$	BR				
34	2013 TF172	7.43152 (± 0.06973)	0.12909 (± 0.11614)	0.14169 (± 0.08224)	0.02634 (± 0.08169)	-0.18530 (± 0.22888)	0.496 (± 0.088)	0.722 (± 0.090)	0.894 (± 0.147)	Resonant (7:4)	121 $^{+14}_{-12}$	BR				
35	2016 QV89*	6.39664 (± 0.05486)	0.16738 (± 0.07945)	0.17847 (± 0.06285)	-0.09890 (± 0.06446)	0.10003 (± 0.05564)	0.582 (± 0.072)	0.725 (± 0.074)	0.952 (± 0.072)	Detached	208 $^{+52}_{-32}$	BR				
36	2012 TD324	7.43607 (± 0.06240)	0.23411 (± 0.09130)	0.17770 (± 0.08499)	0.01180 (± 0.11587)	0.11494 (± 0.10664)	0.614 (± 0.092)	0.739 (± 0.104)	1.061 (± 0.126)	Resonant (3:2)	167 $^{+20}_{-16}$	BR				
37	2014 SF373*	7.51920 (± 0.07602)	0.03741 (± 0.07048)	-0.05661 (± 0.08064)	0.05655 (± 0.15122)	-0.07885 (± 0.12508)	0.457 (± 0.122)	0.744 (± 0.151)	0.806 (± 0.160)	Resonant (3:2)	156 $^{+20}_{-17}$	BR				
38	2013 RJ109*	7.34073 (± 0.05974)	0.30349 (± 0.08806)	0.11528 (± 0.07569)	-0.23554 (± 0.14205)	-0.18847 (± 0.22790)	0.599 (± 0.084)	0.744 (± 0.091)	0.847 (± 0.146)	Resonant (7:4)	129 $^{+14}_{-12}$	BR				
39	2014 LQ28	6.35506 (± 0.11186)	0.25684 (± 0.11604)	0.03198 (± 0.08926)	0.18095 (± 0.11476)	0.11819 (± 0.20734)	0.517 (± 0.134)	0.812 (± 0.138)	1.025 (± 0.158)	Resonant (7:4)	199 $^{+28}_{-23}$	BR				
40	2016 SSS5	7.01610 (± 0.08117)	0.25785 (± 0.10543)	-0.08950 (± 0.08934)	0.13763 (± 0.09653)	0.12718 (± 0.18871)	0.533 (± 0.114)	0.910 (± 0.114)	1.084 (± 0.188)	Detached	155 $^{+41}_{-26}$	BR				
41	2016 TT94*	7.08401 (± 0.25875)	0.06904 (± 0.20402)	0.02449 (± 0.15199)	0.19905 (± 0.17602)	0.01389 (± 0.18146)	0.491 (± 0.321)	0.915 (± 0.344)	0.743 (± 0.334)	Resonant (5:3)	142 $^{+33}_{-26}$	BR				
42	2016 SQ58	8.30793 (± 0.09946)	0.23484 (± 0.09725)	-0.04697 (± 0.07313)	0.20972 (± 0.07887)	-0.00353 (± 0.09801)	0.387 (± 0.135)	0.863 (± 0.132)	0.974 (± 0.152)	Resonant (4:3)	79 $^{+11}_{-9}$	BR				
43	2013 RW124*	7.72249 (± 0.08829)	0.42706 (± 0.09349)	0.35756 (± 0.10068)	0.13714 (± 0.12350)	0.29263 (± 0.19948)	0.458 (± 0.126)	0.606 (± 0.143)	0.896 (± 0.219)	Resonant (4:3)	105 $^{+13}_{-11}$	BR				
44	2014 ON6	12.56718 (± 0.10342)	0.05668 (± 0.02323)	0.05312 (± 0.02360)	0.05423 (± 0.02367)	0.02946 (± 0.08508)	0.827 (± 0.147)	1.073 (± 0.150)	0.986 (± 0.483)	Centaur	21 $^{+2}_{-2}$	IR				
45	2010 SB41	8.65504 (± 0.07955)	0.03918 (± 0.10535)	-0.35459 (± 0.13533)	0.09692 (± 0.08870)	0.04525 (± 0.05385)	0.471 (± 0.134)	1.126 (± 0.113)	1.193 (± 0.102)	Resonant (3:2)	92 $^{+12}_{-10}$	IR				
46	2013 SF106*	5.31641 (± 0.24701)	0.37959 (± 0.24500)	0.14496 (± 0.21724)	0.22248 (± 0.20380)	0.42497 (± 0.25601)	0.491 (± 0.353)	0.877 (± 0.336)	1.251 (± 0.381)	Detached	335 $^{+132}_{-81}$	IR				
47	2016 SE56	7.50792 (± 0.07028)	0.24665 (± 0.08252)	0.02750 (± 0.11003)	0.40117 (± 0.14520)	0.07099 (± 0.08371)	0.497 (± 0.132)	1.144 (± 0.162)	1.058 (± 0.116)	SDO	197 $^{+31}_{-24}$	IR				
48	2010 RF188	5.75169 (± 0.10288)	0.04667 (± 0.32891)	0.29100 (± 0.14347)	-0.16908 (± 0.16117)	0.20370 (± 0.24326)	0.742 (± 0.126)	0.880 (± 0.125)	1.094 (± 0.149)	SDO	470 $^{+79}_{-61}$	IR				
49	2013 TQ187*	7.96942 (± 0.11787)	-0.36609 (± 0.14149)	-0.00996 (± 0.17522)	-0.32048 (± 0.14275)	-0.08442 (± 0.10704)	0.883 (± 0.201)	0.862 (± 0.198)	1.296 (± 0.162)	Resonant (7:4)	103 $^{+15}_{-13}$	IR				
50	2013 RM109*	7.73851 (± 0.17566)	-0.31635 (± 0.22828)	-0.05306 (± 0.14919)	-0.49404 (± 0.14717)	-0.42629 (± 0.15969)	0.885 (± 0.219)	0.984 (± 0.215)	1.353 (± 0.215)	Resonant (9:4)	115 $^{+20}_{-16}$	IR				
51	2006 SG415	8.38376 (± 0.10006)	-0.13023 (± 0.17507)	0.38107 (± 0.10280)	-0.05064 (± 0.13726)	-0.17049 (± 0.11802)	0.943 (± 0.119)	1.027 (± 0.129)	1.189 (± 0.128)	SDO	146 $^{+24}_{-19}$	IR				
52	2014 SK349	8.17786 (± 0.12311)	0.16852 (± 0.28659)	0.15217 (± 0.17162)	0.10560 (± 0.09901)	0.14135 (± 0.58645)	0.607 (± 0.156)	0.880 (± 0.143)	1.132 (± 0.761)	Resonant (3:2)	119 $^{+19}_{-15}$	IR				
53	2014 QL441	7.08887 (± 0.06869)	0.21788 (± 0.05537)	0.22335 (± 0.05166)	0.02583 (± 0.03960)	0.22688 (± 0.03351)	0.754 (± 0.092)	0.925 (± 0.083)	1.165 (± 0.082)	SDO	255 $^{+38}_{-29}$	IR				
54	2014 QS510*	8.52427 (± 0.08618)	-0.14293 (± 0.11708)	0.28089 (± 0.16209)	0.03059 (± 0.07873)	0.00367 (± 0.13703)	0.868 (± 0.134)	0.931 (± 0.109)	1.380 (± 0.139)	Resonant (7:2)	80 $^{+10}_{-8}$	IR				
55	2014 UD241*	7.59668 (± 0.09057)	0.29146 (± 0.15147)	0.04755 (± 0.15054)	0.00239 (± 0.16052)	-0.00851 (± 0.11953)	0.536 (± 0.150)	0.955 (± 0.156)	1.201 (± 0.127)	Resonant (5:3)	113 $^{+15}_{-12}$	IR				
56	2014 UP250*	6.77534 (± 0.20012)	0.04773 (± 0.30013)	0.10565 (± 0.12656)	0.08576 (± 0.15230)	-0.45206 (± 0.22593)	0.853 (± 0.217)	0.965 (± 0.226)	1.117 (± 0.220)	Resonant (7:3)	177 $^{+34}_{-27}$	IR				
57	2014 OD394	6.06076 (± 0.07262)	0.25957 (± 0.12571)	0.07364 (± 0.12415)	0.31568 (± 0.13230)	0.22842 (± 0.16208)	0.539 (± 0.113)	0.986 (± 0.107)	1.060 (± 0.128)	Resonant (9:5)	229 $^{+27}_{-23}$	IR				
58	2016 SP56	6.91744 (± 0.07657)	0.04823 (± 0.11071)	0.04328 (± 0.09797)	0.35095 (± 0.13948)	0.20107 (± 0.07518)	0.660 (± 0.111)	0.986 (± 0.127)	1.076 (± 0.097)	Resonant (19:9)	159 $^{+19}_{-16}$	IR				
59	2008 SO266	7.03613 (± 0.07555)	0.21294 (± 0.08021)	0.00246 (± 0.07305)	-0.05013 (± 0.07844)	0.06763 (± 0.09531)	0.722 (± 0.109)	1.005 (± 0.115)	1.256 (± 0.130)	Resonant (3:2)	207 $^{+27}_{-22}$	IR				
60	2014 OR394	7.83466 (± 0.06019)	0.10224 (± 0.10821)	0.22379 (± 0.10151)	0.04876 (± 0.15723)	0.09719 (± 0.06468)	0.724 (± 0.084)	1.009 (± 0.114)	1.332 (± 0.087)	SDO	179 $^{+26}_{-20}$	IR				
61	2013 TV158	7.01409 (± 0.04382)	0.17877 (± 0.04564)	0.13430 (± 0.03620)	0.12989 (± 0.03697)	0.15421 (± 0.02743)	0.721 (± 0.058)	1.018 (± 0.064)	1.196 (± 0.055)	Detached	162 $^{+39}_{-25}$	IR				
62	2013 SJ106*	7.25011 (± 0.07742)	0.09808 (± 0.09645)	0.14624 (± 0.07402)	0.06128 (± 0.07642)	0.14322 (± 0.13298)	0.588 (± 0.095)	1.024 (± 0.098)	1.348 (± 0.122)	Resonant (9:5)	134 $^{+16}_{-13}$	IR				
63	2014 SP363*	6.80930 (± 0.14508)	0.39107 (± 0.17155)	0.14206 (± 0.15268)	0.09505 (± 0.12932)	0.01666 (± 0.18247)	0.709 (± 0.197)	1.046 (± 0.189)	1.208 (± 0.229)	Resonant (3:1)	170 $^{+27}_{-22}$	IR				
64	2016 SG58	7.99395 (± 0.06520)	0.12398 (± 0.08480)	0.29567 (± 0.08021)	0.16460 (± 0.07137)	-0.15654 (± 0.08421)	0.918 (± 0.092)	1.056 (± 0.101)	1.073 (± 0.091)	SDO	174 $^{+25}_{-20}$	IR				
65	2014 QM441*	9.19004 (± 0.10748)	-0.14194 (± 0.12386)	0.06065 (± 0.07507)	0.11043 (± 0.05196)	-0.03523 (± 0.05158)	0.735 (± 0.131)	1.068 (± 0.121)	1.093 (± 0.121)	Resonant (3:2)	77 $^{+11}_{-9}$	IR				
66	2005 QU182	4.23740 (± 0.16935)	0.33052 (± 0.31043)	0.29559 (± 0.31541)	0.38298 (± 0.14802)	0.23680 (± 0.13276)	0.756 (± 0.242)	1.074 (± 0.195)	1.117 (± 0.192)	Detached	395 $^{+135}_{-100}$	IR				
67	2014 SK378*	8.85179 (± 0.09550)	0.17264 (± 0.06666)	0.14695 (± 0.07125)	0.22220 (± 0.07250)	0.13274 (± 0.09802)	0.724 (± 0.156)	1.104 (± 0.154)	1.206 (± 0.196)	SDO	112 $^{+19}_{-15}$	IR				
68	2003 QM91	7.14349 (± 0.04743)	0.17407 (± 0.08075)	0.10981 (± 0.08295)	0.06269 (± 0.07845)	0.08417 (± 0.13187)	0.811 (± 0.080)	1.105 (± 0.076)	1.274 (± 0.125)	Cold classical	163 $^{+12}_{-11}$	IR				
69	2014 VV39*	7.24348 (± 0.05767)	0.23724 (± 0.09338)	0.12951 (± 0.09042)	0.11731 (± 0.08847)	-0.02061 (± 0.10987)	0.769 (± 0.090)	1.117 (± 0.089)	1.377 (± 0.091)	Cold classical	154 $^{+12}_{-11}$	IR				
70	2013 SNI106*	7.43946 (± 0.05793)	0.02632 (± 0.11313)	0.14245 (± 0.08162)	0.18850 (± 0.10094)	-0.06302 (± 0.26905)	0.614 (± 0.086)	1.119 (± 0.087)	1.296 (± 0.198)	Resonant (7:4)	124 $^{+14}_{-11}$	IR				
71	2013 UT22*	7.61362 (± 0.08220)	0.44333 (± 0.08456)	0.25126 (± 0.07383)	0.25882 (± 0.10060)	-0.07212 (± 0.06793)	0.752 (± 0.113)	1.122 (± 0.134)	1.085 (± 0.103)	Resonant (5:3)	118 $^{+15}_{-12}$	IR				
72	2015 TW361	7.84039 (± 0.06708)	0.08134 (± 0.09436)	-0.00967 (± 0.11180)	0.15226 (± 0.11546)	0.00537 (± 0.10658)	0.673 (± 0.106)	1.128 (± 0.130)	1.146 (± 0.119)	Detached	109 $^{+28}_{-18}$	IR				

Table 4 – *continued*

Number	Object	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Dyn. class	Diam. (km)	This work	[1]	[2]	[3]	[4]
73	2014 QZ510*	8.42014 (± 0.10453)	-0.00437 (± 0.08327)	0.12132 (± 0.08542)	0.22111 (± 0.09666)	-0.05746 (± 0.07594)	0.851 (± 0.150)	1.134 (± 0.151)	0.994 (± 0.137)	Resonant (3:2)	113 $^{+16}$ ₋₁₃	IR				
74	2005 TB190	5.02302 (± 0.04387)	0.28297 (± 0.08237)	0.18411 (± 0.08585)	0.23048 (± 0.09003)	0.10647 (± 0.13469)	0.809 (± 0.088)	1.148 (± 0.073)	1.212 (± 0.101)	Detached	414 $^{+102}$ ₋₆₄	IR				IR
75	1999 RB216	7.84352 (± 0.07891)	0.07828 (± 0.10738)	0.15992 (± 0.09904)	0.14231 (± 0.08502)	0.22330 (± 0.06836)	0.890 (± 0.108)	1.150 (± 0.101)	1.301 (± 0.100)	Resonant (2:1)	109 $^{+13}$ ₋₁₁	IR	IR, BR			BR IR, BR
76	2014 WDS536*	8.33849 (± 0.14872)	0.08464 (± 0.12899)	0.08495 (± 0.07618)	0.23418 (± 0.07077)	0.04106 (± 0.09456)	0.635 (± 0.173)	1.159 (± 0.174)	1.049 (± 0.191)	Resonant (3:2)	111 $^{+19}$ ₋₁₅	IR				
77	2013 RC109*	8.78482 (± 0.11312)	-0.10835 (± 0.13707)	0.00419 (± 0.19297)	0.31933 (± 0.17571)	0.09193 (± 0.25023)	0.706 (± 0.193)	1.183 (± 0.214)	1.042 (± 0.378)	Resonant (3:2)	92 $^{+12}$ ₋₁₂	IR				
78	2014 QU441*	8.41596 (± 0.10709)	-0.00952 (± 0.09712)	0.02195 (± 0.06251)	0.25896 (± 0.06051)	-0.05211 (± 0.07384)	0.613 (± 0.127)	1.213 (± 0.125)	1.123 (± 0.132)	Hot classical	110 $^{+18}$ ₋₁₄	IR				
79	2013 SK106	7.45439 (± 0.08728)	0.08580 (± 0.11164)	0.00155 (± 0.10272)	0.45042 (± 0.10697)	0.10998 (± 0.15457)	0.757 (± 0.121)	1.221 (± 0.113)	1.181 (± 0.146)	Resonant (9:5)	127 $^{+16}$ ₋₁₃	IR				
80	2014 SSS373*	7.02399 (± 0.20099)	0.49994 (± 0.20732)	0.38971 (± 0.20718)	0.10494 (± 0.25439)	0.20217 (± 0.20397)	0.936 (± 0.283)	1.036 (± 0.310)	1.503 (± 0.266)	Resonant (8:3)	161 $^{+32}$ ₋₂₅	RR				
81	2014 UC225*	8.45318 (± 0.14340)	-0.05789 (± 0.31379)	0.09379 (± 0.16612)	-0.00608 (± 0.13236)	0.14367 (± 0.17069)	0.961 (± 0.172)	1.290 (± 0.183)	1.507 (± 0.254)	Resonant (5:4)	84 $^{+13}$ ₋₁₁	RR				
82	2013 TM187*	9.01161 (± 0.09293)	-0.03112 (± 0.09615)	0.12577 (± 0.08818)	0.33943 (± 0.08677)	0.14368 (± 0.12924)	1.019 (± 0.120)	1.141 (± 0.133)	1.574 (± 0.189)	Resonant (4:3)	66 $^{+8}$ ₋₇	RR				
83	1999 OX3	7.90379 (± 0.09565)	0.11721 (± 0.06200)	0.11778 (± 0.07767)	0.12010 (± 0.05547)	0.07600 (± 0.09578)	1.027 (± 0.135)	1.443 (± 0.164)	1.570 (± 0.176)	SDO	155 $^{+26}$ ₋₂₂	RR	RR	RR	RR	RR
84	2012 WF37	8.97819 (± 0.10971)	0.21865 (± 0.11352)	0.10666 (± 0.11046)	-0.13733 (± 0.13153)	0.20115 (± 0.06953)	0.952 (± 0.141)	1.073 (± 0.181)	1.643 (± 0.130)	Resonant (3:2)	89 $^{+13}$ ₋₁₁	RR				
85	2014 QP441	9.91427 (± 0.07407)	-0.12757 (± 0.06009)	0.20392 (± 0.04570)	0.18069 (± 0.03319)	0.19331 (± 0.04637)	0.929 (± 0.093)	1.105 (± 0.085)	1.520 (± 0.094)	SDO	72 $^{+11}$ ₋₈	RR				
86	2014 PM82	7.50616 (± 0.05174)	0.08940 (± 0.07016)	0.27837 (± 0.09126)	-0.00244 (± 0.09914)	0.09846 (± 0.09862)	1.066 (± 0.087)	1.188 (± 0.098)	1.443 (± 0.110)	Detached	139 $^{+35}$ ₋₂₂	RR				
87	2010 PC88	8.37575 (± 0.13297)	0.18560 (± 0.10356)	0.18578 (± 0.09313)	0.10124 (± 0.11225)	0.10442 (± 0.08760)	0.913 (± 0.185)	1.190 (± 0.181)	1.467 (± 0.171)	Centaur	147 $^{+20}$ ₋₁₇	RR				
88	2015 TP362	7.66003 (± 0.08789)	0.39502 (± 0.09650)	0.42974 (± 0.08860)	0.10009 (± 0.12963)	0.20468 (± 0.14161)	1.005 (± 0.110)	1.198 (± 0.143)	1.641 (± 0.140)	Detached	128 $^{+35}$ ₋₂₂	RR				
89	2010 RO64	5.80413 (± 0.12786)	0.28007 (± 0.14396)	0.24748 (± 0.11718)	0.19143 (± 0.17015)	0.24713 (± 0.18936)	0.897 (± 0.165)	1.222 (± 0.195)	1.467 (± 0.197)	Hot classical	390 $^{+68}$ ₋₅₃	RR				
90	2011 SO277	8.63262 (± 0.12013)	-0.10799 (± 0.11696)	0.08280 (± 0.12396)	0.00316 (± 0.09721)	-0.01310 (± 0.06807)	1.059 (± 0.181)	1.256 (± 0.174)	1.450 (± 0.148)	SDO	133 $^{+24}$ ₋₁₉	RR				
91	2014 QN441*	7.58242 (± 0.09016)	0.05794 (± 0.06989)	0.10772 (± 0.05485)	0.01858 (± 0.05602)	0.02517 (± 0.03993)	1.019 (± 0.110)	1.282 (± 0.110)	1.529 (± 0.102)	SDO	214 $^{+34}$ ₋₂₆	RR				
92	2014 XY40*	5.91629 (± 0.22480)	-0.18751 (± 0.24255)	0.02813 (± 0.15334)	0.19122 (± 0.15498)	0.36161 (± 0.18278)	0.967 (± 0.262)	1.287 (± 0.259)	1.525 (± 0.278)	Hot classical	376 $^{+87}$ ₋₆₇	RR				
93	2012 VS113*	8.07284 (± 0.07740)	-0.21159 (± 0.06725)	0.03310 (± 0.05917)	0.10683 (± 0.05374)	0.25136 (± 0.06497)	1.029 (± 0.102)	1.319 (± 0.103)	1.678 (± 0.118)	Resonant (5:2)	101 $^{+12}$ ₋₁₀	RR				
94	2013 RF109	7.56425 (± 0.05301)	-0.06597 (± 0.10076)	0.02492 (± 0.06690)	0.04009 (± 0.09677)	0.07059 (± 0.12774)	1.022 (± 0.072)	1.457 (± 0.078)	1.619 (± 0.123)	Hot classical	178 $^{+23}$ ₋₁₈	RR				
95	2009 HHH36	11.13146 (± 0.18318)	0.14264 (± 0.07521)	0.02633 (± 0.07417)	0.00121 (± 0.07150)	0.05624 (± 0.04031)	0.202 (± 0.259)	0.387 (± 0.245)	0.654 (± 0.208)	Centaur	30 $^{+8}$ ₋₆	BB				
96	2007 UM126	10.10765 (± 0.28067)	0.28927 (± 0.10507)	0.05857 (± 0.13264)	0.03437 (± 0.11227)	-0.11873 (± 0.09047)	-0.096 (± 0.467)	0.041 (± 0.409)	-0.418 (± 0.380)	Centaur	53 $^{+13}$ ₋₁₀	BB	BR, BB	BB, BR		
97	2013 TU187*	8.28484 (± 0.11791)	0.06236 (± 0.13017)	0.16660 (± 0.10203)	-0.27424 (± 0.11147)	-0.19154 (± 0.07953)	0.671 (± 0.163)	0.441 (± 0.181)	0.946 (± 0.149)	Resonant (3:2)	115 $^{+18}$ ₋₁₄	BB				
98	2005 SA278	6.50807 (± 0.07630)	0.40253 (± 0.09222)	0.24743 (± 0.12244)	0.32233 (± 0.10971)	0.07177 (± 0.11854)	0.346 (± 0.138)	0.743 (± 0.131)	0.680 (± 0.112)	SDO	302 $^{+48}$ ₋₃₇	BB				
99	2014 VW37*	7.25938 (± 0.21646)	0.25285 (± 0.15995)	0.04878 (± 0.20274)	0.39309 (± 0.19429)	-0.26236 (± 0.19671)	0.355 (± 0.348)	0.958 (± 0.338)	0.202 (± 0.342)	Resonant (5:3)	127 $^{+28}$ ₋₂₂	BB				
100	2010 RF64	5.77010 (± 0.15879)	0.13619 (± 0.13357)	0.18416 (± 0.12298)	0.31867 (± 0.16879)	0.10410 (± 0.10467)	0.546 (± 0.220)	0.783 (± 0.270)	0.481 (± 0.203)	SDO	444 $^{+92}$ ₋₇₀	BB				
101	2014 SR303	11.90960 (± 0.14104)	0.07776 (± 0.06546)	0.01968 (± 0.03938)	0.00346 (± 0.04986)	0.19640 (± 0.08431)	0.440 (± 0.182)	0.675 (± 0.230)	1.209 (± 0.255)	Centaur	26 $^{+4}$ ₋₃	BR				
102	2010 RD188	6.34221 (± 0.15417)	-0.03667 (± 0.13220)	0.08208 (± 0.13344)	-0.00417 (± 0.24511)	-0.11941 (± 0.18924)	0.682 (± 0.213)	0.711 (± 0.342)	0.690 (± 0.280)	Hot classical	290 $^{+56}$ ₋₄₄	BR				
103	2013 TD172*	7.44839 (± 0.10075)	-0.12368 (± 0.20436)	-0.07411 (± 0.16785)	0.26828 (± 0.13348)	-0.05238 (± 0.14042)	0.381 (± 0.161)	1.078 (± 0.153)	0.942 (± 0.161)	SDO	197 $^{+34}$ ₋₂₆	BR				
104	2016 US94*	8.16462 (± 0.15059)	-0.05832 (± 0.11160)	-0.10245 (± 0.13747)	0.24318 (± 0.10329)	-0.06073 (± 0.14338)	0.415 (± 0.252)	1.043 (± 0.202)	0.982 (± 0.230)	Resonant (3:2)	114 $^{+17}$ ₋₁₇	BR				
105	2004 TY364	4.87563 (± 0.12971)	0.26776 (± 0.15074)	0.29450 (± 0.10991)	-0.11842 (± 0.32482)	-0.16583 (± 0.39106)	0.872 (± 0.165)	0.862 (± 0.261)	0.962 (± 0.322)	Hot classical	527 $^{+82}$ ₋₇₆	BR	IR, RR, BR			
106	2013 TC188	7.64033 (± 0.09910)	0.13430 (± 0.14497)	0.17810 (± 0.08920)	-0.03183 (± 0.14201)	0.16121 (± 0.10944)	0.542 (± 0.121)	0.719 (± 0.158)	1.124 (± 0.144)	Resonant (9:5)	111 $^{+15}$ ₋₁₂	BR				
107	2014 QR441*	6.99793 (± 0.16296)	0.27863 (± 0.14752)	0.33627 (± 0.14317)	0.36988 (± 0.14228)	-0.07925 (± 0.11648)	0.610 (± 0.236)	0.865 (± 0.233)	0.467 (± 0.212)	Detached	159 $^{+52}$ ₋₃₃	BR				
108	2015 BP519*	4.77642 (± 0.47824)	0.43731 (± 0.50491)	0.20154 (± 0.34963)	0.04958 (± 0.41804)	-0.27483 (± 0.69193)	0.653 (± 0.588)	0.781 (± 0.622)	0.608 (± 0.846)	SDO	719 $^{+309}$ ₋₂₀₈	BR				
109	2008 UA332	6.70766 (± 0.14577)	0.28098 (± 0.17624)	-0.04997 (± 0.21521)	-0.08509 (± 0.17405)	0.28059 (± 0.28039)	0.349 (± 0.245)	0.581 (± 0.217)	1.235 (± 0.271)	Detached	171 $^{+55}$ ₋₃₅	BR				

Table 4 – continued

Number	Object	H_g	β_g	β_r	β_i	β_z	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$	Dyn. class	Diam. (km)	This work	[1]	[2]	[3]	[4]
110	2015 VJ181*	7.54155 (± 0.24512)	0.12861 (± 0.18374)	-0.01029 (± 0.21047)	0.33610 (± 0.15660)	0.04686 (± 0.19278)	0.438 (± 0.373)	1.100 (± 0.312)	0.840 (± 0.346)	SDO	191 $^{+53}$ -39	BR				
111	2015 RU245	10.23198 (± 0.06368)	0.05550 (± 0.05182)	0.01728 (± 0.06598)	0.19885 (± 0.07163)	0.07239 (± 0.06434)	0.679 (± 0.119)	1.327 (± 0.117)	1.321 (± 0.111)	SDO	59 $^{+9}$ -7	IR				
112	2012 VR113*	6.88142 (± 0.08057)	0.33389 (± 0.08797)	0.19725 (± 0.06657)	0.27807 (± 0.06483)	0.39552 (± 0.06026)	0.594 (± 0.101)	0.773 (± 0.104)	1.198 (± 0.101)	Resonant (2:1)	159 $^{+19}$ -16	IR				
113	2013 VM46*	8.87923 (± 0.21163)	0.04615 (± 0.19270)	-0.03704 (± 0.18402)	0.41799 (± 0.17639)	-0.13874 (± 0.14727)	0.319 (± 0.300)	1.174 (± 0.291)	1.007 (± 0.230)	SDO	101 $^{+25}$ -18	IR				
114	2005 RN43	4.22843 (± 0.08305)	0.16590 (± 0.15250)	-0.38141 (± 0.20488)	0.19205 (± 0.19586)	0.29326 (± 0.18347)	0.415 (± 0.156)	1.109 (± 0.138)	1.367 (± 0.198)	Hot classical	639 $^{+101}$ -101	IR				IR
115	2011 SW281	7.01408 (± 0.06653)	0.45723 (± 0.11308)	0.09904 (± 0.13025)	-0.34001 (± 0.14568)	0.20054 (± 0.11791)	0.715 (± 0.115)	0.747 (± 0.123)	1.374 (± 0.103)	Cold classical	169 $^{+13}$ -9	IR				
116	2013 SMI02*	7.96137 (± 0.05917)	-0.20272 (± 0.08716)	0.20635 (± 0.07829)	-0.26886 (± 0.10549)	0.03442 (± 0.16347)	0.823 (± 0.089)	0.809 (± 0.100)	1.242 (± 0.126)	Resonant (7:3)	102 $^{+11}$ -9	IR				
117	2014 XC48*	8.03891 (± 0.12644)	0.10661 (± 0.12469)	0.00977 (± 0.11548)	0.13238 (± 0.16405)	-0.38598 (± 0.22224)	0.906 (± 0.173)	1.329 (± 0.218)	0.972 (± 0.273)	SDO	170 $^{+34}$ -20	IR				
118	2014 QX510*	7.84977 (± 0.05919)	0.24343 (± 0.09737)	0.40639 (± 0.08268)	0.13567 (± 0.08815)	-0.22804 (± 0.11309)	0.979 (± 0.076)	1.253 (± 0.081)	1.110 (± 0.108)	Hot classical	155 $^{+21}$ -16	IR				
119	2013 RK109*	7.84696 (± 0.09301)	-0.23249 (± 0.12784)	0.22869 (± 0.09491)	-0.04375 (± 0.09845)	-0.28238 (± 0.10332)	0.938 (± 0.125)	0.995 (± 0.130)	0.915 (± 0.131)	SDO	186 $^{+23}$ -23	IR				
120	2013 TH172*	8.43834 (± 0.09793)	0.12432 (± 0.10832)	-0.18675 (± 0.09085)	0.16780 (± 0.09010)	0.32608 (± 0.18273)	0.549 (± 0.123)	1.269 (± 0.134)	1.525 (± 0.221)	Resonant (5:3)	77 $^{+10}$ -8	RR				
121	2014 QX510*	8.42844 (± 0.25049)	0.18405 (± 0.20338)	0.07023 (± 0.08794)	0.12151 (± 0.08220)	0.42011 (± 0.16101)	0.629 (± 0.269)	1.148 (± 0.267)	1.738 (± 0.314)	SDO	133 $^{+34}$ -26	RR				
122	2006 QQ180	7.18241 (± 0.17232)	0.33306 (± 0.20829)	0.09405 (± 0.11516)	0.01374 (± 0.08035)	0.27839 (± 0.07250)	0.716 (± 0.191)	1.083 (± 0.187)	1.708 (± 0.188)	Resonant (5:3)	143 $^{+25}$ -20	RR				
123	2013 SJ102*	8.15772 (± 0.06189)	0.21658 (± 0.07520)	0.09055 (± 0.06163)	0.19530 (± 0.07239)	0.19981 (± 0.11375)	0.788 (± 0.087)	1.259 (± 0.091)	1.457 (± 0.139)	Resonant (7:4)	93 $^{+10}$ -9	RR				
124	2014 OQ394	7.73271 (± 0.12962)	-0.17927 (± 0.15120)	0.12493 (± 0.07998)	0.08763 (± 0.07970)	0.04666 (± 0.09162)	0.973 (± 0.147)	1.156 (± 0.148)	1.347 (± 0.150)	Resonant (3:1)	117 $^{+17}$ -14	RR				
125	2012 VU113*	8.32495 (± 0.08192)	0.13496 (± 0.07322)	0.03201 (± 0.08600)	0.39899 (± 0.06626)	0.29868 (± 0.06107)	1.031 (± 0.107)	0.992 (± 0.117)	1.402 (± 0.101)	Resonant (3:2)	122 $^{+16}$ -13	RR				
126	2003 QW90	6.03464 (± 0.15597)	-0.14490 (± 0.21634)	0.16077 (± 0.25583)	-0.02442 (± 0.22887)	0.44590 (± 0.21435)	1.035 (± 0.225)	1.584 (± 0.248)	1.973 (± 0.253)	Resonant (7:4)	361 $^{+97}$ -72	RR				
127	2015 RT245	7.77257 (± 0.09257)	-0.13295 (± 0.13054)	0.37514 (± 0.10633)	0.10991 (± 0.12076)	0.24832 (± 0.10972)	1.076 (± 0.142)	1.600 (± 0.128)	1.663 (± 0.132)	Resonant (9:5)	117 $^{+15}$ -13	RR				
128	2012 TC324	7.58670 (± 0.07077)	-0.01449 (± 0.08219)	0.33912 (± 0.12069)	0.17521 (± 0.08544)	-0.20961 (± 0.08168)	1.187 (± 0.114)	1.859 (± 0.164)	1.638 (± 0.114)	Resonant (5:3)	131 $^{+16}$ -13	RR				
129	2002 PA149	7.14549 (± 0.07824)	-0.01780 (± 0.09478)	0.22672 (± 0.12006)	0.43168 (± 0.24248)	-0.25049 (± 0.12383)	1.230 (± 0.248)	1.261 (± 0.128)	1.117 (± 0.129)	Resonant (7:4)	162 $^{+23}$ -19	RR				
130	2005 PU21	7.37677 (± 0.05876)	-0.02808 (± 0.07140)	0.30808 (± 0.09069)	0.25046 (± 0.08137)	0.09846 (± 0.13428)	1.239 (± 0.089)	1.613 (± 0.092)	1.703 (± 0.107)	SDO	246 $^{+35}$ -27	RR				
131	2013 RR98*	8.09384 (± 0.27116)	0.00245 (± 0.21748)	0.20928 (± 0.16832)	0.26246 (± 0.25017)	0.15989 (± 0.20194)	1.297 (± 0.411)	1.481 (± 0.344)	1.759 (± 0.388)	SDO	179 $^{+51}$ -37	RR				
132	2014 RH70*	8.57994 (± 0.43915)	-0.34780 (± 0.32519)	0.15094 (± 0.26758)	0.26370 (± 0.24346)	0.32660 (± 0.13929)	1.340 (± 0.198)	1.509 (± 0.192)	1.852 (± 0.195)	SDO	144 $^{+57}$ -39	RR				
133	2013 LY171*	8.41303 (± 0.17785)	-0.08261 (± 0.31527)	0.04556 (± 0.08066)	0.31421 (± 0.11230)	0.06254 (± 0.08523)	1.340 (± 0.198)	1.591 (± 0.099)	1.852 (± 0.195)	Resonant (3:2)	125 $^{+23}$ -18	RR				
134	2013 WG114*	7.74538 (± 0.06968)	-0.08350 (± 0.11049)	0.29646 (± 0.08426)	0.45620 (± 0.14208)	0.10434 (± 0.09891)	1.347 (± 0.146)	1.591 (± 0.099)	1.670 (± 0.111)	Resonant (9:5)	126 $^{+15}$ -20	RR				
135	2015 TK363	8.21054 (± 0.12384)	-0.32897 (± 0.19124)	-0.02689 (± 0.10371)	0.31576 (± 0.11834)	-0.34879 (± 0.13633)	1.480 (± 0.164)	1.538 (± 0.152)	1.604 (± 0.182)	Hot classical	145 $^{+25}$ -20	RR				
136	2015 TJ363	7.57186 (± 0.09089)	-0.15699 (± 0.09980)	0.06295 (± 0.09142)	0.10119 (± 0.10154)	0.23573 (± 0.11220)	0.900 (± 0.116)	1.162 (± 0.123)	1.800 (± 0.134)	Hot classical	173 $^{+26}$ -21	RR				
137	2013 RO109*	7.52846 (± 0.07390)	0.13707 (± 0.10428)	0.43767 (± 0.09636)	0.15893 (± 0.07503)	0.39126 (± 0.09408)	1.144 (± 0.115)	1.202 (± 0.093)	1.715 (± 0.108)	Resonant (9:5)	133 $^{+16}$ -13	RR				
138	2014 VC41*	8.73171 (± 0.18004)	0.06211 (± 0.10961)	0.12607 (± 0.12362)	0.26359 (± 0.12805)	0.37510 (± 0.1819)	0.779 (± 0.279)	1.218 (± 0.276)	1.620 (± 0.261)	SDO	120 $^{+27}$ -20	RR				
139	2001 QO297	7.36105 (± 0.05795)	0.04855 (± 0.08874)	0.18791 (± 0.11222)	0.11284 (± 0.08301)	0.46892 (± 0.11125)	0.939 (± 0.096)	1.313 (± 0.083)	1.730 (± 0.098)	Cold classical	151 $^{+12}$ -11	RR				
140	2013 RE109*	7.18544 (± 0.07823)	0.00182 (± 0.12441)	-0.03549 (± 0.15556)	0.23395 (± 0.17616)	0.26907 (± 0.09862)	0.931 (± 0.130)	1.410 (± 0.143)	1.746 (± 0.104)	Resonant (7:4)	149 $^{+19}$ -15	RR				
141	2013 RP109*	7.58177 (± 0.06829)	0.00285 (± 0.10936)	-0.07386 (± 0.09479)	0.25922 (± 0.08660)	0.13102 (± 0.09534)	0.841 (± 0.107)	1.473 (± 0.097)	1.584 (± 0.105)	Resonant (11:6)	122 $^{+14}$ -12	RR				
142	2003 QC112	9.99768 (± 0.11867)	-0.16660 (± 0.10936)	0.15659 (± 0.09410)	0.101817 (± 0.10714)	0.07303 (± 0.13321)	1.167 (± 0.169)	1.478 (± 0.177)	1.864 (± 0.191)	Centaur	73 $^{+9}$ -8	RR				
143	2013 TJ159*	7.96805 (± 0.07000)	-0.05751 (± 0.08132)	-0.17781 (± 0.07195)	0.11357 (± 0.05653)	0.12205 (± 0.11111)	0.905 (± 0.095)	1.499 (± 0.087)	1.835 (± 0.117)	SDO	175 $^{+26}$ -20	RR				
144	2013 VX30*	9.51218 (± 0.06394)	-0.06209 (± 0.05767)	0.02875 (± 0.04816)	0.06744 (± 0.04833)	-0.01428 (± 0.03865)	1.112 (± 0.088)	1.529 (± 0.085)	1.810 (± 0.082)	SDO	90 $^{+13}$ -10	RR				

Notes: Column 1: sequential numbering. From 1 to 94: defining objects as explained in the text. From 95 to 144: remaining ones; column 2: object ID; column 3: absolute magnitudes in the g band and respective uncertainties; columns 4–7: phase slopes and uncertainties in the band g , r , i , and z bands, respectively; columns 8–10: colours from absolute magnitudes, and respective uncertainties, used to classify the objects into taxonomy; column 11: dynamical class as provided by SkyBoT; column 12: estimated diameters and respective uncertainties; column 13: taxonomic classification obtained in this work; columns 14–17: taxonomy for common objects found in the literature [1]: Fulchignoni et al. (2008), [2]: Perma et al. (2010), [3]: Barucci et al. (2005), and [4]: Belskaya et al. (2015). Asterisks represent those objects with initial reported observation by DECam (see also Bernardinelli et al. 2022). The discovery credit is given when the object is numbered, as defined by the Minor Planet Center (MPC, see https://www.minorplanetcenter.net/db_search).

magnitude as a function of the phase angle. Among others, the suitability of a simpler function are due because of the small range of phase angles that distant objects are seen from the ground. Other authors (e.g. Sheppard & Jewitt 2002; Ofek 2012; Ayala-Loera et al. 2018) also opted for a linear model when studying more distant objects (see also discussion in Santos-Sanz et al. 2009).

4.1.1 Diameter and albedo

Here, it is interesting to estimate the relative error between albedo and diameter, since it quantifies the importance of both accurate magnitudes and diameters, such as those obtained from DES and stellar occultations, respectively. In fact, the latter can determine, with kilometre accuracy, shape, and dimension projected onto the sky plane of the occulting body (see, for instance, Ortiz et al. 2020; Assafin et al. 2023; Pereira et al. 2024).

It can be demonstrated that (e.g. Harris & Harris 1997; Russell 1916)²

$$D = \frac{2 \text{ au} \times 10^{0.2(m_{\odot} - H)}}{\sqrt{\rho}}, \quad (3)$$

where D is the equivalent diameter³ of the body in km, m_{\odot} is the apparent magnitude of the Sun in a given band, H is the absolute magnitude of the body in the same band, ρ is the geometric albedo also in the same band, and au is the astronomical unit in km (149 597 870.7 km). If we consider the band V and the apparent magnitude of the Sun in it ($m_{\odot} = -26.77$), we arrive at the well-known relation (D in km).

$$D = \frac{1324.206 \times 10^{-0.2H_V}}{\sqrt{\rho_V}}. \quad (4)$$

A simple hypothesis about equation (4) gives us very relevant information. The assumption is that H_V is accurate enough so that σ_{H_V} can be neglected when compared to σ_{ρ_V} and σ_D . In this case, the relationship between the uncertainty in the albedo and that in the diameter is given by

$$\frac{\sigma_{\rho_V}}{\rho_V} = 2 \frac{\sigma_D}{D}. \quad (5)$$

In other words, a given relative uncertainty in the diameter leads to twice that value to the relative uncertainty in albedo.

4.2 H_f , β_f , and uncertainties

In order to obtain values for absolute magnitudes and slopes, in addition to realistic uncertainties to them, effects due to an unknown rotation has to be taken into consideration. In this context, we adopted a similar procedure to the one describe in works like Ayala-Loera et al. (2018) and Pan et al. (2022). A brief description of such a procedure is given next:

(i) For each object, and at a given filter, we determine the respective reduced magnitudes (see equation 2).

(ii) To each reduced magnitude, the value of the function $y(\phi) = A \times \sin(\phi)$ is determined for ϕ randomly chosen in the interval $[0:2\pi[$, with $A = 0.15$ (see, for instance, Lacerda & Luu 2006; Duffard et al. 2009), and added to the reduced magnitude (i.e. a

displacement along the y -axis). In this paper, therefore, we are adopting a sine wave as a model to the shape of an unknown rotational light curve to the objects. The most frequent values in such a distribution are clearly those close to the maximum/minimum of the sine wave (see, for instance, Peixinho, Lacerda & Kokotanekova 2023).

(iii) A random value from the interval $[-\sigma; +\sigma]$ is added to the previous one, where σ is the uncertainty of the observed magnitude (m_f) as provided by the DES catalogue.

(iv) An absolute magnitude H_f and a slope β_f , along with their uncertainties, are determined by weighted least squares and error propagation.

(v) Steps two and three are repeated 20 000 times.

(vi) The final values H_f and β_f of each object is determined by the mean of the 20 000 values. The final uncertainties of the absolute magnitudes and slopes are given by the standard deviations of the respective 20 000 measurements.

The adopted value of 0.3 mag to the amplitude of the sinusoidal distribution is a conservative one based on the typical (0.22 mag) of the rotational amplitudes of TNOs and Centaurs listed in Sheppard, Lacerda & Ortiz (2008).

The determination of colours from the steps listed above results from a specific scenario, i.e. unfavourable conditions to directly relate magnitudes taken in different filters. Schemel & Brown (2021) present a similar scenario but take a different approach (see also Bernardinelli et al. 2023). However, both discussions involve the use of colours from absolute magnitudes and the consequent determination of phase slopes, taking into account the importance of considering the effects of an unknown rotational light curve on the observed magnitudes.

In brief, Schemel & Brown (2021) derive the full probability distribution P of observing an apparent magnitude m in a particular band given a true magnitude m_p and its (assumed Gaussian) uncertainty σ . The peak-to-peak variation of an unknown rotational light curve, assumed to have a sinusoidal shape, is also modelled in P . From it, and considering the $H-G$ phase function by Bowell et al. (1989), Schemel & Brown (2021) derive colour, phase parameter, absolute magnitude, and amplitude of a rotational light curve for 1000 Jupiter Trojans.

Also, Schemel & Brown (2021) report a comparison between their own amplitudes and those from different sources. Although a general broad consistency, well-measured rotational amplitudes from the *Kepler Space Telescope* data are typically 50 per cent larger than theirs. Those authors believe that, from further simulations, their amplitudes should be thought as the smaller of a light curve with two amplitudes.

Our procedure, considering the phase function it adopts, saves one variable with respect to Schemel & Brown (2021), namely, the rotational amplitude of the object. As mentioned before, we adopted the value of 0.3 mag instead of determining an amplitude for each object. The determined absolute magnitudes and slopes should not be affected by this under the reasonable hypothesis that rotational phase and observation date are not correlated. We opted for this because of the low number of observations – typically, 3 to 8 – in each band available to most of the objects presented here. This simpler procedure provides uncertainties that tend to be larger than those that would have been obtained if we had adopted the full probability distribution P from Schemel & Brown (2021). The reliability of the measurements obtained here and their respective uncertainties can be inferred from the results presented later in the text and from comparisons with the literature.

²See also <https://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2016/08/Jackpot.pdf>, section 4.2.

³Equivalent diameter is the diameter of a sphere with the same surface area of the object.

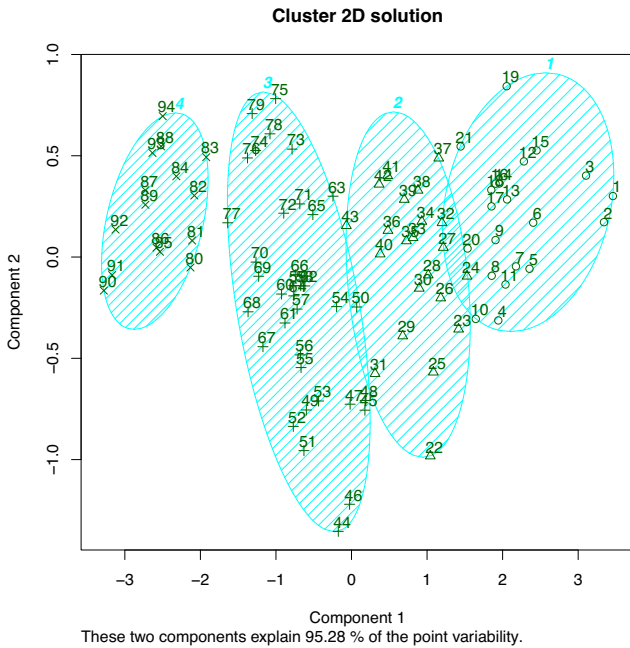


Figure 1. Clusters obtained with PAM. The axes in principal components are just a comfortable way to present the clusters and they do not participate in their determination. The principal components are derived from colours.

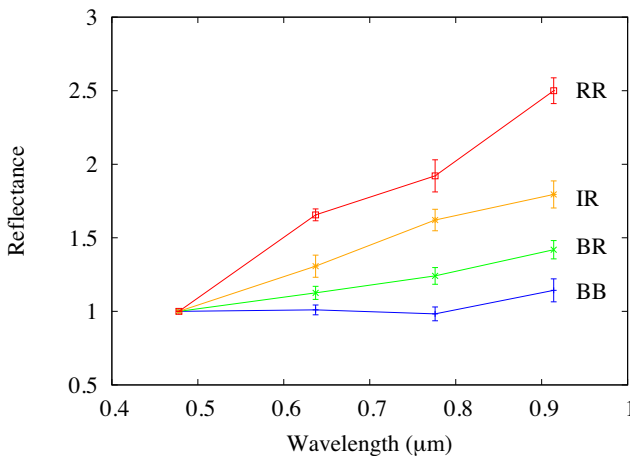


Figure 2. Average reflectance in each taxonomic group normalized in g band. Number of defining elements in each group is 21 (BB), 22 (BR), 36 (IR), and 15 (RR), see also Table 4. Error bars length is 1σ .

4.3 Clustering algorithm

The segregation of objects into four taxonomic classes, following Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008), requires a clustering algorithm. The algorithm PAM – Partition Around Medoids (see Kaufman & Rousseeuw 2009, for more details) – is chosen to cluster our TNOs and Centaurs from their colours. Here, uncertainties in the colours were not used and the elimination of outliers to determine the clusters’ boundaries were made iteratively and described later in the text.

Given an observational data set, PAM aims at finding k medoids in it. Medoids are representative objects of each cluster in such a way that the sum of distances given by a previously chosen metric, to all the objects in the cluster, is minimal (i.e. if any of the medoids

is replaced by another data point then the minimal sum of distances is violated). Also note that a medoid is always a member of the data set (which is not always true if we choose a point that is not representative of the cluster’s barycentre).

Here, it is important to highlight that this work does not intend to define any new taxonomy, but to present a classification for TNOs and Centaurs that is coherent with that already existing in the literature. As a consequence, we set $k = 4$. As a sanity check, the determination of the optimal value of k with the help of PAM, using three colours (the same number of colours we have in this work) from a set of 67 objects in Fulchignoni et al. (2008), returned $k = 4$.

It should be also stressed that the numerical procedure to segregate TNOs and Centaurs into groups used by works like Barucci et al. (2005), Fulchignoni et al. (2008), and Perna et al. (2010) is the G mode (see Fulchignoni et al. 2000). This method segregates a set of N elements into N_c clusters through the V variables that describes each of the elements. It is assumed that each variable in each cluster follows a Gaussian distribution. The method is unsupervised but the user has to define a critical parameter (confidence level) q . The larger the value of q , the more general is the classification (see Gavrilshin, Coradini & Cerroni 1992; Fulchignoni et al. 2000; Hasselmann, Carvano & Lazzaro 2013). PAM, however, is ready to use and to produce useful plots in a simple way from the statistical package R (R Core Team 2021). In addition, it is also expected that the description of general physical characteristics of the surfaces of small bodies be strongly dependent on their intrinsic features (like colours) and not on the algorithm to group them.

In this way, we started with a list of 217 TNOs and Centaurs with absolute magnitudes in all $griz$ bands. However, the determination of clusters is made after some extra filtering whose intervals, although somewhat arbitrary, aim at keeping a large number of objects while avoiding the presence of interlopers in the clustering process.

First, only objects whose absolute magnitudes in g , r , i , and z are used (they all have, at least, three measurements in each band). Second, any object whose $H_g - H_r$, $H_g - H_i$ or $H_g - H_z$ colours are outside the interval $[-2.5, +2.5]$ and whose slopes in any of the four bands are outside the interval $[-0.5, +0.5]$ are eliminated. The final step comes from the clustering process with PAM adopting, as mentioned earlier, $k = 4$ (four clusters).

In fact, colours and phase slopes, as shown later in the text, have different values in different taxonomic classes. Therefore, filtering based on mean and standard deviation of the full set may lead to systematic eliminations of the border representatives in extreme (bluest and reddest) classes.

The colour interval is wide and includes 95 percent of the unfiltered sample, as values outside its limits are not frequent (see, for instance, Ofek 2012; Pike et al. 2017; Schwamb et al. 2019). These works either have their colours in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) or scale their photometry to it. Note that the DES filters are similar to those of the SDSS (Morganson et al. 2018), so our comparison is generally valid. Conversions from DES to SDSS colours can be found in Carruba et al. (2024).

The slope interval is more restrictive (represents 78 per cent of the sample) and privileges mainly the inclusion of negative slopes. Its upper limit can be considered large enough from different works in the literature (see, for instance and for a broader discussion on phase slopes, Ofek 2012; Ayala-Loera et al. 2018; Alvarez-Candal, Jimenez Corral & Colazo 2022; Dobson et al. 2023; Alvarez-Candal 2024a). The exclusion of objects with colours and slopes outside the mentioned intervals intends to avoid bad measurements and, consequently, introducing interlopers in the clustering process. Of course, objects outside those intervals may not necessarily have bad

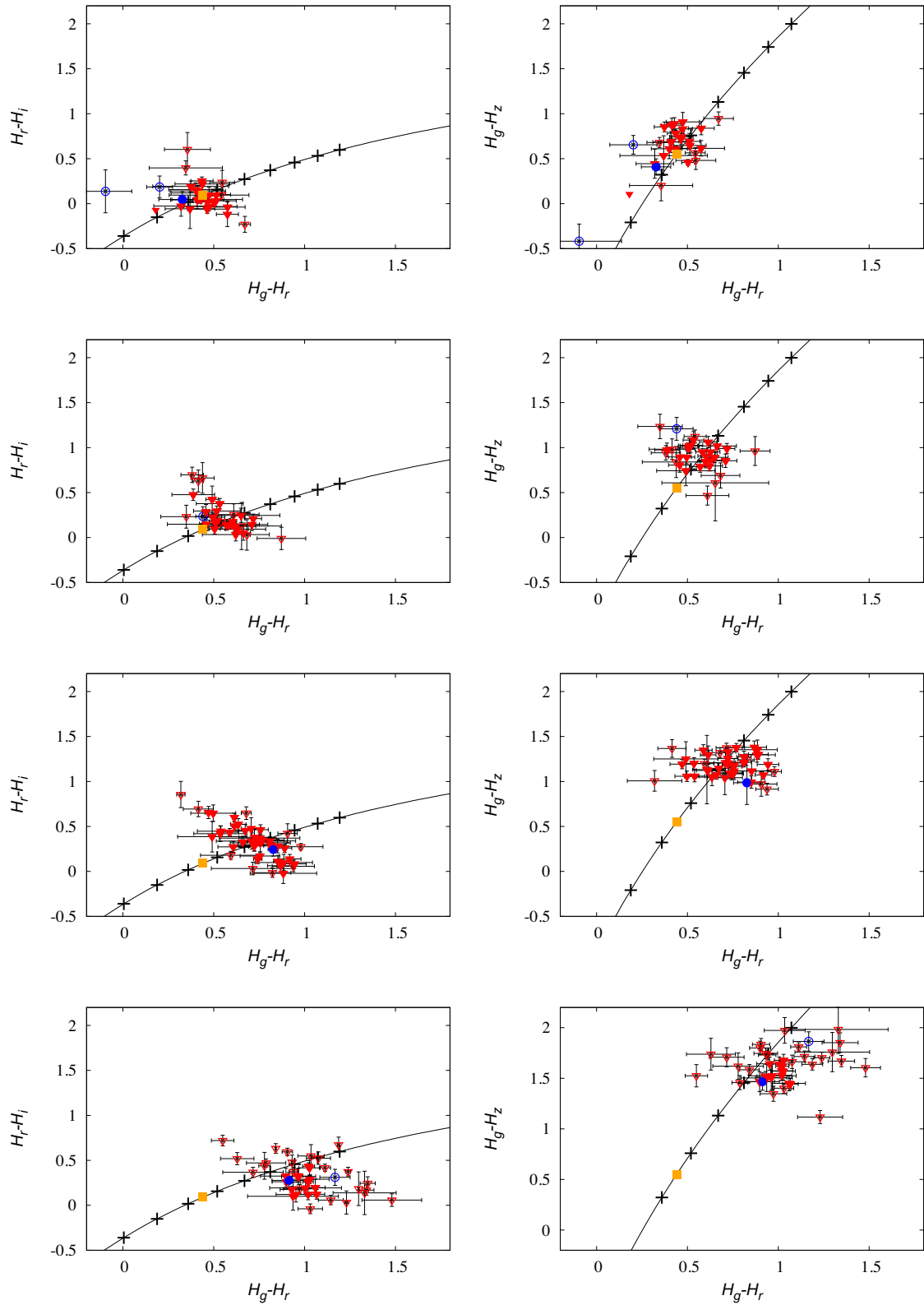


Figure 3. Left column: $(H_g - H_r) \times (H_r - H_i)$ plot of the objects in Table 4. Solid markers are those class defining (first 94 objects in Table 4). Empty markers are the remaining 50 objects. Triangles represent KBOs. Circles represent Centaurs. The thin curve (reddening line, see Section 4.5) shows the locus of objects with linear reflectivity spectrum. The solid square on the reddening line indicates the locus of the solar colours. From top to bottom: BB, BR, IR, and RR groups are represented. Marks on the reddening line range from -02 per cent up to 22 per cent per 100 nm. A mark is shown each four units. Right column: same as left for colours $(H_g - H_r) \times (H_g - H_z)$. Error bars length is 1σ .

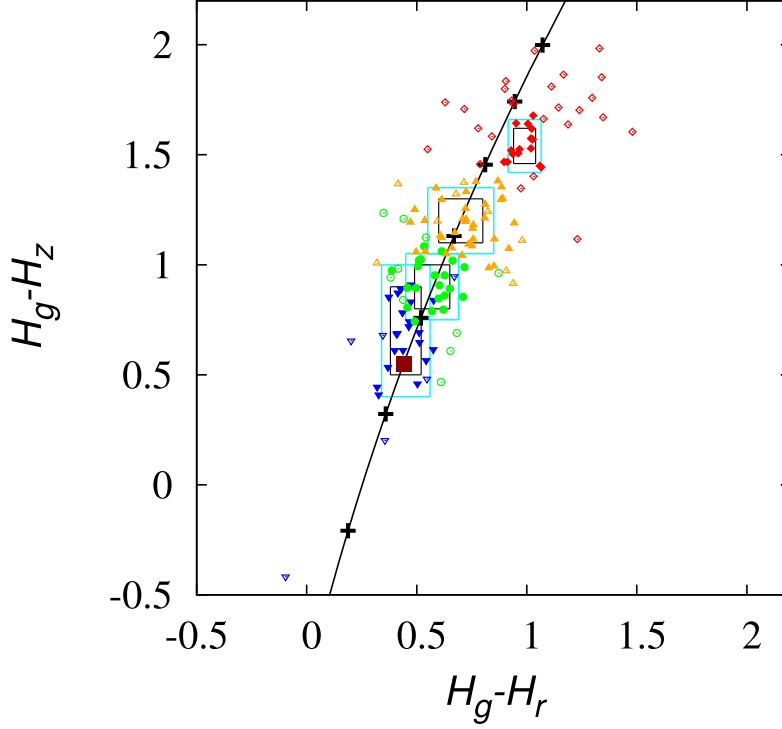


Figure 4. Distribution of the taxonomic classes in a colour–colour diagram: BB (blue - down triangle), BR (green - circles), IR (orange - up triangles), and RR (red - diamonds). Solid circles represent the defining objects, open circles otherwise (see Table 4). The thin curve (reddening line) shows the locus of objects with linear reflectivity spectrum. Marks on the reddening line range from -0.2 per cent up to 2.2 per cent per 100 nm. Boxes indicate the locus of each class, with side lengths of 2σ (black) and 3σ (cyan) (see Table 6). The dark red (black) large solid square indicates the Solar colours.

Table 5. Central wavelength^a (nanometers) and solar magnitudes^b adopted for each DES filter.

	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>
λ_c (nm)	475	635	775	925
Sun (mag.)	-26.5071	-26.9587	-27.0478	-27.0542

Notes.^a <https://noirlab.edu/science/programs/ctio/filters/Dark-Energy-Camera> ^b <https://cdcv.s.fnal.gov/redmine/projects/descalibration/wiki>

Table 6. Mean colours and standard deviations in each class.

	$H_g - H_r$	$H_g - H_i$	$H_g - H_z$
BB	$0.45(\pm 0.07)$	$0.5(\pm 0.1)$	$0.7(\pm 0.2)$
BR	$0.57(\pm 0.08)$	$0.8(\pm 0.1)$	$0.9(\pm 0.1)$
IR	$0.7(\pm 0.1)$	$1.0(\pm 0.1)$	$1.2(\pm 0.1)$
RR	$0.99(\pm 0.05)$	$1.2(\pm 0.1)$	$1.54(\pm 0.08)$

photometric measurements, but such an analysis is out of the scope of this work.

It is hard to find a physical explanation for negative slopes but they correspond, most probably, to insufficient sampling of the phase curve profile (see Dobson et al. 2023). However, allowing objects with negative slopes into our final sample is important so as to include those for which the absolute value of the slope is smaller than its respective uncertainty.

4.4 Formation of clusters

We started with a set of 144 objects that survived the above filtering, from which PAM, with a fixed number $k = 4$, delivered a first

Table 7. Mean reflectances and standard deviations in each class and each band. Reflectance is normalized to 1 in the *g* band.

	Reflectance		
	<i>r</i> band	<i>i</i> band	<i>z</i> band
BB	$1.01(\pm 0.07)$	$0.98(\pm 0.09)$	$1.1(\pm 0.2)$
BR	$1.13(\pm 0.09)$	$1.2(\pm 0.1)$	$1.4(\pm 0.1)$
IR	$1.3(\pm 0.1)$	$1.6(\pm 0.1)$	$1.8(\pm 0.2)$
RR	$1.66(\pm 0.08)$	$1.9(\pm 0.2)$	$2.5(\pm 0.2)$

segregation into 4 groups. Once the members of each group are set, we calculate a low-resolution reflectance spectrum to each object, normalized at the *g* band (equation 6) (Doressoundiram et al. 2008)

$$\bar{E}_f = 10^{-0.4[(H_f - H_g) - (m_{f\odot} - m_{g\odot})]} \quad (6)$$

, where H_f and $m_{f\odot}$ are the absolute magnitude of the target and the apparent magnitude of the Sun in the same filter, respectively. Note that PAM just segregates the objects into groups. In order to assign a taxonomic class to each of them, their colours must be investigated. One way of doing this is obtaining the mean reflectance spectra of each group, as given by Fig. 2. Table 5 shows the adopted central wavelength for DES filters along with the respective magnitudes of the Sun.

An elimination of reflectances (and, consequently, of objects), at the 2σ level is made in each group to each wavelength. The clustering is then recalculated and the groups, reorganized. This process was repeated until there were no more changes in the groups.

A total of 94 objects remained in the end from the iterative 2σ clipping procedure, see Table 4. The elimination process may have been strict, but it provides a higher confidence in the characterization

Table 8. Average values of phase slopes, standard deviations of the averages, and standard deviations of the measurements (inside parenthesis) for each taxonomic class and considering the class-defining objects only.

Band	Slopes – defining objects			
	BB	BR	IR	RR
<i>g</i>	0.23 ± 0.03 (0.14)	0.19 ± 0.03 (0.13)	0.10 ± 0.03 (0.18)	0.07 ± 0.05 (0.21)
<i>r</i>	0.16 ± 0.02 (0.11)	0.12 ± 0.03 (0.13)	0.11 ± 0.02 (0.13)	0.16 ± 0.03 (0.12)
<i>i</i>	0.04 ± 0.02 (0.10)	0.08 ± 0.02 (0.11)	0.12 ± 0.03 (0.19)	0.09 ± 0.03 (0.11)
<i>z</i>	0.10 ± 0.03 (0.14)	0.02 ± 0.03 (0.15)	0.04 ± 0.03 (0.17)	0.14 ± 0.03 (0.10)

Table 9. Average values of phase slopes, standard deviations of the averages, and standard deviations of the measurements (inside parenthesis) for each taxonomic class and considering all objects.

Band	Slopes – all objects			
	BB	BR	IR	RR
<i>g</i>	0.23 ± 0.03 (0.13)	0.17 ± 0.02 (0.14)	0.10 ± 0.03 (0.19)	0.01 ± 0.03 (0.18)
<i>r</i>	0.15 ± 0.02 (0.10)	0.10 ± 0.02 (0.14)	0.11 ± 0.02 (0.15)	0.14 ± 0.02 (0.15)
<i>i</i>	0.06 ± 0.03 (0.14)	0.08 ± 0.02 (0.14)	0.11 ± 0.03 (0.20)	0.16 ± 0.02 (0.12)
<i>z</i>	0.07 ± 0.03 (0.15)	0.01 ± 0.03 (0.15)	0.03 ± 0.03 (0.19)	0.17 ± 0.03 (0.18)

of each group as provided by Tables 6 and 7. In addition, from Table 6, it is possible to later segregate into the already populated clusters the 50 objects that did not survive the elimination process. Fig. 1 shows the clusters, where the numbers in each one follow the same order as that in Table 4. Principal components are only used as a tool to help the visualization of the clusters.

4.4.1 Taxonomic classification

Taxonomic classification, by itself, is not enough to provide meaningful information about mineralogical properties of the surfaces of individual objects. Yet, it is still helpful to infer about a general distribution of compositions over different dynamical classes (see, for instance, Barucci et al. 2008; Carvano et al. 2010, for further considerations). In this context, the of TNOs and Centaurs play an important role to tell about the surface properties and/or different physical processes that affects the evolution of these faint and icy primitive bodies.

Barucci et al. (2010) mention that detailed information about the surface composition of TNOs can be only acquired from spectroscopy and that multiband photometry, from visible to NIR wavelengths, can be used to tie together the different spectral wavelength ranges.

A taxonomic classification showing four groups of different reflectances for TNOs and Centaurs is presented by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008). These four groups – BB, BR, IR, and RR – represent objects showing colours with respect to the Sun ranging from neutral (BB) to very red (RR).

The spectra of objects in the BB (bluest) group are typically flat and bluish in the NIR. The H₂O absorption bands seem generally stronger than the other groups. The reddest objects, classified as RR, present a small percentage of ice on their surface and indicate the presence of complex organic material. Objects in the BR group, an intermediate class between BB and IR group, have a small rate of H₂O ice on their surface, while some of the objects in the IR group seem to contain hydrous silicates on the surface (Fulchignoni et al. 2008; Barucci et al. 2010).

The labelling of each class determined in this work (BB, BR, IR, and RR) is, as already mentioned, obtained from Fig. 2. Comparisons with the literature, presented in Table 4, show that our results are consistent with classification from Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008).

4.5 Colour–colour diagrams

Fig. 3 shows colour–colour diagrams along with the reddening line, defined as the reddening per 100 nm, in percentage as given by equation (7)

$$S(\lambda_1, \lambda_2) = 10^4 \times \frac{\overline{E}_{f2} - \overline{E}_{f1}}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (7)$$

where $\lambda_{1,2}$ are given in nanometers ($\lambda_2 > \lambda_1$) and $\overline{E}_{f1,2}$ are given by equation (6).

It is seen in Fig. 3 that the objects in the BB, BR, and IR groups tend to follow, on average, the reddening line, whereas those in the RR group have a preference to be located below it. These results are supported by previous works, and those for the redder ones indicate slope changes towards the NIR (see, for instance, Boehnhardt et al. 2001; Delsanti et al. 2001, 2004; Hainaut & Delsanti 2002). The behaviours just mentioned of the taxonomical classes with respect to the reddening line are also highlighted by Fig. 4. It can be compared to fig. 1 from Markwardt et al. (2023), where the spectral slope of their reddest object for wavelengths shorter than 1 μ m also stands out when compared to those of the other (and less red) ones.

4.6 Phase slopes

The values of the phase slopes (see equation 2) are listed in Table 4 and synthesized in Tables 8 and 9 for each taxonomic class.

It is interesting to note from Tables 8 and 9 that the slopes in the *g* band become gradually less steep from the bluer to redder objects, in agreement with the tentative correlations reported by Dobson et al. (2023) between slope and colour. Also, Alvarez-Candal et al. (2019, 2024b) report that their data show steeper phase curves in the *R* filter for the redder objects and that the bluer objects have steeper phase curves in the *V* filter. The values shown in Tables 8 and 9 (BB column) agree with the results for the *V* filter and are not in contradiction with those for the *R* filter if our *z* band measurements (RR column) are considered.

Fig. 5 indicates a weak correlation between colours and slopes to a specific combination of bands. Combinations of colour/slope other than those shown by Fig. 5 were investigated and no correlation has been found.

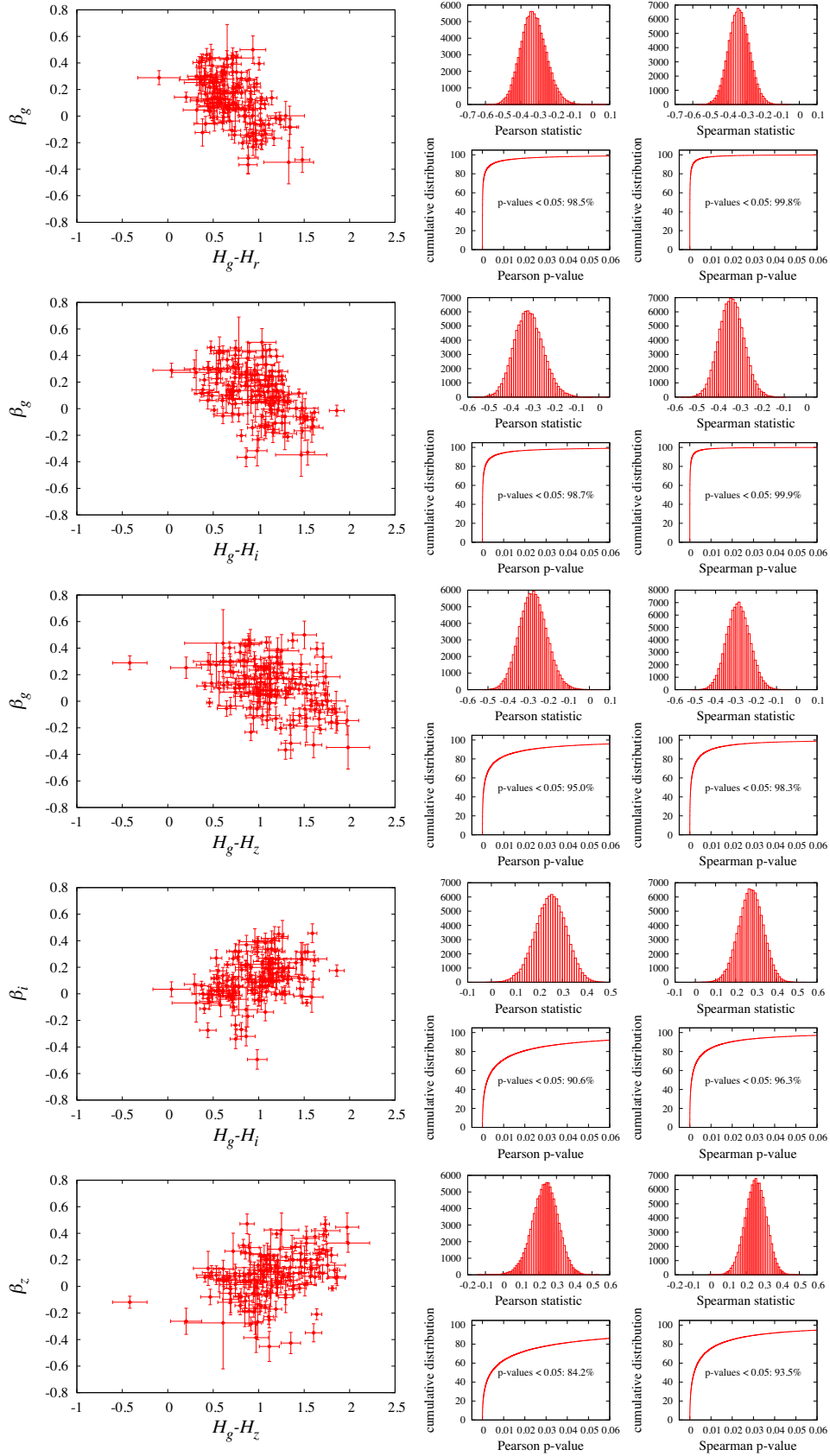


Figure 5. Colour \times slope in the g , r , i , and z bands for the objects in Table 4. Histograms of Spearman and Pearson statistics along with the respective cumulative p -values in the right column were obtained by resampling the points in the left column 100 000 times. Each point is resampled in the colour and slope directions following a Gaussian distribution with mean given by the point's colour/slope values and respective standard deviations in each coordinate. Error bars length is 1σ .

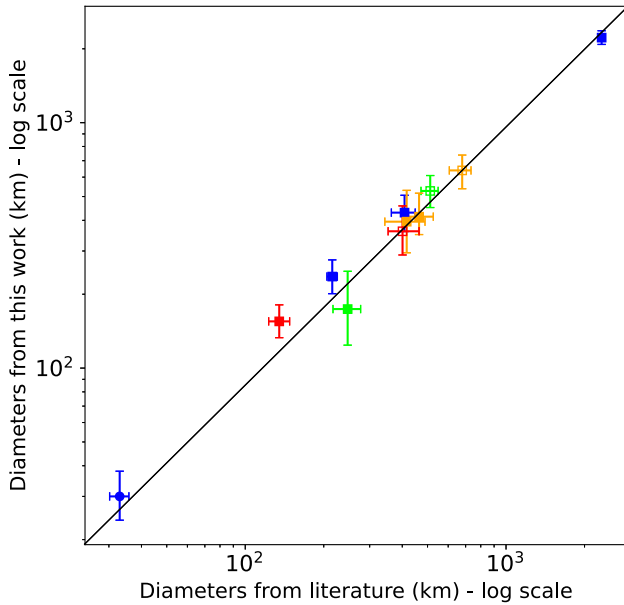


Figure 6. Comparison of diameters and respective errors found in the literature and those from this work. The largest diameter is that from Eris.

4.7 Estimation of diameters

We combine the absolute magnitudes of the TNOs presented here with median values of albedo, representative of different dynamical classes, from Müller et al. (2020, see table 1 of that work). Since their albedos are mostly given in the V band, we convert DES absolute magnitudes from the g_{DES} band into the V band using the transformation equations from Abbott et al. (2021). The variances of the obtained absolute V magnitudes are determined from the error expansion of the respective transformation equations and by adding quadratically the rms value provided for the respective ones.

Equivalent diameters (D) are finally computed from equation (3), taking the apparent magnitude of the Sun in the V band (-26.77) from Willmer (2018). Confidence intervals $[D_{\text{min}}, D_{\text{max}}]$ for the diameters are inferred by determining the pairs $(H_{v\text{min}}, \rho_{v\text{max}})$ and $(H_{v\text{max}}, \rho_{v\text{min}})$, where $H_{v\text{min}} = H_v + \sigma_{H_v}$, $H_{v\text{max}} = H_v - \sigma_{H_v}$, $\rho_{v\text{min}} = \rho_v - \sigma_{\rho_v}$, and $\rho_{v\text{max}} = \rho_v + \sigma_{\rho_v}$. The adopted values for σ_{ρ_v} are those of the standard deviation of the mean as given by table 1 in Müller et al. (2020). All diameters and uncertainty intervals are also shown in Table 4.

An interesting quality verification of these values is given by Fig. 6, where a good agreement between our measurements and those from the literature are seen. This is another indication that the absolute magnitudes here determined are meaningful and also that the diameters provided by Table 4, within their uncertainties, are reliable. The objects that appear in those plots are (smallest to largest diameter): 2009 HH36, 1999 OX3, 2007 RW10, 2060 Chiron, 2003 QW90, 2005 QU182, 2005 TB190, 2001 QF298, 2004 TY364, 2005 RN43, and Eris. All diameters external to this work result from a search at the Virtual European Solar and Planetary Access (VESPA, Erard et al. 2018, – TNOs are Cool),⁴ exceptions made to 2009 HH36 (Bauer et al. 2013) and 2003 QW90 (Fernández-Valenzuela et al. 2021).

⁴https://vespa.obspm.fr/planetary/data/display/?&service_id=ivo://padc.obspm.planeto/tnosarecool/q/epn_core&service_type=epn

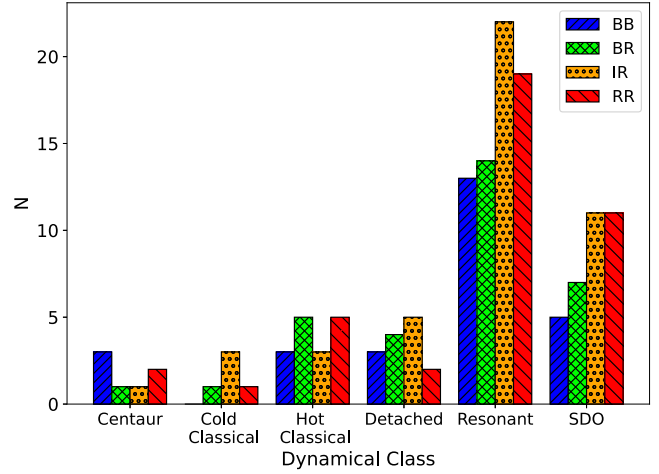


Figure 7. Distribution of taxonomic classes within each dynamical class.

4.7.1 Special cases

Objects 2009 HH36, Eris, and 2005 TB190 also appear in Müller et al. (2020), so their individual albedos in the V band were taken directly from that paper. For Eris, we also use the geometric albedo in the V band obtained by Sicardy et al. (2011) from a stellar occultation to calculate its diameter. Both results are very similar and presented in Table 4.

Object 2007 RW10 is a binary object and also appears in Müller et al. (2020). Its individual albedo is, however, given in the R band. In this context, its diameter is calculated by transforming its absolute magnitude from the r_{DES} band into the R band using again the transformation equations from Abbott et al. (2021). The apparent magnitude of the Sun in the R band (-26.97) is taken from Willmer (2018).

4.7.2 Dynamical and spectral classes and albedos

Although the determination of diameters presented here profits from a correspondence between albedo and dynamical classes, the correlation between albedo with spectral class presented by Fraser et al. (2014) and Lacerda et al. (2014) could have also been considered.

In addition to the above correlation, Lacerda et al. (2014, see its table 2) also shows median albedos with their respective confidence intervals as function of dynamical classes. Those values agree with the ones adopted in this work from Müller et al. (2020).

In any case, the reader may opt to use the spectral class–albedo correlation to estimate diameters from the absolute magnitudes presented here. In this case, a value of 5 percent for blue objects (BB and BR) and 15 percent for red objects (IR and RR) (see fig. 2 in Lacerda et al. 2014) is a valid choice.

4.8 Relations between colours and orbital elements

We searched, in the full set of 144 objects, for possible correlations involving colours, orbital parameters, and sizes. Fig. 7 shows the distribution of the taxonomic classes within each dynamical class and should be understood mostly as a feature of our observational data and unknown sampling biases rather than an actual physical scenario. It should be noted that the dynamical classification from the SkyBoT (adopted here), do not segregate between hot and cold classical. In this context, the definitions from Huang et al. (2022)

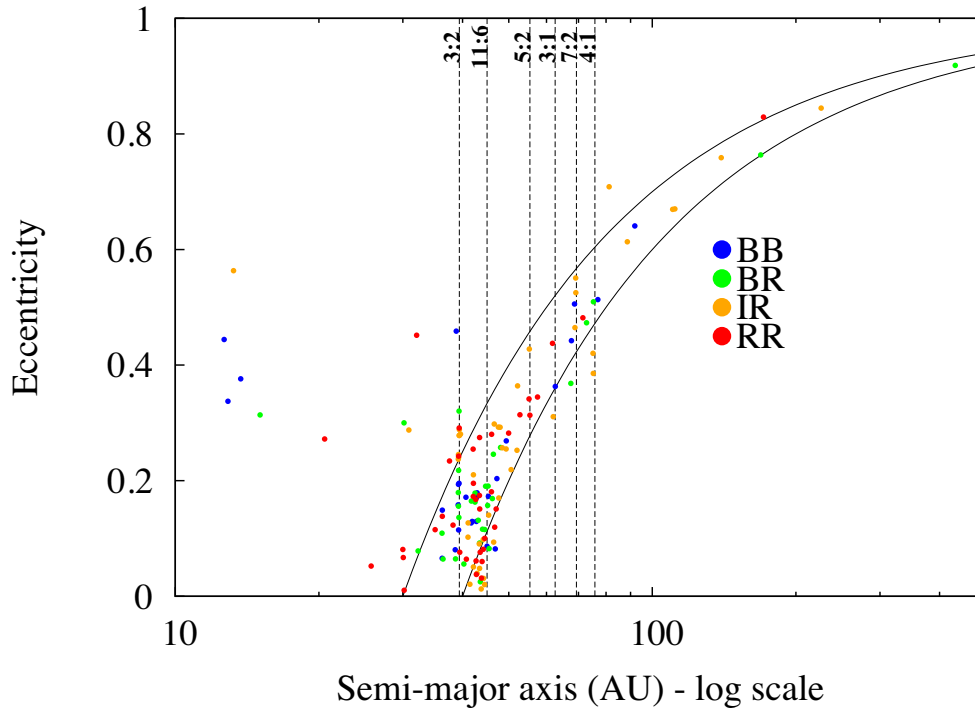


Figure 8. Eccentricity as a function of the semimajor for the objects in Table 4. Some resonances with Neptune are indicated by the dashed lines. The continuous lines show constant q of 30 and 40 au.

and Marsset et al. (2023) have been used: $42.5 < a < 45$ au and $i < 4^\circ$ or $45 < a < 47$ au and $i < 6^\circ$. Although the inclination, strictly speaking, should be understood in the context of Huang et al. (2022, free inclination), we use osculating elements. All our cold classicals, exception made to the TNO 2014 NB66 (BR type), belong to our reddest (IR and RR) objects. The few Centaur objects are dominated by two groups (BB and RR), and the IR objects, in agreement with Fulchignoni et al. (2008) and Perna et al. (2010), are most frequent in the resonant class. We note that, also as shown by Fig. 7, our SDOs are dominated by the reddest classes (IR and RR). This is in disagreement with Ali-Dib et al. (2021), which found a paucity of very red objects in the scattered disc.

A plot of semimajor axis \times eccentricity is given by Fig. 8. Taking into account the interval (13–75 au) in semimajor, in which most of the objects are located, we find no correlation between the taxonomic classes and heliocentric distance. It is possible to see that, however, the few objects with $a < 20$ au tend to be blue.

Fig. 9 shows plots of eccentricity as a function of colours for three sets of objects: (i) defining BB and RR, (ii) defining and non-defining BB and RR, and (iii) defining and non-defining BB plus BR and defining and non-defining IR plus RR (i.e. considering two classes only). Ali-Dib et al. (2021) find that their reddest objects are strongly limited to $e < 0.42$ so we adopt it for the sake of our analysis.

We note that, for the leftmost and middle plots of Fig. 9, 80 per cent–81 per cent of the bluest population has $e < 0.42$, whereas 90 per cent–92 per cent of the reddest population has eccentricities below that limit. The same fraction of blue and red objects in the rightmost plot, however, shows $e < 0.42$. We can interpret these results as an agreement, although it is difficult to take a limiting value for e from our own data, with those from Ali-Dib et al. (2021) when the two extreme classes (BB and RR) are

concerned. On the other hand, there is no evident limit when two classes are formed from BB plus BR (blue) and IR plus RR (red).

When inclinations are concerned, we note that 33 per cent–39 per cent of the blue objects have $i < 21^\circ$, whereas 58 per cent–64 per cent of the red objects have inclinations below that limit (adopted from Marsset et al. 2019; Ali-Dib et al. 2021). It is interesting to note that these results hold for all three plots in Fig. 10.

It is important to emphasize here that we can not infer strong confinement limits in eccentricity and/or inclination as Marsset et al. (2019) and Ali-Dib et al. (2021) did, but we can say that the fraction of red objects in our data confined in the region ($e < 0.42$ and $i < 21^\circ$) is clearly larger than that of our blue ones (with the exception mentioned above when we consider only two classes for the eccentricity).

A correlation between colour and inclination for classical TNOs is reported by various works (see, for instance, Tegler & Romanishin 2000; Trujillo & Brown 2002; Peixinho et al. 2015). Our data contain 21 classical TNOs spreading over the four taxonomic classes from which a colour–inclination correlation is not clear.

We checked all dynamical classes from our full data set individually and the presence of a weak correlation was found from both Pearson and Spearman tests only for the resonant objects, 68 in total, from our data set. This can be seen in Fig. 11. It is important to emphasize that such correlation is due to the resonant BB. We also checked the colour–inclination correlation for three subsets of resonant objects: (i) excluding the 7:4 resonance; (ii) excluding low inclination ($i < 5^\circ$) objects; and (iii) excluding low inclination and low eccentricity ($e < 0.09$) objects. In all cases, a weak but clear correlation is present as long as the resonant BB are kept in the sample.

Fig. 12 shows the distribution of diameters of our bluest (BB) and reddest (RR) objects as a function of their $H_g - H_c$ colours. It is clear from this distribution that the reddest objects are concentrated

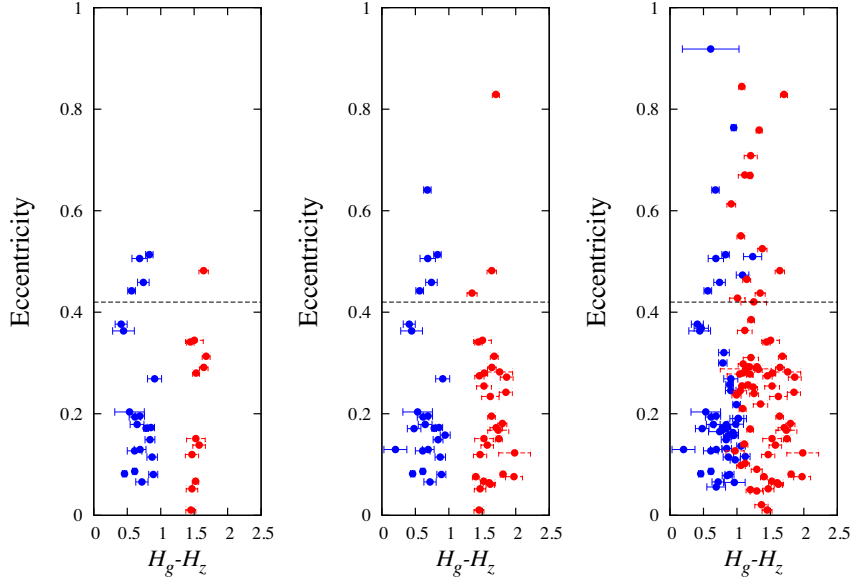


Figure 9. Colour \times eccentricity for selected objects ($i < 5^\circ$ also considering $T_j < 3$ when Centaurs are concerned). Left: defining (first 94 objects in Table 4) BB (blue) and RR (red) objects. Middle: BB and RR objects, defining and non-defining. Right: BB plus BR (blue) and IR plus RR (red), defining and non-defining. Dashed line at $e = 0.42$ (see Ali-Dib et al. 2021).

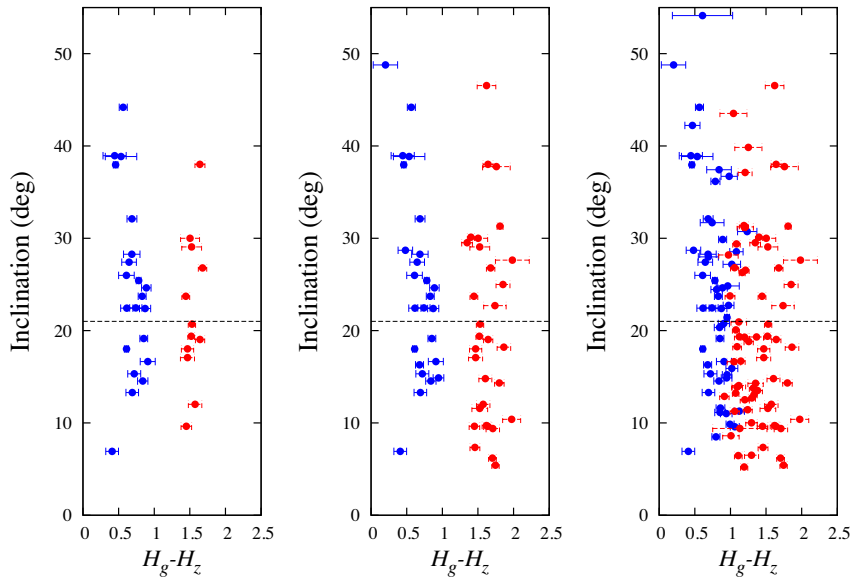


Figure 10. Colour \times inclination for selected objects ($i < 5^\circ$ also considering $T_j < 3$ when Centaurs are concerned). Left: defining (first 94 objects in Table 4) BB (blue) and RR (red) objects. Middle: BB and RR objects, defining and non-defining. Right: BB plus BR (blue) and IR plus RR (red), defining and non-defining. Dashed line at $i = 21^\circ$ (see Ali-Dib et al. 2021).

around smaller diameters, with a small fraction of objects larger than ~ 250 km, as compared to the neutral (bluest) ones. Also, we highlight that no large ($D \gtrsim 400$ km, error bars not included) objects were found in the cold classical population, which is in line with Kavelaars et al. (2022). Also, Fraser & Brown (2012) suggest that larger objects are dominated by other processes that have little effect at smaller ones, like the onset of differentiation or cryovolcanic processes, both of which would have the effect of covering or removing non-icy materials from the surface. This could be a justification for the absence of objects with $D \gtrsim 400$ km among our reddest ones.

4.9 A few words about the adopted taxonomic scheme

It is reasonable to look for classes that meaningfully reflect spectroscopic characteristics of its members. At the same time, it is clear that broad band photometry with few colours just can not compete with a spectroscopic study of the surfaces of small bodies. In principle, such a difficulty of refinement may suggest that a large number of classes would be meaningless.

Merlin et al. (2017) found that their spectroscopic results for a set of 43 TNOs and Centaurs are in good agreement with the bluest (BB) and reddest (RR) objects in the taxonomic classification by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008). Objects in the other two

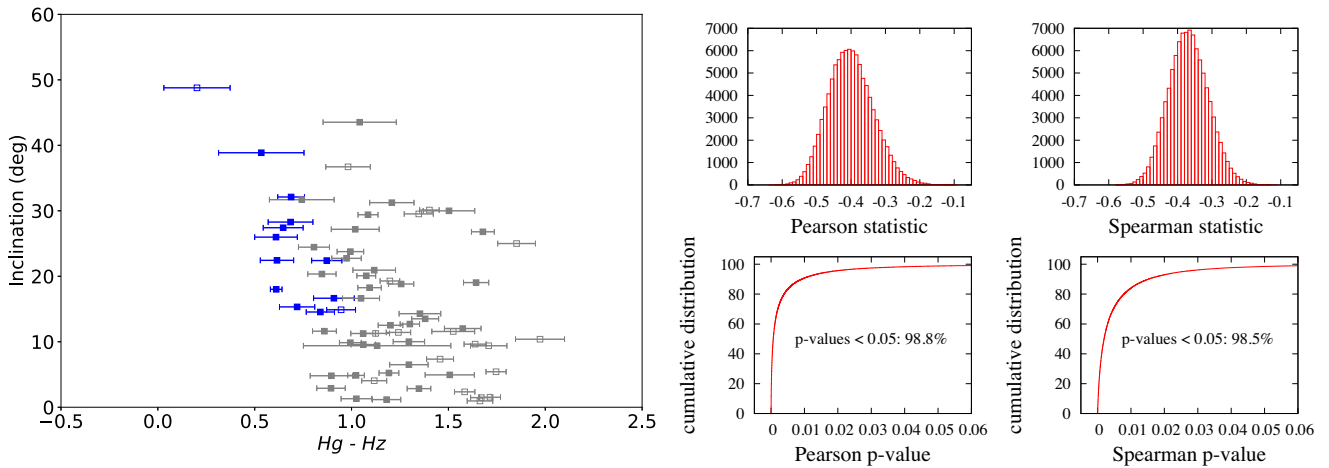


Figure 11. Left panel: colour \times inclination correlation, considering all 68 resonant objects in Table 4. Solid squares: objects among the first 94 objects in that table. Open squares: remaining ones. Blue squares represent the BB-type resonant objects and the grey ones represent the other taxonomic classes (BR, IR, and RR). Upper right panel: results from Pearson and Spearman tests obtained as in Fig. 5. Lower right panel: results from Pearson and Spearman tests obtained as in Fig. 5. Error bars length is 1σ .

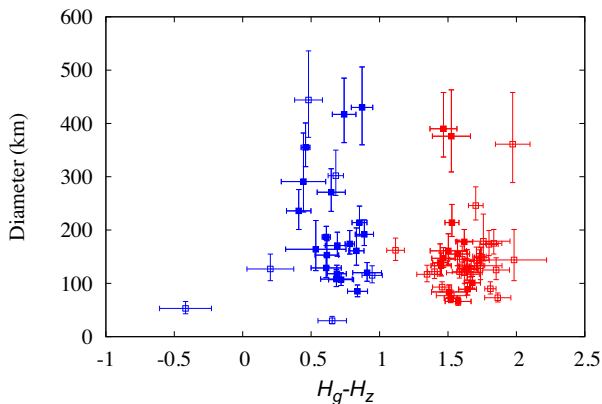


Figure 12. Colour \times diameter for object in classes BB (blue) and RR (red). Solid markers are those class defining (first 94 objects in Table 4). Empty markers are the remaining 50 objects. Eris (diameter 2221^{+148}_{-137} km), for convenience, is not shown. 92.5 per cent of the RR objects have diameters smaller than 400 km and 90 per cent have diameters smaller than 250 km. In both cases, the 1σ uncertainty was taken into consideration. In the case of the BB objects, the percentiles are 81.5 per cent and 66.7 per cent (Eris included).

intermediate classes, BR and IR, however, show intermixed mean spectra indicating that at least part of the objects show no particular preference to one of those classes.

Choosing the taxonomy by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008) in this context allows us to, at least, be confident that our bluest and reddest objects have surface properties showing reliable correspondence with those obtained from spectroscopic results. In addition, relevant information is gathered about the objects in the intermediate classes, leading to a possible improved discrimination of surfaces populating them, as well as increasing the number of objects in all classes of such a taxonomy scheme.

As mentioned earlier, this work is neither aimed at advocating for any specific method to classify TNO/Centaur surfaces through their optical colours nor to present any new such method. Although the use of the 4-class taxonomic system can be ultimately considered a choice in this work, the data set itself provides some support for, at least, a minimum number of classes. Fig. 13 is helpful in this context.

It shows the histograms for the colours $H_g - H_r$, $H_g - H_i$, and $H_g - H_z$. It is important to highlight that these plots reflect the colour distribution of the data without influence of whatever procedure to separate the objects into classes although, obviously, the class limits obtained here must agree with such distribution.

The following can be noted in those histograms (see Table 6):

- (i) the colour limit between IR and RR for colour $H_g - H_r$ is close to the minimum of the $H_g - H_r$ histogram,
- (ii) the colour limit between the BR and IR for colour $H_g - H_i$ is close to the minimum of the $H_g - H_i$ histogram, and
- (iii) the colour limits between the classes BB–BR and IR–RR for colour $H_g - H_z$ are close to the two minima of the $H_g - H_z$ histogram.

The histogram of the $H_g - H_z$ colours shows two gaps, indicating three groups of objects: one group is identified with the BB class ($H_g - H_z < 0.83$), another group is identified with the RR class ($H_g - H_z > 1.39$) and an intermediate group that comprises the BR and IR classes. The histogram of the $H_g - H_i$ colours shows a minimum close to the limits between the BR and IR classes, but one may argue that conclusions assigning gaps to a given class name (BB, BR, IR, or RR) require a previous knowledge of the clustering results. In this way, it is possible to say from the histogram of the $H_g - H_z$ colours that three groups are present and an analysis combining the pieces of information from all the three colours is, however, a more suitable approach to discuss the number of classes. Although, as previously mentioned, this work has no intention to advocate in favour of any specific method of class finding and the eventual number of classes, our choice for the four-class scheme agrees with the behaviour of the colour distribution of our data as given by Fig. 13.

In general, it is clear that there are, at least, two classes (a bluer one and a redder one). One may want to say that classes BB/BR compose the bluer one and that classes IR/RR compose the redder one.

Due to the intermixed spectra found for classes BR and IR, it would be difficult for this work to derive part of its results without a discrimination between the two extreme classes (BB and RR) and those two intermediate (BR and IR) ones. Interlopers in the BB and RR classes make it difficult to derive conclusions, for instance from

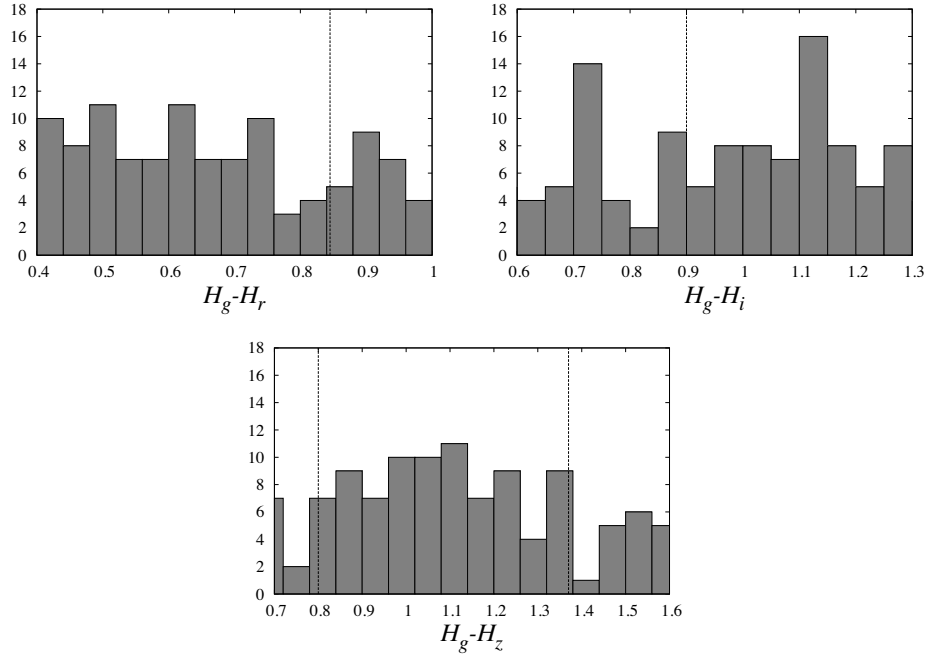


Figure 13. Histogram of the $H_g - H_r$, $H_g - H_i$, and $H_g - H_z$ colours for the 144 objects that passed the filtering process (see Section 4.3). The dashed lines indicate the limits between taxonomic classes as obtained from Table 6. We recall that Table 6 considers only the first 94 (defining) objects in Table 4.

Table 10. Objects classified in this work with Barucci et al. (2005) taxonomic scheme which were also found in literature with a possible surface type based on Fraser et al. (2023). The last column represents the reference where these objects with a possible taxonomy based on Fraser et al. (2023) were found: 1: Marsset et al. (2023). 2: Pike et al. (2023).

Object	Taxonomy found in this work based on Barucci et al. (2005)	Surface class based on Fraser et al. (2023)	Reference
2001 QF298	BB	BrightIR	1
2013 SA100	BR	BrightIR	1, 2
1999 RB216	IR	Unclassified	1
2005 SA278	BB	BrightIR	1
2015 RU245	IR	FaintIR	2
2003 QW90	RR	FaintIR	1
2015 RT245	RR	FaintIR	1, 2

the rightmost panel in Fig. 9. Also, results from Fig. 12 profit from the use of BB and RR objects only.

Based on observations from the Colours of the Outer Solar System Origins Survey (see Schwamb et al. 2019), the existence of two types surfaces of TNOs was proposed by Fraser et al. (2023). In this new taxonomy, TNOs are assigned into BrightIR or FaintIR classes based on their reflectivity in the NIR following the reddening curve. The BrightIR class is closer to the reddening curve and explores the full range of optical and NIR surfaces, while the FaintIR objects are limited in optical colour and are less bright in the NIR.

We searched in the literature objects that we classified with the Barucci et al. (2005) taxonomy that were also classified following the taxonomy by Fraser et al. (2023), see Table 10. It is interesting to note the overlap of BB-type with BrightIR and RR-type with FaintIR.

In addition, 1999 RB216 has ambiguous classifications (BR–IR) within the scheme by Barucci et al. (2005, see Table 4). In the scheme by Fraser et al. (2023, see Marsset et al. 2023) this TNO has an unclassified surface type. This could be related to the intermixed mean spectra found for classes BR and IR in the four-colour taxonomy (Merlin et al. 2017).

Peixinho et al. (2015) make a re-analysis of colours of 354 Centaurs and KBOs, 12 of them are in common with this work: 1999 OX3, 2001 QO297, 2001 QF298, 2002 PA149, 2003 QW90, 2004 TY364, 2005 PU21, 2007 UM126, 2005 TB190, Chiron, Eris, and 1999 RB216. We searched all the references, provided by the authors, from which their photometry was obtained. In all cases, their results are compatible to the taxonomical classification this work presents for them.

Pinilla-Alonso et al. (2025) revealed the existence of three main spectral groups of TNOs corresponding to different surface compositions from spectroscopic data using the *JWST* – bowl, double-dip, and cliff. These three classes have distinctive spectral features of water ice absorption and of complex and aliphatic organics.

It is interesting to note in Pinilla-Alonso et al. (2025, hereafter PnA) that, to wavelengths shorter than $\sim 1.25 \mu\text{m}$ (see fig. 3 of that paper), slopes become increasingly steeper in the reflectance spectra of bowl-, double-dip- and cliff-type TNOs, respectively. Table 11 lists the objects in common between this work and PnA, and a correspondence between both classifications is seen. Such a correspondence, in addition to the results in PnA, may provide rough indications of features in the NIR from optical spectrophotometry.

Table 11. Objects classified in this work with Barucci et al. (2005) taxonomic scheme which were also classified by Pinilla-Alonso et al. (2025) surface types. Note that 2004 TY364, although classified as a BR type in this work, also has redder (RR and, mainly, IR) classifications by other works.

Object	Taxonomy found in this work based on Barucci et al. (2005)	Surface type based on Pinilla-Alonso et al. (2025)
2007 RW10	BR	Bowl
2004 TY364	BR	Double-dip
2005 QU182	IR	Double-dip
2005 TB190	IR	Double-dip
2005 RN43	IR	Double-dip
1999 OX3	RR	Cliff
2005 PU21	RR	Cliff

For instance, it does not seem likely that a blue object in this study be classified as a cliff. It should be also noted that Figs 9 and 10 show that our redder population is generally less excited than our bluer one, another feature that agrees with PnA.

5 CONCLUSIONS

The high quality of the DES photometric measurements lead to reliable colours of TNOs and Centaurs. Despite the absence of accurate rotational information, a taxonomic classification for those objects has been determined based on procedures well established and accepted in the literature. Out of 144 objects presented here, we have not found in the literature a taxonomic classification available in the scheme proposed by Barucci et al. (2005) for 132 of them.

As objects are discovered by DES, their taxonomic classification may be readily determined from the values presented here and sources with unusual features may be identified. It is interesting to note that part of the analysis presented here involved only the bluest (BB) and reddest (RR) colours. This is so because the separation between these colours makes the discrimination of intrinsic characteristics easier and, probably, subject to less contamination. In particular, it seems clear that TNOs have neutral and very red colours with respect to the Sun, with possibly two intermediate classes with more mixed spectroscopic properties.

We checked correlations between colour and orbital parameters. A weak but clear correlation between colour and inclination was found for the resonant objects, in which the presence of the bluest objects (BB) is relevant. In addition, weak but clear correlations between colour and phase slopes are found.

The fraction of red objects in the region ($e < 0.42$ and $i < 21^\circ$, see these limits in Marsset et al. 2019; Ali-Dib et al. 2021) is larger than the fraction of blue objects in the same region. It is interesting to note that, in our sample, the eccentricity limit holds only when the extreme classes (BB and RR) are considered. The limit in inclination, on the other hand, also holds when two classes (BB plus BR – blue and IR plus RR – red) are considered.

Our reddest and bluest TNOs have different surface compositions and there is dynamical evidence (see, for instance, Nesvorný et al. 2020) for different origins. Spectroscopic results (see Merlin et al. 2017) are found to be in good agreement with the bluest and reddest objects in the taxonomic classification scheme by Barucci et al. (2005) and Fulchignoni et al. (2008), which we also use in this work. Therefore, our BB and RR objects are a relevant contribution to models of dynamical evolution of the Solar system. It is interesting to note, however, that we have a mix of colours for $13 \lesssim a \lesssim 75$ au, where most of our objects are placed.

With respect to their sizes, useful diameters for all objects were determined with the help of absolute magnitudes. A trend showing that our bluest objects tend to harbour larger diameters, as compared to our reddest objects, has been found. This agrees with the hypothesis that larger objects may have modified or resurfaced their surfaces from processes that are not present in the smaller ones.

The DES was designed to understand, based on its six years of ground-based multiband observations, the nature of the dark energy that accelerates the expansion of the Universe. It is clear, however, that DES contributions go well beyond that⁵ and Solar system science is one of the examples. DES is a genuinely important predecessor of the unprecedented Legacy Survey of the Space and Time (LSST Science Collaboration et al. 2009; Ivezić et al. 2019), the 10-yr survey of the Southern hemisphere sky that will take place at the Vera C. Rubin Observatory and will image the visible sky from Cerro Pachón twice every week, enlightening numerous areas in Astronomy in visible wavelengths, Solar system in particular.

ACKNOWLEDGEMENTS

FSF and JIBC made significant contributions to the development of this work, including paper writing and figure production. RCB contributed to data analysis and critical software development. MVB-H, AP, and VF-P contributed to the construction and validation of the catalogue with astrometric and photometric information of known Solar system small bodies from DES observations and dynamical information from SkyBoT. MA contributed to paper revision and useful discussions and suggestions that significantly improved the text. PHB, HWL (DES internal reviewers), FB-R, AG-J, and RV-M provided useful discussions and suggestions that significantly improved the text. LNC coordinates big data software, data storage, and high performance hardware projects that supported this work. The remaining authors have made contributions to this paper that include, but are not limited to, the construction of DECam and other aspects of collecting the data; data processing and calibration; developing broadly used methods, codes, and simulations; running the pipelines and validation tests; and promoting the science analysis.

FSF acknowledges a CAPES support. This study was financed in part by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brazil (CAPES) – Finance Code 001. This research used computational resources from the Interinstitucional Laboratory of e-Astronomy (LIneA) with financial support from the National Institute of Science and Technology (INCT) of the e-Universo (process no. 465376/2014-2). The following grants are

⁵See publications in <https://dbweb8.fnal.gov:8443/DESPub/app/PB/pub/pbpublished>

acknowledged: JIBC: CNPq 305917/2019-6 and 306691/2022-1, and FAPERJ 201.681/2019; RCB: FAPERJ E26/202.125/2020; MVB-H: FAPERJ E-26/ 200.480/2020; AP: CNPq 163708/2022-3; VFP: CNPq, PIBIC/ON (process 143944/2022-3); MA: CNPq 427700/2018-3, 310683/2017-3, and 473002/2013-2; PHB: University of Washington College of Arts and Sciences, Department of Astronomy, and the DiRAC Institute; FBR: grant 314772/2020-0; and RVM: CNPq 307368/2021-1. The author acknowledges an anonymous referee for helping improve the text.

This research has made use of the VESPA portal and services (<https://vespa.obspm.fr>) funded by European Union's under grant agreement no. 871149. Except where explicitly mentioned, data are distributed under Etalab Open License 2.0 (compliant with CC-BY 2.0 license). The Europlanet 2024 Research Infrastructure project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 871149. The Europlanet 2020 Research Infrastructure project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 654208. This work used the EGI Infrastructure with the dedicated support of IN2P3-IRES and CESNET-MCC. VESPA has first been designed in the frame of Europlanet-RI JRA4 work package (IDIS activity). Additional funding was provided in France by the Action Spécifique Observatoire Virtuel and Programme National de Planétologie/INSU.

This paper has gone through internal review by the DES collaboration.

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 nos 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.

DATA AVAILABILITY

All data from Table 4 are currently under consideration for publication at the Strasbourg Astronomical Data Center (CDS, see <https://cds.unistra.fr/>). It should be also available as machine-readable table.

REFERENCES

- Abbott T. M. C. et al., 2018, *ApJS*, 239, 18
 Abbott T. M. C. et al., 2019, *Phys. Rev. D*, 100, 023541
 Abbott T. M. C. et al., 2021, *ApJS*, 255, 20
 Acton C. H., 1996, *Planet. Space Sci.*, 44, 65
 Acton C., Bachman N., Semenov B., Wright E., 2018, *Planet. Space Sci.*, 150, 9
 Ali-Dib M., Marsset M., Wong W.-C., Dbouk R., 2021, *AJ*, 162, 19
 Alvarez-Candal A., 2024a, *Planet. Space Sci.*, 251, 105970
 Alvarez-Candal A., 2024b, *A&A*, 685, A29
 Alvarez-Candal A., Ayala-Loera C., Gil-Hutton R., Ortiz J. L., Santos-Sanz P., Duffard R., 2019, *MNRAS*, 488, 3035
 Alvarez-Candal A., Jimenez Corral S., Colazo M., 2022, *A&A*, 667, A81
 Assafin M., 2023, *Planet. Space Sci.*, 238, 105801
 Assafin M. et al., 2023, *MNRAS*, 526, 6193
 Ayala-Loera C., Alvarez-Candal A., Ortiz J. L., Duffard R., Fernández-Valenzuela E., Santos-Sanz P., Morales N., 2018, *MNRAS*, 481, 1848
 Banda-Huarca M. V. et al., 2019, *AJ*, 157, 120
 Barucci M. A., Peixinho N., 2005, in Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernández J. A., eds, Proc. IAU Symp. 229, Asteroids, Comets, Meteors. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 171
 Barucci M., Doressoundiram A., Cruikshank D., 2004, in Festou M. C., Keller H. U., Weaver H. A., eds, Comets II. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 647
 Barucci M. A., Belskaya I. N., Fulchignoni M., Birlan M., 2005, *AJ*, 130, 1291
 Barucci M. A., Brown M. E., Emery J. P., Merlin F., 2008, The Solar System Beyond Neptune, Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 143
 Barucci M. A. et al., 2010, *The Messenger*, 141, 15
 Bauer J. M. et al., 2013, *ApJ*, 773, 22
 Becker J. C. et al., 2018, *AJ*, 156, 81
 Belskaya I. N., Barucci M. A., Fulchignoni M., Dovgopoul A. N., 2015, *Icarus*, 250, 482
 Bernardinelli P. H. et al., 2020a, *Planet. Sci. J.*, 1, 28
 Bernardinelli P. H. et al., 2020b, *ApJS*, 247, 32
 Bernardinelli P. H. et al., 2021, *ApJ*, 921, L37

- Bernardinelli P. H. et al., 2022, *ApJS*, 258, 41
- Bernardinelli P. H. et al., 2023, *ApJS*, 269, 18
- Bernstein G. M. et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 115
- 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, ASP Conf. Ser. Vol. 351, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 367
- Boehnhardt H. et al., 2001, *A&A*, 378, 653
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. W., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, *Asteroids II*. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 524
- Braga-Ribas F. et al., 2014, *Nature*, 508, 72
- Brown M. E., 2012, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 40, 467
- Buchanan L. E. et al., 2022, *Planet. Sci. J.*, 3, 9
- Burke D. L. et al., 2018, *AJ*, 155, 41
- Carrasco Kind M., Drlica-Wagner A., Koziol A., 2018, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1812.008
- Carruba V. et al., 2024, *MNRAS*, 527, 6495
- Carvano J. M., Hasselmann P. H., Lazzaro D., Mothé-Diniz T., 2010, *A&A*, 510, A43
- Chen Y.-T., Eduardo M. R., Muñoz-Gutiérrez M. A., Wang S.-Y., Lehner M. J., Chang C.-K., 2022, *ApJ*, 937, L22
- Coradini A., Fulchignoni M., Fanucci O., Gavrishin A. I., 1977, *Comput. Geosci.*, 3, 85
- Dalle Ore C. M., Dalle Ore L. V., Roush T. L., Cruikshank D. P., Emery J. P., Pinilla-Alonso N., Marzo G. A., 2013, *Icarus*, 222, 307
- Dark Energy Survey Collaboration, 2016, *MNRAS*, 460, 1270
- Delsanti A. C., Boehnhardt H., Barrera L., Meech K. J., Sekiguchi T., Hainaut O. R., 2001, *A&A*, 380, 347
- Delsanti A., Hainaut O., Jourdeuil E., Meech K. J., Boehnhardt H., Barrera L., 2004, *A&A*, 417, 1145
- Diehl H. T. et al., 2016, in Peck A. B., Seaman R. L., Benn C. R., eds, Proc. SPIE Conf. Ser. Vol. 9910, *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VI*. SPIE, Bellingham, p. 99101D
- Dobson M. M. et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 75
- Doressoundiram A., Boehnhardt H., Tegler S. C., Trujillo C., 2008, in Barucci M. A., Boehnhardt H., Cruikshank D. P., Morbidelli A., Dotson R., eds, *The Solar System Beyond Neptune*. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 91
- Duffard R., Ortiz J. L., Thirouin A., Santos-Sanz P., Morales N., 2009, *A&A*, 505, 1283
- Erard S. et al., 2018, *Planet. Space Sci.*, 150, 65
- Fernández Y. R., Jewitt D. C., Sheppard S. S., 2002, *AJ*, 123, 1050
- Fernández-Valenzuela E. et al., 2021, *Planet. Sci. J.*, 2, 10
- Flaugh B. et al., 2015, *AJ*, 150, 150
- Fraser W. C., Brown M. E., 2012, *ApJ*, 749, 33
- Fraser W. C., Brown M. E., Morbidelli A., Parker A., Batygin K., 2014, *ApJ*, 782, 100
- Fraser W. C., Brown M. E., Glass F., 2015, *ApJ*, 804, 31
- Fraser W. C. et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 80
- Fulchignoni M., Birlan M., Antonietta Barucci M., 2000, *Icarus*, 146, 204
- Fulchignoni M., Belskaya I., Barucci M. A., de Sanctis M. C., Doressoundiram A., 2008, in Barucci M. A., Boehnhardt H., Cruikshank D. P., Morbidelli A., Dotson R., eds, *The Solar System Beyond Neptune*. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p.181
- Gavrishin A. I., Coradini A., Ceroni P., 1992, *Earth Moon Planets*, 59, 141
- Gerdes D. W. et al., 2016, *AJ*, 151, 39
- Gerdes D. W. et al., 2017, *ApJ*, 839, L15
- Gladman B., Volk K., 2021, *ARA&A*, 59, 203
- Hainaut O. R., Delsanti A. C., 2002, *A&A*, 389, 641
- Harris A. W., Harris A. W., 1997, *Icarus*, 126, 450
- Hasselmann P. H., Carvano J. M., Lazzaro D., 2013, in Proceedings of the 12th Python in Science Conference (SciPy 2013). SciPy, Austin, TX, p. 48
- Henghes B. et al., 2021, *PASP*, 133, 014501
- Huang Y., Gladman B., Volk K., 2022, *ApJS*, 259, 54
- Hughes D. W., 2003, *MNRAS*, 345, 981
- Ivezić, Ž. et al., 2019, *ApJ*, 873, 111
- Kaufman L., Rousseeuw P. J., 2009, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons, New York, p. 344
- Kavelaars J., Petit J.-M., Gladman B., Bannister M., Alexandersen M., Chen Y.-T., Gwyn S., Volk K., 2022, in AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, p. 105.07
- Kessler R. et al., 2015, *AJ*, 150, 172
- Khain T. et al., 2018, *AJ*, 156, 273
- Khain T. et al., 2020, *AJ*, 159, 133
- Khare B. N., Thompson W. R., Cheng L., Chyba C., Sagan C., Arakawa E. T., Meisse C., Tuminello P. S., 1993, *Icarus*, 103, 290
- Lacerda P., Luu J., 2006, *AJ*, 131, 2314
- Lacerda P. et al., 2014, *ApJ*, 793, L2
- Lin H. W. et al., 2019, *Icarus*, 321, 426
- Liu P.-Y., Ip W.-H., 2019, *ApJ*, 880, 71
- LSST Science Collaboration, 2009, preprint (arXiv:0912.0201)
- Markwardt L., Holler B. J., Lin H. W., Gerdes D. W., Adams F. C., Malhotra R., Napier K. J., 2023, preprint (arXiv:2310.03998)
- Marsset M. et al., 2019, *AJ*, 157, 94
- Marsset M. et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 160
- Merlin F., Hromakina T., Perna D., Hong M. J., Alvarez-Candal A., 2017, *A&A*, 604, A86
- Morbidelli A., Nesvorný D., 2020, in Prialnik D., Barucci M. A., Young L., eds, *The Trans-Neptunian Solar System*. Elsevier, Amsterdam, p. 25
- Morgado B. E. et al., 2023, *Nature*, 614, 239
- Morganson E. et al., 2018, *PASP*, 130, 074501
- Muinenen K., Belskaya I. N., Cellino A., Delbò M., Lvasseur-Regourd A.-C., Penttilä A., Tedesco E. F., 2010, *Icarus*, 209, 542
- Müller T. G. et al., 2010, *A&A*, 518, L146
- Müller T., Lellouch E., Fornasier S., 2020, in Prialnik D., Barucci M. A., Young L., eds, *The Trans-Neptunian Solar System*. Elsevier, Amsterdam, p.153
- Napier K. J. et al., 2021, *Planet. Sci. J.*, 2, 59
- Nesvorný D. et al., 2020, *AJ*, 160, 46
- Ofek E. O., 2012, *ApJ*, 749, 10
- Ortiz J. L. et al., 2012, *Nature*, 491, 566
- Ortiz J. L. et al., 2017, *Nature*, 550, 219
- Ortiz J. L., Sicardy B., Camargo J. I. B., Santos-Sanz P., Braga-Ribas F., 2020, in Prialnik D., Barucci M. A., Young L., eds, *The Trans-Neptunian Solar System*. Elsevier, Amsterdam, p. 413
- Pan J. et al., 2022, *Planet. Sci. J.*, 3, 269
- Peixinho N., Doressoundiram A., Delsanti A., Boehnhardt H., Barucci M. A., Belskaya I., 2003, *A&A*, 410, L29
- Peixinho N., Delsanti A., Guilbert-Lepoutre A., Gafeira R., Lacerda P., 2012, *A&A*, 546, A86
- Peixinho N., Delsanti A., Doressoundiram A., 2015, *A&A*, 577, A35
- Peixinho N., Lacerda P., Kokotanekova R., 2023, *Asteroids, Comets, Meteors Conference*, LPI Contributions, Vol. 2851, p. 2552
- Penttilä A., Shevchenko V. G., Wilkman O., Muinenen K., 2016, *Planet. Space Sci.*, 123, 117
- Pereira C. L. et al., 2024, *MNRAS*, 527, 3624
- Perna D. et al., 2010, *A&A*, 510, A53
- Petit J. M., Kavelaars J. J., Gladman B., Loredó T., 2008, in Barucci M. A., Boehnhardt H., Cruikshank D. P., Morbidelli A., Dotson R., eds, *The Solar System Beyond Neptune*. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 71
- Pike R. E. et al., 2017, *AJ*, 154, 101
- Pike R. E. et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 200
- Pinilla-Alonso N. et al., 2021, DiSCO-TNOs: Discovering the composition of the trans-Neptunian objects, icy embryos for planet formation, JWST Proposal. Cycle 1, ID. #2418
- Pinilla-Alonso N. et al., 2025, *Nat. Astron.*, 9, 230 (PnA)
- R Core Team, 2021, R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>
- Russell H. N., 1916, *ApJ*, 43, 173
- Sagan C., Khare B. N., 1979, *Nature*, 277, 102
- Santos-Sanz P., Ortiz J. L., Barrera L., Boehnhardt H., 2009, *A&A*, 494, 693

- Schemel M., Brown M. E., 2021, *Planet. Sci. J.*, 2, 40
- Schwamb M. E. et al., 2019, *ApJS*, 243, 12
- Sheppard S. S., Jewitt D. C., 2002, *AJ*, 124, 1757
- Sheppard S. S., Lacerda P., Ortiz J. L., 2008, in Barucci M. A., Boehnhardt H., Cruikshank D. P., Morbidelli A., eds, *Photometric Lightcurves of Transneptunian Objects and Centaurs: Rotations, Shapes, and Densities*. Univ. Arizona Press, Tucson, AZ, p. 129
- Sicardy B. et al., 2011, *Nature*, 478, 493
- Tegler S. C., Romanishin W., 1998, *Nature*, 392, 49
- Tegler S. C., Romanishin W., 2000, *Nature*, 407, 979
- Tegler S. C., Romanishin W., Consolmagno G. J., 2003, *ApJ*, 599, L49
- Tegler S. C., Romanishin W., Consolmagno G. J. J. S., 2016, *AJ*, 152, 210
- Tiscareno M. S., Malhotra R., 2003, *AJ*, 126, 3122
- Trujillo C. A., Brown M. E., 2002, *ApJ*, 566, L125
- Willmer C. N. A., 2018, *ApJS*, 236, 47
- ¹ *Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristino 77, CEP 20921-400, Rio de Janeiro - RJ, Brazil*
- ² *Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LINEA) and INCT do e-Universo. Av. Pastor Martin Luther King Jr, 126 Del Castilho, Nova América Offices, Torre 3000/sala 817 CEP: 20765-000, Rio de Janeiro - RJ, Brazil*
- ³ *Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ladeira Pedro Antônio 43, CEP 20.080-090, Rio de Janeiro - RJ, Brazil*
- ⁴ *Department of Astronomy and the DIRAC Institute, University of Washington, 3910 15th Ave NE, Seattle, WA 98195, USA*
- ⁵ *Department of Physics, University of Michigan, 450 Church Street, Ann Arbor, MI 48109-1107, USA*
- ⁶ *Federal University of Technology - Paraná (UTFPR / DAFIS), Rua Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil*
- ⁷ *Physics Institute, Federal University of Uberlândia (UFU), Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, MG 38408-100, Brazil*
- ⁸ *Cerro Tololo Inter-American Observatory, NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory, Casilla 603, La Serena, Chile*
- ⁹ *Fermi National Accelerator Laboratory, PO Box 500, Batavia, IL 60510, USA*
- ¹⁰ *Institute of Cosmology and Gravitation, University of Portsmouth, Portsmouth, PO1 3FX, UK*
- ¹¹ *Department of Physics & Astronomy, University College London, Gower Street, London, WC1E 6BT, UK*
- ¹² *Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, Stanford University, PO Box 2450, Stanford, CA 94305, USA*
- ¹³ *SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA*
- ¹⁴ *Instituto de Astrofísica de Canarias, E-38205 La Laguna, Tenerife, Spain*
- ¹⁵ *Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB, E-08193 Bellaterra (Barcelona) Spain*
- ¹⁶ *Department of Physics, IIT Hyderabad, Kandi, Telangana 502285, India*
- ¹⁷ *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Dr., Pasadena, CA 91109, USA*
- ¹⁸ *Institute of Theoretical Astrophysics, University of Oslo, PO Box 1029 Blindern, NO-0315 Oslo, Norway*
- ¹⁹ *Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA*
- ²⁰ *Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Universidad Autónoma de Madrid, E-28049 Madrid, Spain*
- ²¹ *Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA*
- ²² *Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), E-08034 Barcelona, Spain*
- ²³ *Institute of Space Sciences (ICE, CSIC), Campus UAB, Carrer de Can Magrans, s/n, E-08193 Barcelona, Spain*
- ²⁴ *Faculty of Physics, University Observatory, Ludwig-Maximilians-Universität, Scheinerstr. 1, D-81679 Munich, Germany*
- ²⁵ *Center for Astrophysical Surveys, National Center for Supercomputing Applications, 1205 West Clark St., Urbana, IL 61801, USA*
- ²⁶ *Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 W. Green Street, Urbana, IL 61801, USA*
- ²⁷ *School of Mathematics and Physics, University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia*
- ²⁸ *Department of Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA*
- ²⁹ *Santa Cruz Institute for Particle Physics, Santa Cruz, CA 95064, USA*
- ³⁰ *Center for Cosmology and Astro-Particle Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA*
- ³¹ *Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA*
- ³² *Australian Astronomical Optics, Macquarie University, North Ryde, NSW 2113, Australia*
- ³³ *Lowell Observatory, 1400 Mars Hill Rd, Flagstaff, AZ 86001, USA*
- ³⁴ *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*
- ³⁵ *LPSC Grenoble - 53, Avenue des Martyrs, F-38026 Grenoble, France*
- ³⁶ *Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, E-08010 Barcelona, Spain*
- ³⁷ *Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, Peyton Hall, Princeton, NJ 08544, USA*
- ³⁸ *Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15312, USA*
- ³⁹ *Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg, Gojenbergsweg 112, D-21029 Hamburg, Germany*
- ⁴⁰ *Department of Physics, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA*
- ⁴¹ *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), E-28040 Madrid, Spain*
- ⁴² *School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK*
- ⁴³ *Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA*
- ⁴⁴ *Argonne National Laboratory, 9700 S Cass Ave, Lemont, IL 60439, USA*
- ⁴⁵ *Department of Astronomy, University of California, Berkeley, 501 Campbell Hall, Berkeley, CA 94720, USA*
- ⁴⁶ *Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA*

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



Size and Shape of Jupiter Trojan (2207) Antenor from Stellar Occultations

F. S. Ferreira^{1,2} , J. I. B. Camargo^{1,2} , B. E. Morgado^{2,3} , V. F. Peixoto^{1,2,3} , J. Desmars^{4,5} , F. Braga-Ribas^{1,2,6} ,
 A. R. Gomes-Júnior^{2,7} , B. Sicardy⁴ , J. L. Ortiz⁸ , R. Vieira-Martins^{1,2} , C. L. Pereira^{1,2} , L. Liberato^{9,10} ,
 M. Assafin^{2,3} , Y. Kilic^{8,11} , R. C. Bouffleur^{1,2} , F. L. Rommel^{2,6,12} , G. Benedetti-Rossi² , M. V. Banda-Huarca^{1,2,13} ,
 F. Marchis^{14,15} , P. Tanga⁹ , B. Blanc¹⁵ , E. Bondoux⁹ , A. Burnett^{15,16} , S. Calavia-Belloc^{17,18,19} , O. Canales-Moreno^{17,18,19} ,
 N. Carlson²⁰ , M. Conjat²¹ , T. George²⁰ , R. Gonçalves²² , R. Iglesias-Marzoa²³ , G. Krannich²¹ , D. Lafuente-Aznar^{17,18,19} ,
 P. D. Maley^{20,24} , J. Marco²⁵ , C. Schnabel^{17,21} , D. Shand^{15,26} , and K. Wagner^{15,26}

¹ Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristiano 77, CEP 20921-400 Rio de Janeiro—RJ, Brazil; felipeferreira@on.br

² Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia—LIInEA, Av. Pastor Martin Luther King Jr, 126 Del Castilho, Nova América Offices, Torre 3000/sala 817 CEP: 20765-000, Brazil

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro—Observatório do Valongo, Ladeira Pedro Antônio 43, CEP 20.080-090 Rio de Janeiro—RJ, Brazil

⁴ IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Université, Sorbonne Université, Université Lille 1, CNRS UMR 8028, 77 Avenue Denfert-Rochereau 75014, Paris, France

⁵ Institut Polytechnique des Sciences Avancées IPSA, 63 Boulevard de Brandebourg, 94200 Ivry-sur-Seine, France

⁶ Federal University of Technology—Paraná (UTFPR/DAFIS), Rua Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

⁷ Federal University of Uberlândia (UFU), Physics Institute, Avenue João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, MG 38408-100, Brazil

⁸ Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n. 18008-Granada, Spain

⁹ Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, boulevard de l'Observatoire, CS 34229, 06304, Nice Cedex 4, France

¹⁰ UNESP—São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brazil

¹¹ TÜBITAK National Observatory, Akdeniz University Campus, Antalya 07058, Turkey

¹² Florida Space Institute, UCF, 12354, Research Parkway, Partnership 1 building, Room 211, Orlando, USA

¹³ Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Peru

¹⁴ SETI Institute, Carl Sagan Center, 339 N. Bernardo Avenue, Suite 200, Mountain View, CA, USA

¹⁵ Unistellar, 5 allée Marcel Leclerc, bâtiment B, Marseille, F-13008, France

¹⁶ School of Natural Resources and the Environment, University of Arizona, 1064 E Lowell Street, Tucson, AZ 85721, USA

¹⁷ Sabadell Astronomical Association, Carrer Prat de la Riba, s/n, 08206, Sabadell, Catalonia, Spain

¹⁸ Red Astronavarra Sarea de Navarra, Spain

¹⁹ Astrosedetania de Zaragoza, Spain

²⁰ International Occultation Timing Association (IOTA), PO Box 7152, WA 98042, USA

²¹ International Occultation Timing Association/European Section, Am Brombeerhag 13, 30459, Hannover, Germany

²² Polytechnic Institute of Tomar, Ci2-Smart Cities Research Center and Unidade Departamental de Matemática e Física (UDMF), 2300, Tomar, Portugal

²³ Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón, Plaza San Juan 1, 44001, Teruel, Spain

²⁴ NASA Johnson Space Center Astronomical Society, Houston, TX 77058, USA

²⁵ ASTER Agrupació Astronòmica Barcelona, Barcelona, Spain

²⁶ Department of Astronomy and Steward Observatory, University of Arizona, 933 N Cherry Avenue, Tucson, AZ 85719, USA

Received 2024 October 28; revised 2025 June 25; accepted 2025 July 2; published 2025 August 13

Abstract

Librating around the Lagrange L₅, the Jupiter's Trojan (2207) Antenor has been observed in recent years and its rotational light curve suggests it to be a very likely binary asteroid candidate. From stellar occultations, we report results from three events from Europe and North America to estimate the 2D apparent size and shape of Jupiter's Trojan (2207) Antenor. For the best-fitted ellipse in the sky-plane, we determined that Antenor has a 2D apparent equatorial radius of 54.30 ± 0.99 km at the moment of the occultations, with an apparent oblateness of 0.144 ± 0.051 . We highlight the positive detection from 2021 June 12, which shows an intriguing feature that can be interpreted as a very large topographical feature (of about 11 km) of the body or that can provide further evidence that this object is, in fact, a close or contact binary. We also determine astrometric positions, with uncertainties of a few milliarcseconds (mas) for our preferred solutions.

Unified Astronomy Thesaurus concepts: [Small Solar System bodies \(1469\)](#); [Asteroids \(72\)](#); [Stellar occultation \(2135\)](#); [Jupiter trojans \(874\)](#)

1. Introduction

Jupiter trojans are a population of small bodies that share the giant planet's orbit around the Sun. They are grouped and librating around two equilibrium points of the circular restricted three-body problem, known as the Lagrange L₄ and L₅ points, in a 1:1 mean motion resonance. They are thought to be planetesimals captured from a larger population that existed in the planetary region when Jupiter was formed

and/or migrated (see A. Morbidelli et al. 2005; D. Nesvorný et al. 2013; W. F. Bottke et al. 2023). The first observations of Jupiter's trojans were between 1906 and 1907, with the observations of three small bodies, later named Achilles, Patroclus, and Hektor (S. B. Nicholson 1961). Since then, more than 7500 Jupiter Trojans and more than 5800 candidates are currently known.²⁷

These small bodies can provide key details on the history and dynamic evolution of our solar system. Their composition and physical properties, such as their size and shape, can

Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](#). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

²⁷ Minor Planet Center website: <https://www.minorplanetcenter.net/>, last checked on May/2024.

provide insights into the condition of the solar nebula in the region where they formed. Discovered in 1977, (2207) Antenor is among the largest Jupiter Trojans and is orbiting the Lagrangian point L5.²⁸ Its rotational light curve has been observed several times over the years, showing a rotational period near 7.964 ± 0.001 hr, an amplitude varying from 0.19 to 0.24 mag (S. Mottola et al. 2011; R. D. Stephens & D. R. Coley 2017; R. D. Stephens et al. 2018; R. D. Stephens & B. D. Warner 2019) and a proper frequency of $-15''.69$ per year (J. Hanuš et al. 2023). Also, R. D. Stephens et al. (2018) found deviations from the light curve suggestive of mutual events from a binary system. Thus, more investigations about its size and shape become relevant to better constrain its physical properties.

In this context, stellar occultation is a powerful technique for studying the sizes and shapes of small bodies in our solar system (J. L. Elliot 1979). A stellar occultation happens when one celestial body blocks the light of a background star. During this event, the shadow of the body can be observed as a sudden decrease in the measured light flux, the combination of the stellar flux and, in this case, the Trojan asteroid flux. By considering the relative velocity of the observer with respect to the body, the observation can be converted into a path on the sky, usually called *chord* in the sky plane (A. R. Gomes-Júnior et al. 2022; B. Sicardy et al. 2024).

This method can provide sizes and shapes down to km-level accuracy, reveal atmospheres, detect features like jets, satellites, and rings of the occulting body (B. Sicardy et al. 2011; J. L. Ortiz et al. 2012; F. Braga-Ribas et al. 2014; A. Dias-Oliveira et al. 2017; B. E. Morgado et al. 2023). Some previous works that have presented results for the physical properties of Jupiter Trojans from the stellar occultation technique can be found for (1437) Diomedes (I. Satō et al. 2000), (617) Patroclus and its nearly equal size moon (M. W. Buie et al. 2015), and (4709) Ennomos and (911) Agamemnon (V. G. Shevchenko et al. 2014). For this last one, the stellar occultation technique also revealed the presence of a satellite (B. Timerson et al. 2013).

In this paper, we present three stellar occultations by (2207) Antenor. The first one was on 2021 June 12, with one positive detection from Germany and two negatives from Spain. Then later, two multichord events were observed on 2021 July 10, with positive detections in France, Spain and Portugal, and the other one on 2021 August 26 from the United States and Canada.

2. Predictions and Observations

The prediction of the stellar occultation requires the knowledge of the position of the occulted star and the ephemeris of the occulting body. For the specific events present here, predictions were made within the framework of the European Research Council Lucky Star project.²⁹ The campaign was managed by the Occultation Portal website³⁰ described by Y. Kilic et al. (2022). Stellar positions are from the Gaia EDR3 (Gaia Collaboration 2022). Antenor’s ephemeris was calculated and is regularly updated, using the Numerical Integration of the Motion of an Asteroid (NIMA)

tool, which has been successfully used to determine the orbits of small bodies, described by J. Desmars et al. (2015), combined with astrometric observations carried out by various ground-based observatories—like Pico dos Dias Observatory (OPD³¹) and Haute-Provence Observatory (OHP³²)—and reduced with the PRAIA astrometry tool (M. Assafin 2023a).

Details about the observed occultations, like the date and time of the occultation and star parameters, can be found in Table 1, whereas the observation circumstances for these events like information of the site coordinates, details about the telescope and camera used and whether the detection of the occultation was positive or not, are shown in Table 2.

3. Data Analysis and Reduction

In this section, we provide a detailed overview of the data analysis process. A more complete description of the procedures regarding the stellar occultations technique and methodology can be found in B. Sicardy et al. (2024). Here, we begin with the acquired Flexible Image Transport System files and proceed to determine the light curves. All observations were tracked and all video data were corrected for timing shifts. This is done by investigating the camera features to determine, for instance, if the recorded time is that of the beginning, midtime or end of the frame. In our calculations, we standardize all frame times as those of the mid-times. From the light curves, we fit the occultation model and identify the occultation instants, as explained in Section 3.1. Finally, in Section 3.2, we describe how we projected the obtained times onto the tangent plane and fitted Antenor’s limb.

3.1. Photometry and Occultation Light Curves

The data sets for the events described were analyzed using the standard photometry procedures of the Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically (PRAIA; M. Assafin 2023b), through differential aperture photometry. The flux of the occulted star was corrected by the flux of the nearby reference stars for sky transparency variations and then normalized by the star plus occulted body flux. This step is made by applying a polynomial fit to the observed flux before and after the event.

To derive the immersion time (disappearance) and the emersion time (reappearance) of the occulted star by the main body we used the Stellar Occultation Reduction and Analysis package (SORA; A. R. Gomes-Júnior et al. 2022), fitting for each light curve a sharp edge occultation model, which includes Fresnel diffraction, the CCD bandwidth, the stellar apparent size in kilometers at the distance of the object, and the integration time of each image (see T. Widemann et al. 2009; F. Braga-Ribas et al. 2013; and references therein). The Fresnel scale is given by $f = \sqrt{\lambda D_o}/2$ for the diffraction observed in the wavelength λ from a distance to body D_o . For a typical observation in the visible light λ is ~ 550 nm. The values for the Fresnel scale and the star apparent diameter at the distance of the object are presented in Table 1. The fitting procedure was done using a standard χ^2 minimization procedure, where an adequate fitting is obtained when χ^2 per degree of freedom (χ^2_{pdf}) is close to the unity. The obtained immersion and emersion times and their error bars are shown

²⁸ Minor Planet Center—List of Jupiter Trojans: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/JupiterTrojans.html/>.

²⁹ Lucky Star Project website: <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>.

³⁰ Occultation Portal website <https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/>.

³¹ MPC code 874.

³² MPC code 511.

Table 1
Occulted Stars Parameters for Each Observed Event as Obtained from Gaia DR3

Occ. Date and Time (UTC)	Gaia EDR3 Source Identifier	R.A. ^a (hh:mm:ss ± mas)	decl. ^a (dd:mm:ss ± mas)	Star's <i>G</i> mag	Antenor's <i>V</i> mag	Event Velocity (km s ⁻¹)	Fresnel Scale (km)	Star Diam. (km)
2021-06-12 01:49:42.98	4100200978834179712	18 ^h 45 ^m 29 ^s .6986 (±0.019)	-15° 38' 55".771 (±0.020)	13.889	16.9	14.6	0.47	0.24
2021-07-10 00:56:52.52	4103087299953614720	18 ^h 31 ^m 04 ^s .3264 (±0.056)	-15° 58' 45".565 (±0.053)	12.608	16.9	16.0	0.47	2.49
2021-08-26 04:01:15.58	4097470749676146048	18 ^h 15 ^m 46 ^s .3889 (±0.016)	-17° 02' 49".535 (±0.016)	12.016	16.6	4.0	0.49	0.23

Note

^a The coordinates of the stars (R.A. and decl.) along with their associated uncertainties were propagated to the occultation epoch using the formalism suggested by A. G. Butkevich & L. Lindgren (2014) using the parameters (proper motion, parallax, radial velocity, etc.) from Gaia EDR3 (Gaia Collaboration 2022). Their uncertainties are presented in units of milliarcseconds (mas). The uncertainties in R.A. include the factor $\cos\delta$. Antenor has a *V* magnitude were obtained from (JPL Solar System Dynamics Group 2025), which can be used as a reference, but it is not directly comparable to *G* magnitude. The apparent stellar diameter is projected at the distance of the occulting object.

Table 2
Observation Circumstances for Antenor's Occultation Event

Site	Observer	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Telescope (mm)	Camera	Exp. Time	Detection	Sky
2021-06-12					Time	Source	(s)	SNR	Condition
Kaufering, Germany	Gregor Krannich	48°05'22".7793 N	10°50'57".9958 E	596	350	QHY174M-GPS	0.650	4.00	Positive Clear Calm
Barcelona, Spain	Jordi Marco	41°23'57".997 N	02°09'40".0223 E	77	235	ZWO ASI120MM	1.175	na	Negative Clear light air
Barcelona, Spain	Carles Schnabel	41°29'36".996 N	01°52'21" E	180	400	WATEC-910HX	0.160	na	Negative Clear Calm
2021-07-10									
Observatoire de la Côte d'Azur Nice, France	Matthieu Conjat	43°43'32".9016 N	7°17'59".3988 E	300.00	400	Asi 174mm	0.200	7.14	Positive Clear Calm
Botorrita, Spain	Oscar Canales-Moreno	41°29'50".55 N	1°15'12.12 W	403.00	500	Watec 120N	0.160	10.20	Positive Clear Calm
Linhaceira, Portugal	Rui Gonçalves	39°31'21".6768 N	8°23'1".68 W	90.00	254	Watec 910-HX	0.320	7.63	Positive Clear Calm
UniversCity Caussols, France	Luana Liberato	43°45'9".6012 N	6°55'18".192 E	1266.25	500	QHY 600M	0.500	14.70	Positive Clear light air
Javalambre Astrophysical Obser- vatory Teruel, Spain	Ramón Iglesias-Marzoa	40°2'30".48 N	1°0'58".68W	1957.00	Tx40 400	ProLine PL4720	2.000	27.78	Negative Clear light breeze
Observatori Astronòmic del Parc del Garraf Barcelona, Spain	Carles Schnabel	41°18'23".796 N	1°50'18".024W	297.00	280	Watec - 120N	0.640	9.00	Negative Clear Calm
2021-08-26									
Wickenburg, Arizona United States	Paul D. Maley	33°58'46".56N	112°42'42".48W	673.00	200	Watec 910-HX	0.066	7.25	Positive Clear Calm
Dateland, Arizona United States	Norman Carlson	32°45'25".854 N	113°38'26".6759 W	117.00	235	RunCam Night Eagle	0.300	6.17	Positive Clear Calm
Sentinel, Arizona United States	Kevin Wagner Alexandra Burnett Benoit Blanc	32°49'32".5 N	113°12'26".8 W	227	eVscope 1 114	IMX224	0.300	6.85	Positive Clear Calm
Kelsey, Manitoba Canada	Delwin Shand	53°49'18".4 N	101°16'34".7 W		eVscope 1 114	IMX224	0.300	4.71	Positive Clear Calm
Scottsdale, Arizona United States	Tony George	33°49'0".0984 N	111°52'7".2984 W	843.00	300	Watec 910-HX	0.067	na	Negative Clear Calm

Note. Data for the negative detections from June 12 and August 26 were not available (na).

Table 3
Fitted Times Obtained for Each Light Curve with a Positive Detection

Site	Immersion (UT)	Emersion (UT)	Chord's Size (km)	χ^2_{pdf}	σ_{LC}
2021 Jun 12					
Kaufering, Germany,	01:47:56.36 \pm 0.13	01:48:02.37 \pm 0.16	89.93 \pm 3.30	1.25	0.232
Kaufering, Germany, Seg. 1	01:47:56.36 \pm 0.13	01:47:58.74 \pm 0.14	35.56 \pm 2.88	0.76	0.232
Kaufering, Germany, Seg. 2	01:47:59.50 \pm 0.14	01:48:02.37 \pm 0.16	42.77 \pm 3.21	0.76	0.232
2021 Jul 10					
Nice, France	00:53:35.10 \pm 0.03	00:53:40.53 \pm 0.03	88.29 \pm 0.66	0.97	0.140
Botorrita, Spain	00:54:07.86 \pm 0.02	00:54:14.18 \pm 0.03	105.90 \pm 0.53	1.04	0.098
Linhaceira, Portugal	00:54:41.54 \pm 0.04	00:54:48.26 \pm 0.04	109.58 \pm 1.00	0.96	0.131
Caussols, France	00:53:36.93 \pm 0.04	00:53:42.58 \pm 0.04	91.95 \pm 0.92	0.98	0.080
2021 Aug 26					
Wickenburg, USA	03:42:35.97 \pm 0.01	03:42:59.86 \pm 0.01	100.775 \pm 0.04	0.83	0.150
Dateland, USA	03:43:02.87 \pm 0.02	03:43:26.74 \pm 0.02	85.443 \pm 0.09	0.96	0.162
Sentinel, USA	03:42:57.50 \pm 0.03	03:43:21.95 \pm 0.05	103.217 \pm 0.19	0.90	0.146
Kelsey, USA	03:37:40.52 \pm 0.06	03:38:04.41 \pm 0.05	99.006 \pm 0.25	0.90	0.175

Note. Uncertainties of the immersion and emersion times are given in seconds of UT.

in Table 3 together with the chord's size, the minimal χ^2_{pdf} obtained and light curve standard deviation (noise; σ_{LC}) in normalized flux units. Also, as a test, we reanalyzed two curves from the JUL/10 event (Linhaceira and Nice; see Table 2) without including Fresnel diffraction in the model. The differences found for the respective immersion and emersion times given by Table 3 are two times smaller than their uncertainties.

3.2. Geometric Reconstruction

The immersion and emersion times were projected onto the sky plane into chords, and their extremities were used to fit the shape of Antenor's limb at the moment of the occultations. The chord's accuracy depends primarily on the precision of the times obtained from the light curve. To date, no 3D shape has been published for Antenor. So, as a first approximation, we assume that the occulting body limb at the moment of both occultations can be approximated by an elliptical shape and described by five parameters: the center coordinates (f_0, g_0) for each occultation which measures R.A. and decl. offsets, the apparent equatorial radius (a'), the apparent oblateness (ϵ) and the position angle of the pole (P) (B. E. Morgado et al. 2021; A. R. Gomes-Júnior et al. 2022).

As will be shown in Section 4, Antenor fortuitously presented almost the same rotational phase in the observations of the July and August events, so we combined those two multichords occultations by fitting them with seven varying parameters (the elliptical shape plus one center for each occultation). The event observed in June is handled separately.

The fitted parameters and their 1σ uncertainties are determined through minimizing the reduced χ^2 via a Monte Carlo approach. For this, we used an algorithm based on the description presented by A. R. Gomes-Júnior et al. (2022).

4. Results

In this section, we detail our results. In Section 4.1 we present the determination of Antenor's 2D limb size and shape as seen in the sky plane at the moment of two multichord occultations (2021 July 10 and 2021 August 26). Furthermore,

in Section 4.2, we present the results of the 2021 June occultation. Despite being observed by only one observer, it may contain an intriguing feature suggesting that Antenor can be, actually, a close or contact binary.

4.1. Stellar Occultation on 2021 July 10 and 2021 August 26

The July 10 event was recorded by six observational stations, four of them with positive detections and two with negative ones. The observation in France had the support of the UniversCity telescope, which was developed with the goal of robotically and systematically observing stellar occultations by minor planets (J. F. Ferreira et al. 2020). The event had a shadow velocity of 15.98 km s^{-1} . The August 26 event, with the three positive detections in the United States, had a shadow velocity of 4.01 km s^{-1} . Table 2 shows details about each site, the characteristics of the cameras that recorded the event, and the exposure times.

After normalizing the light curve using PRAIA, we obtained the immersion and emersion times (Table 3) of the occulted stars using the procedures from the SORA library, as already described. The normalized light curves for these two events are shown in Figures 1 and 2. Also, the immersion and emersion times are used to project the chords onto the sky plane. The extremity of each chord can fit the apparent shape for its respective observation, providing the geometric reconstruction of the object, whose steps are described in Section 3.2.

One important aspect is that considering Antenor's rotational period of $7.964 \pm 0.001 \text{ hr}$ (R. D. Stephens & B. D. Warner 2019), we compute the differential rotational phase between both multichords occultations (July 10 and August 26) to be around 0.016 ± 0.018 , which means a difference of 5.8 ± 6.5 . Considering the fact that Antenor has an orbital period of 11.76 yr and, taking its position vectors on July 10 and August 26 (dates of both multichords' stellar occultations), an angle of 3.86° (rotational phase of 0.01) is found.

In addition, it should be noted that the light times on those dates differ by less than 4 minutes. Therefore, if we start

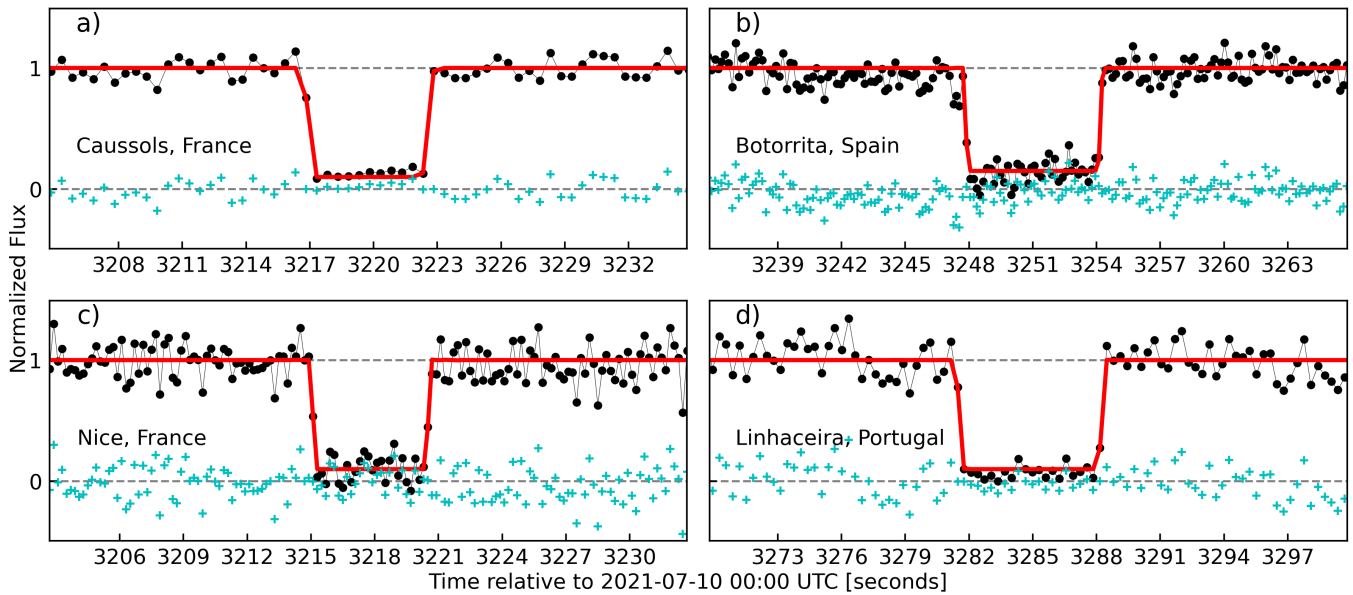


Figure 1. Light curves for the occultation that occurred on 2021 July 10. The black line indicates the observed data, while the red line represents the modeled light curve. The cyan markers depict the residuals. The light curves are from (a) Caussols (France), (b) Botorrita (Spain), (c) Nice (France), and (d) Linhaceira (Portugal), with their respective observers listed in Table 2.

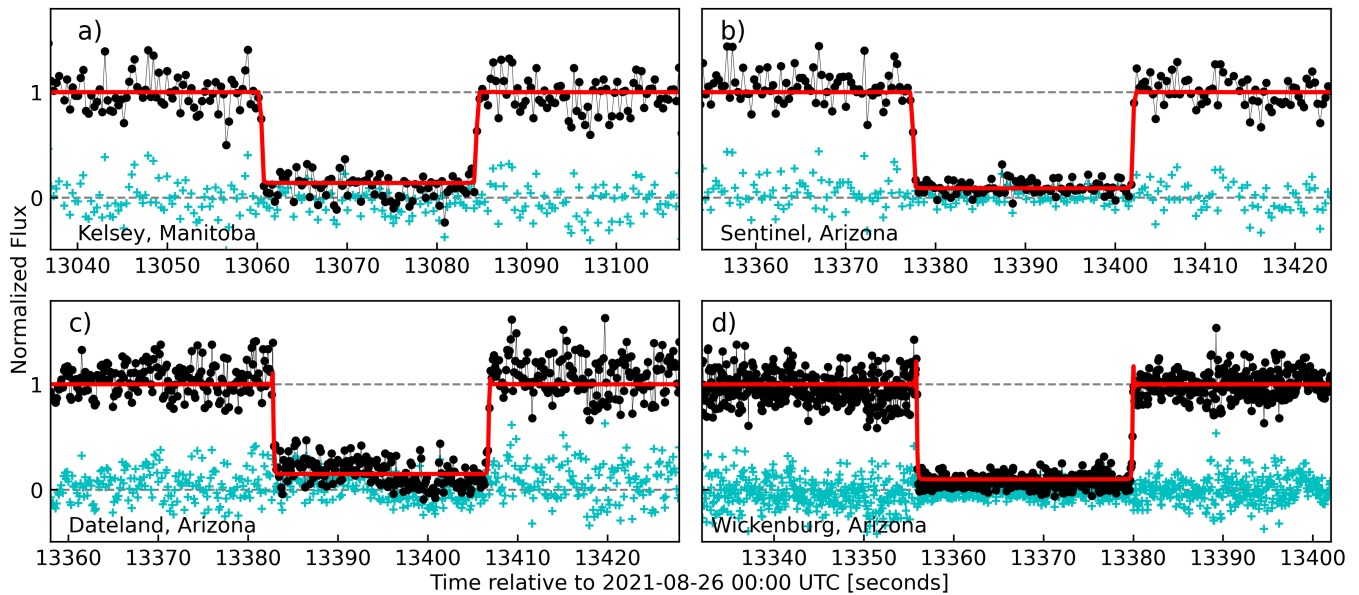


Figure 2. Light curves for the 2021 August 26 occultation. The black line represents the observed data and the red line is the modeled light curve. The cyan markers are the residuals. The light curves are from (a) Kelsey (Canada), (b) Sentinel (USA), (c) Dateland (USA), and (d) Wickenburg (USA), whose respective observers are listed on Table 2.

counting time on the date when the object is closer, we will observe after some time a phase that is less than 4 minutes—roughly 3° —later with respect to the one that would have been observed under no change in distance. The fortuitous combination of these three facts (rotational period, orbital motion, and time lag) means that we observed approximately the same projected face during both events, assuming that Antenor is not highly irregular.

Figure 3 displays the best-fitted ellipses along with their respective 1σ regions, representing Antenor’s limb for observations on July 10 and August 26. By analyzing both multichord events discussed here, we derived a global 2D apparent elliptical shape with a semimajor axis of 54.30 ± 0.99 km and an apparent

oblateness of 0.11 ± 0.05 . This indicates an area equivalent radius³³ of 50.86 ± 1.13 km. Furthermore, a radial dispersion of 2.20 km was obtained. This dispersion may be indicative of topographical features up to this level in the radial direction apart from the obtained elliptical global shape for this body, and assuming topographic features up to this value, we obtained a minimal chi-square per degree of freedom (χ^2_{pdf}) of 1.35 (see discussion in A. R. Gomes-Júnior et al. 2022).

³³ Area equivalent radius (R_{eq}) is the radius of the circle whose area is equivalent to the fitted ellipse ($R_{\text{eq}} = \sqrt{a \times b}$, where a is the apparent semimajor axis and b is the apparent semiminor axis), measured in kilometers (see A. R. Gomes-Júnior et al. 2022).

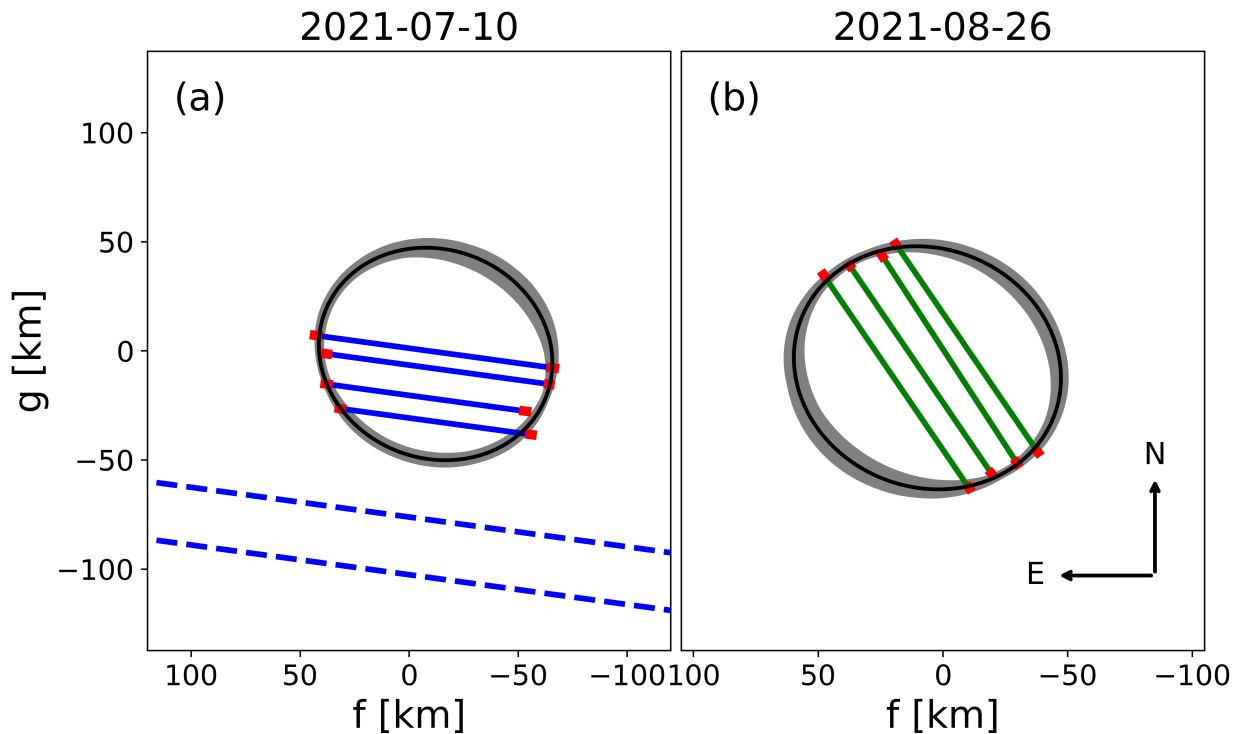


Figure 3. Chords in the sky plane relative to Antenor (in blue and green), and their uncertainties (in red). The black line is the best-fitted ellipse, and all the ellipses in the 1σ region are in gray. The left panel (a) is the event on 2021 July 10, and the right panel (b) is the event on 2021 August 26. The dashed lines stand for the negative chords of the July occultation. The data for the negative observation of August 26 was not provided by the observer.

The physical parameters of the fitted ellipse are presented in Table 4. It is important to highlight that the fitted ellipse is used to mainly assess dimensions of the body and not its 3D shape. Results from these two occultations by Antenor are also presented by J. Hanuš et al. (2023), who determined an area equivalent of 101 ± 3 km, which is in good agreement with the 101.7 ± 2.3 km we found in the present manuscript.

The 2021 August 26 data in J. Hanuš et al. (2023) show two chords (this paper shows four) and they considered the occultations individually, not combined as we did. We presented, however, this result in a separated image procedure since they show more trustworthy uncertainties based on our methodology. The combined solution gives a more accurate equivalent diameter as compared to that obtained from analyzing the July and August observations separately. In addition, we also presented an astrometric results using NIMA solution (see Section 4.3). It is important to highlight that the obtained area equivalent radius of 50.86 ± 1.13 km is also close to the value 48.8 ± 0.2 km published by T. Grav et al. (2012), which used thermal data from NEOWISE.

4.2. Stellar Occultation on 2021 June 12

The occultation observed on June 12 had only one positive detection with a shadow velocity of 14.63 km s^{-1} . One interesting fact about this event is a flux increase in the middle of the occultation, which can be attributed to the reappearance of the occulted star during the occultation. Figure 4 shows a sequence of images and points of the event, where we can see the increase of the flux of the star during the occultation (see point (3)). This kind of feature may indicate a large topographical feature of the body or binarity. Considering this peculiarity, we fitted two models: (i) a single occultation model as described in Section 3.1; and (ii) a model containing two occultation models, both of them affected

Table 4
Physical Parameters of the Fitted Ellipse

	2021 Jul 10	2021 Aug 26
f_0 (km)	-12.14 ± 1.21	$+6.23 \pm 2.73$
g_0 (km)	-1.41 ± 2.65	-6.78 ± 1.71
Apparent semimajor axis (km)	54.30 ± 0.99	
Apparent semiminor axis (km)	47.91 ± 2.15	
Apparent equivalent radius (km)	50.86 ± 1.13	
Apparent oblateness	0.114 ± 0.051	
Position angle of the minor axis (deg)	159.3 ± 10.3	

by the same effects (diffraction, stellar diameter, and instrumental response). In the first model, two parameters were fitted: the immersion and emersion times. On the other hand, the second model considered four parameters (e.g., the immersion and emersion times for each occultation).

To check whether the best model that fits our data set is the single box or double box, we applied a Fisher–Snedecor F-test to the residual of both models, which compares the variances of two samples under the null hypothesis that they result from the same distribution. Suppose the f value is smaller than a critical value (considering a typical probability). In that case, we fail to disprove the null hypothesis, meaning there are no significant variations between both distributions. We only considered the points close to the occultation and, as a result, we obtained a f value of 1.5288 with a critical value of 1.4451 for a probability of 80%. Thus, considering an 80% probability, the second model fits the data better. Even though this is not a strong evidence (larger than 99%, for instance), it is indicative that it is not a simple noise contamination and can be interpreted as Antenor’s having a more complex shape than a simple ellipsoid

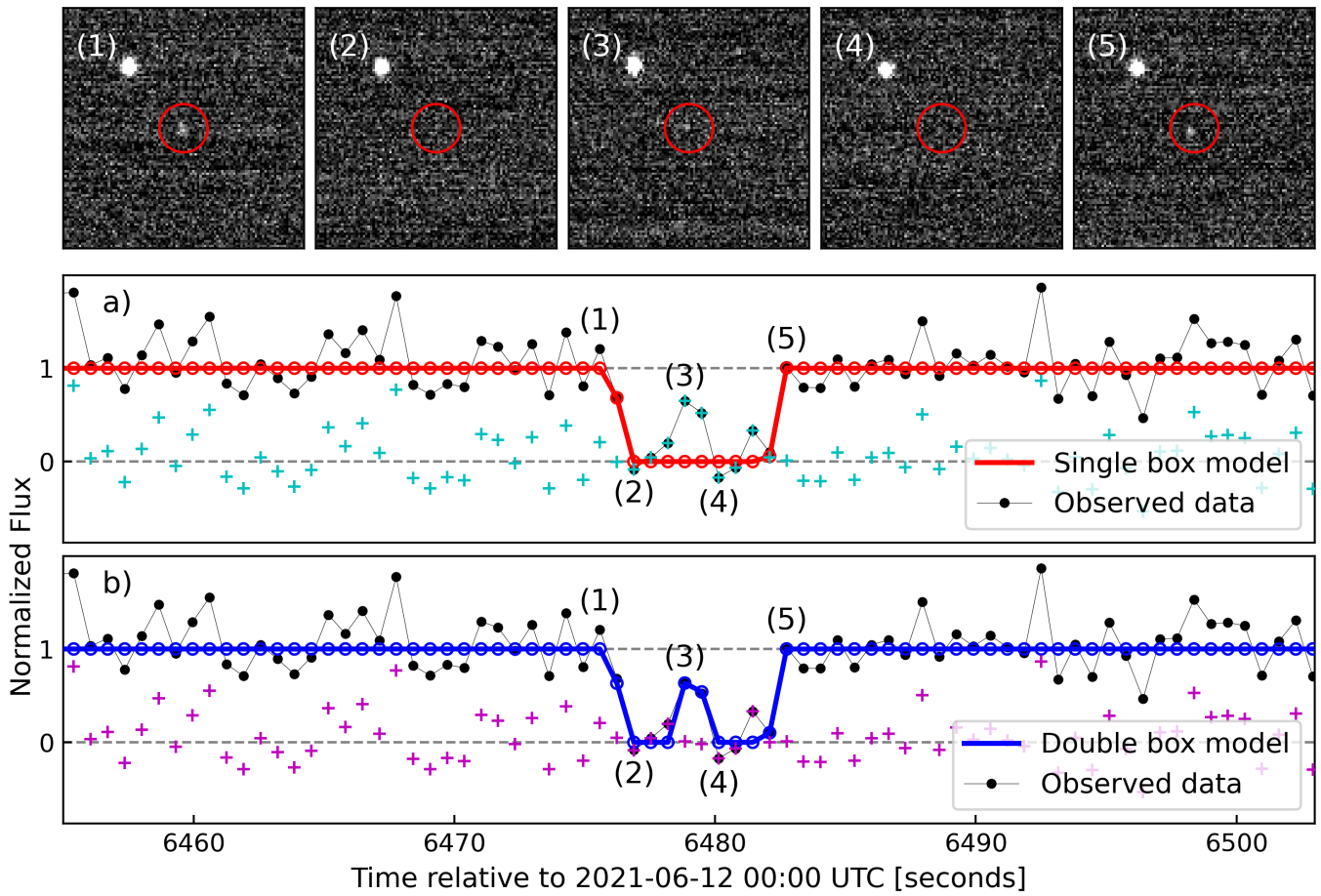


Figure 4. Double-chord observed for 2021 June 12 occultation. The figure presents a sequence of images showing the moment of the occultation by Antenor in 2021 June 12. The points (1), (2), (3), (4), and (5) represents five moments of the occultation event. The moment when the star flux increases during the occultation is represented by the point (3). The figure also shows the double drop of the observed data (black line), the single box model (red line, panel (a)), and the double box model (blue line, panel (b)). After applying a F-test statistic, it was verified that the double box model best fits the data set considering a probability of 80%.

can explain. A few examples of possible explanations would be: Antenor’s has a large topographical feature or this object is, in fact, a close binary. However, without more and better data, it is impossible to pinpoint exactly which scenario is more likely. Figure 4 shows the light curve for this observation and also presents the fitting for the single box model (in red) and for the double box model (in blue).

The occultation instants using both models can be found in Table 3. We then projected these instants on the sky plane as chords as described in Section 3.2. Moreover, again assuming the Antenor’s rotational period, we computed the differential rotational phase between this occultation and the others, and obtained a value of 0.286 ± 0.028 or 102.92 ± 10.23 , which means that now we are observing a completely different face of Antenor. We estimated the length of the space between the two chords’ segments and obtained the size of 11.38 ± 2.98 km.

Without further information on the object’s shape, we can not pinpoint exactly where Antenor’s center is, which means we can not say with certainty if this chord is near the edge or the center line. However, as a first-order estimation, we considered a circular solution of radius 50.86 ± 1.13 km as the value obtained in Section 4.1, which resulted in two possible solutions as illustrated in Figure 5. One solution is with the center to the North of the chord (in black), and the second with the center to the South (in blue). A more

conservative approach is to combine both positions, having the mean value as the best-fitted value, with a larger uncertainty (see discussion in F. L. Rommel et al. 2020). Moreover, it is unlikely that the north solution is correct, as it presents an offset larger than the expected value of the uncertainty of Antenor’s ephemeris, see details in Section 4.3.

4.3. Astrometrical Measurements and Orbital Improvement

A result of this technique is the geocentric astrometric position of Antenor at the occultation instants. These results are shown in Table 5. The uncertainties are presented in milliarcseconds (mas) and those in R.A. include the multiplication by $\cos\delta$. To better understand how our data improved Antenor ephemeris, we used NIMA (J. Desmars et al. 2015) to fit two sets of data: the first, with all available data on MPC, and data from GaiaFPR (P. Tanga et al. 2023) and proprietary astrometrical positions obtained at OPD and OHP; the second with the first set plus the preferred occultation positions presented here. Figures 6 and 7 show these orbital fittings and the difference between the new NIMA v5 ephemeris and JPL62 solution. As mentioned earlier in the text, the astrometry for the June event is model dependent and a better constraint on Antenor’s shape is expected to highly improve this result.

Table 5
Astrometric Object Position

Date and Time (UTC)	R.A.	decl.	Comment
2021-06-12 01:49:42.980	$18^{\text{h}}45^{\text{m}}29^{\text{s}}.6915281 \pm 0.567$ mas	$-15^{\circ}38'53''.980590 \pm 1.617$ mas	Center to the North
2021-06-12 01:49:42.980	$18^{\text{h}}45^{\text{m}}29^{\text{s}}.6915814 \pm 0.598$ mas	$-15^{\circ}38'53''.996995 \pm 1.641$ mas	Center to the South ^a
2021-06-12 01:49:42.980	$18^{\text{h}}45^{\text{m}}29^{\text{s}}.6915555 \pm 0.968$ mas	$-15^{\circ}38'53''.988804 \pm 9.827$ mas	Combined solution
2021-07-10 00:56:52.520	$18^{\text{h}}31^{\text{m}}04^{\text{s}}.3100087 \pm 0.507$ mas	$-15^{\circ}58'43''.998811 \pm 0.932$ mas	Same shape as 2021-08-26
2021-08-26 04:01:15.580	$18^{\text{h}}15^{\text{m}}46^{\text{s}}.3494335 \pm 0.815$ mas	$-17^{\circ}02'49''.230749 \pm 0.519$ mas	Same shape as 2021-07-10

Note.

^a Preferred solution due to smaller offset relative to Antenor’s ephemeris. The uncertainties are presented in units of milliarcseconds (mas) and those in R.A. are multiplied by $\cos \delta$.

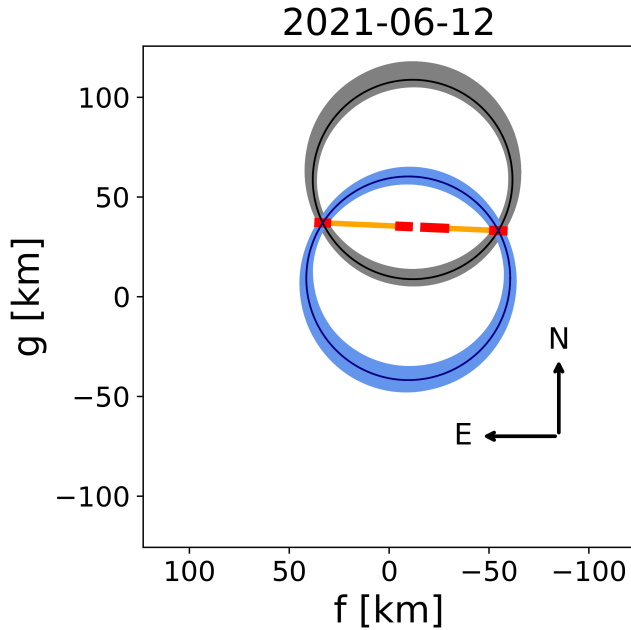


Figure 5. Best-fitted limb to the double-chord and ellipses within their respective 1σ region. Two solutions can be obtained, one with the center north of the chord (in black), and another to the south (in blue). The solution in blue is the preferred solution.

Our orbital fitting using NIMA provided ephemeris with uncertainties below 15 mas up to 2026, which translates to 46 km projected at Antenor’s distance. Without using these occultations data Antenor ephemeris would have uncertainties of 30 mas up to 2026 (92 km at Antenor’s distance), which is larger than Antenor’s radius of 50.83 km. This new ephemeris allows the prediction of future accurate stellar occultations with an expected high success rate. This new ephemeris is publicly available at the Lucky Star webpage.³⁴

5. Albedo

The accurate diameter of Antenor, projected onto the plane of sky, encourages the determination of its geometric albedo. However, due to its relatively short orbital period around the Sun (as compared to trans-Neptunian objects, for instance), attention must be made on the dependency between the absolute magnitude and the aspect angle (angle between the asteroid’s spin axis and the viewing direction; see B. Carry et al. 2024 for more details).

In this context, we took³⁵ a set of 14 apparent magnitudes in the filter g and 12 apparent magnitudes in the filter r of Antenor, obtained by the Zwicky Transient Facility (ZTF; F. J. Masci et al. 2019) in 2021 June, July and August. Therefore, close to the dates of the events considered here.

Absolute magnitudes in both filters were then calculated using the *HG1G2* model (K. Muinonen et al. 2010). These values are $H_g = 9.159_{-0.099}^{+0.101}$, $G1_g = 0.444_{-0.349}^{+0.118}$, $G2_g = 0.354_{-0.128}^{+0.198}$ and $H_r = 8.674_{-0.095}^{+0.106}$, $G1_r = 0.094_{-0.086}^{+0.298}$, and $G2_r = 0.615_{-0.163}^{+0.112}$ (1σ confidence intervals). The model fit along with different confidence intervals are shown in Figure 8.

A rotational light curve model could not be determined from the set of ZTF measurements used here. However, we can include the effect of Antenor’s rotation in the uncertainty of the absolute magnitudes in both filters by following, for instance, the procedure detailed below used by F. S. Ferreira et al. (2025):

1. For the magnitude measurements in each band (g , r), we determine the respective reduced magnitudes (y axis values in both panels of Figure 8). These are the observed apparent magnitudes normalized by Antenor’s distance from the Sun and from the observer or, more specifically, $m - 5 \log(R\Delta)$, where m is the observed apparent magnitude, R is the distance to the observer and Δ is the heliocentric distance.
2. To each reduced magnitude, the value of the function $f(\phi) = A \times \sin(\phi)$ is determined for ϕ randomly chosen in the interval $[0; 2\pi[$, with $A = 0.19$. It is clear that, here, we adopt a light curve with an amplitude of 0.19 mag (S. Mottola et al. 2011) and a sinusoidal shape. Note that a different model would only influence the uncertainties of the absolute magnitudes in each filter only and not their final values under the reasonable hypothesis that rotational phase and the ZTF observation dates are not correlated. Given the scarcity of data, the choice for a simple shape model (sine wave in our case) is a sensible choice.
3. To fully account for the variance in the ZTF data, magnitudes used in the simulation are random values sampled from a normal distribution centered on the reduced magnitude value, with a variance corresponding to the uncertainty of the apparent magnitude ($\pm 1\sigma$).
4. Values of $H_{g,r}$, $G1_{g,r}$ and $G2_{g,r}$ were determined using least squares minimization applied to *HG1G2* phase curve models, through a constrained optimization linear approximation algorithm (M. J. D. Powell 1994).

³⁴ Available at <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=1045>.

³⁵ <https://fink-broker.org/>

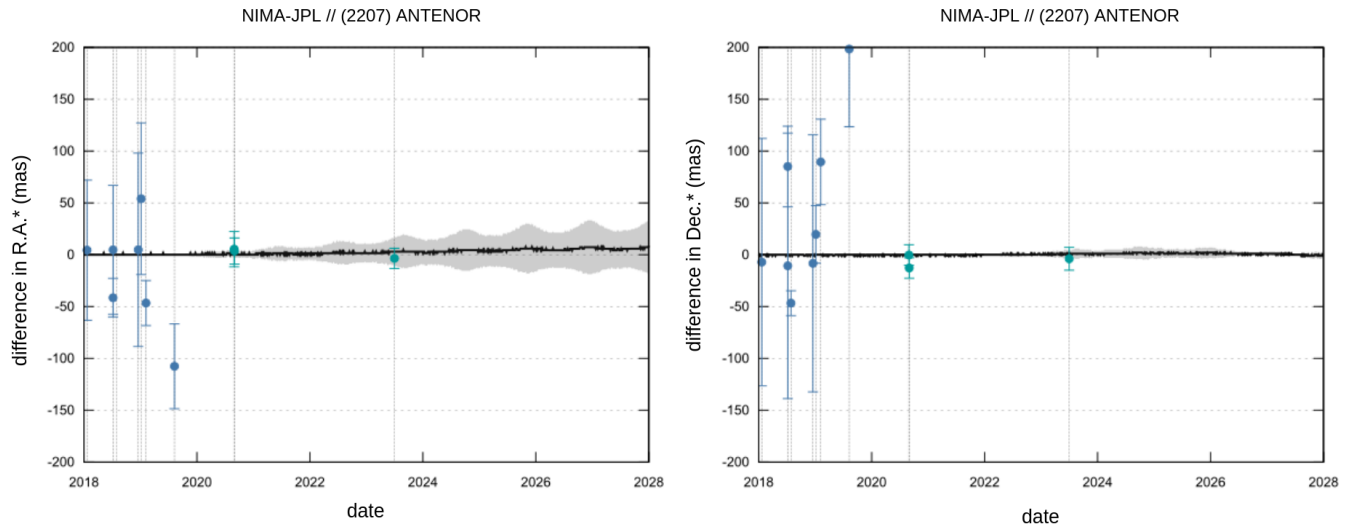


Figure 6. Difference between JPL ephemeris and NIMA solution in R.A. (left panel) and decl. (right panel) considering all data available on MPC and proprietary astronomical positions obtained at OPD and OHP (cyan dots), plus data from GaiaFPR (blue dots). The gray region delimits the 1σ uncertainty of the NIMA ephemeris.

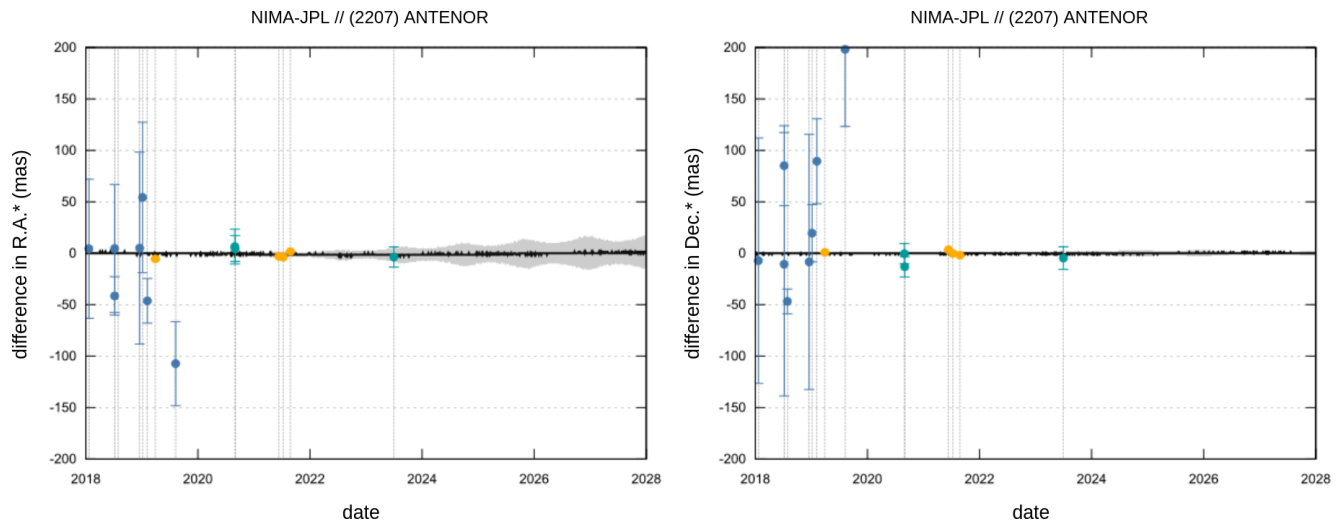


Figure 7. Difference between JPL ephemeris and NIMA solution with the data presented in Figure 6 plus the preferred astrometrical positions obtained in the project and presented in Table 5 (yellow dots). Note that the gray region that delimits the 1σ uncertainty of the NIMA ephemeris is smaller than the one presented in Figure 6 by a factor of ~ 2 .

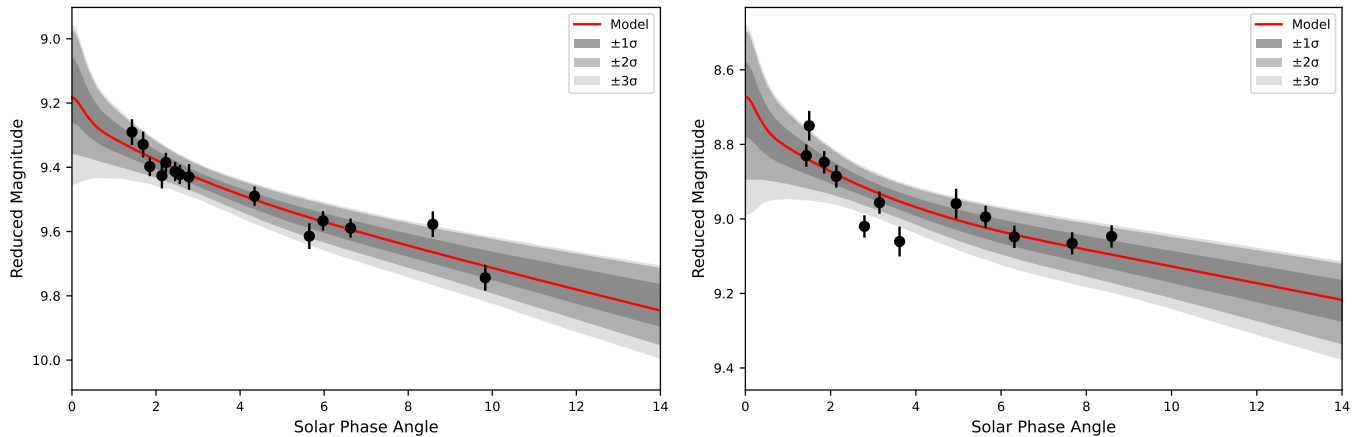


Figure 8. Apparent magnitude reduced to unit distance as a function of the Solar phase angle. Left plot: *g* filter. Right plot: *r* filter. Photometric measurements are from the Zwicky Transient Facility. The error bars have a total length of 2σ and take into consideration the observational uncertainty in the magnitude only.

5. Steps 2, 3, and 4 are repeated 10,000 times.
6. The final values and uncertainties of $H_{g,r}$, $G1$, and $G2$ are derived from the distribution of parameters obtained from all simulations, with uncertainties determined by the 16th and 84th percentiles, representing the interval corresponding to $\pm 1\sigma$.

The determination of the geometric albedo for Antenor, in the ZTF g and r bands, can be readily determined from the relation (e.g., H. N. Russell 1916; A. W. Harris & A. W. Harris 1997)

$$\rho_{g,r} = \left(\frac{2 \text{ au} \times 10^{0.2(m_{\odot} - H_{g,r})}}{D} \right)^2 \quad (1)$$

where $\rho_{g,r}$ is the geometric albedo in the g or r bands, m_{\odot} is the apparent magnitude of the Sun in the respective band, $H_{g,r}$ is the absolute magnitude of Antenor in the g or r bands and D is the equivalent diameter from the occultation. The astronomical unit (au) is in the same unit of the diameter.

The ZTF image processing pipeline calibrates its photometry (E. C. Bellm et al. 2019) to Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (PanSTARRS1; K. C. Chambers et al. 2016). The PanSTARRS1 implements the AB magnitude system with an accuracy of ~ 0.02 mag (90% confidence; J. L. Tonry et al. 2012) so we adopt from C. N. A. Willmer (2018) the AB values of the apparent magnitude of the Sun for PanSTARRS1 in the g band (PS1_g) $m_{\odot} = -26.54$ and in the r band (PS1_r) $m_{\odot} = -26.93$, both values with an accuracy of 2%. The geometric albedos of Antenor are, as a consequence, $\rho_g = 0.046_{-0.007}^{+0.008}$ and $\rho_r = 0.050_{-0.007}^{+0.008}$. Differences between these albedos and those given by other works (e.g., Y. R. Fernández et al. 2003) are due to different values for the diameter of Antenor mainly.

6. Conclusions and Discussion

Stellar occultation by Solar System Objects is an effective technique to obtain the physical characteristics of these bodies. Networks of ground-based telescopes have been used to observe such events and obtain as many chords as possible that can be combined to reveal the size and shape of small bodies. In this context, we used three observations of a stellar occultation by the Trojan (2207) Antenor and determined its physical characteristics. These results contribute to a better understanding of this object's physical properties and can provide insights into the Jupiter Trojans population.

Two multichords occultations in 2021 July 10 and 2021 August 26, allowed the characterization of Antenor's limb at the moment of the occultations. During those events, Antenor can be considered at almost the same rotational phase. Observations were made by professional and citizen astronomers in Europe and the United States. From these events, we estimated that Antenor's shape projected onto the plane of the sky can be fitted by an ellipse with a semimajor axis of 54.30 ± 0.99 km and semiminor axis of 47.91 ± 2.15 km, which means an oblateness of 0.114 ± 0.051 . From these values, we computed the area equivalent radius of 50.86 ± 1.13 km. Our result can be compared with 48.2 ± 0.2 km which is the expected value obtained by thermal measurements using the NEOWISE (T. Grav et al. 2012). Results from these two events are also presented by

J. Hanuš et al. (2023). Our analysis, however, follow a different methodology and combine chords from different events, taking into consideration that Antenor profited from almost the same rotational phase. In addition, we provided useful and accurate astrometric results using the NIMA solution.

Considering the Antenor's absolute magnitudes in the g and r bands for observations close to the dates of the events analyzed in this work, we computed the geometric albedo in both filters using the area equivalent radius obtained in the paper. The obtained values are $\rho_g = 0.046_{-0.007}^{+0.008}$ and $\rho_r = 0.050_{-0.007}^{+0.008}$. The results found here for Antenor's albedo are in good agreement with the values of $\rho_V = 0.051 \pm 0.003$ and $\rho_V = 0.059 \pm 0.003$ presented by NEOWISE (T. Grav et al. 2012) and Akari (F. Usui et al. 2011), respectively. With a low albedo, Antenor is classified as a D-type asteroid (S. Mottola et al. 2011), which is the taxonomy that shows predominance for L5 trojans (F. Roig et al. 2008).

The 2021 June 12 occultation presented only one positive chord detected by Gregor Krannich at Kaufering, Germany. This light curve had a two-point increase in the light flux in the middle of the occultation which is more significant than the 1σ noise of the light curve. This can be interpreted as a reappearance of the occulted star in the middle of the event. Moreover, this indicates a large topographic feature or that Antenor is a contact or close binary. The unocculted region in the middle of the occultation has a size of 11.38 ± 2.98 km, a very large (22%) value considering the 50.86 km area equivalent radius determined. Moreover, our first-order estimation puts this chord at a distance of 25.43 km from Antenor's center, which agrees with a binary object as suggested by R. D. Stephens et al. (2018). More observational data is needed to constrain this scenario better and pinpoint the individual sizes of the components.

From these occultations, we determined the relative position between Antenor and the occulted star. Based on precise knowledge of the star position due to the Gaia catalog, we determined Antenor's positions in the ICRS with uncertainties between 0.5 and 1.6 mas. These new positions were used to improve Antenor's orbital parameters, allowing the prediction of the path of future stellar occultations with a high accuracy (uncertainties smaller than 15 mas), which is smaller than Antenor's radius.

Out of approximately $\sim 7,500$ known Trojan objects,³⁶ only ~ 1800 have their sizes estimated from thermal measurements (T. Grav et al. 2012). A small number of objects have been measured by occultations³⁷ (F. Braga-Ribas et al. 2019), and even fewer have been detected in multichord occultations. Accurate sizes and shapes of these objects contributes to advance our knowledge of the formation and dynamical evolution of the solar system.

Acknowledgments

We acknowledge a CAPES support. This study was financed in part by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brazil (CAPES)—Finance Code 001, also by CAPES-PRINT Process 88887.570251/2020-00, by the French Program National de Planetologie, and by the BQR program of Observatoire de la Côte d'Azur. J.I.B.C.

³⁶ Source: IAU Minor Planet Center, last checked on May/2024.

³⁷ Source: <https://occultations.ct.utfrp.edu.br/results/>.

acknowledges grants 305917/2019-6, 306691/2022-1(CNPq) and 201.681/2019 (Rio de Janeiro State Research Support Foundation, FAPERJ). F.B.R. acknowledges CNPq grant 316604/2023-2. Partially based on observations made with the Tx40 telescope at the Observatorio Astrofísico de Javalambre in Teruel, a Spanish Infraestructura Científico-Técnica Singular (ICTS) owned, managed, and operated by the Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA). Tx40 is funded with the Fondos de Inversiones de Teruel (FITE).

Based on observations obtained with the Samuel Oschin Telescope 48 inch and the 60 inch Telescope at the Palomar Observatory as part of the Zwicky Transient Facility project. ZTF is supported by the National Science Foundation under grant No. AST-2034437 and a collaboration including Caltech, IPAC, the Weizmann Institute for Science, the Oskar Klein Center at Stockholm University, the University of Maryland, Deutsches Elektronen-Synchrotron and Humboldt University, the TANGO Consortium of Taiwan, the University of Wisconsin at Milwaukee, Trinity College Dublin, Lawrence Livermore National Laboratories, and IN2P3, France. Operations are conducted by COO, IPAC, and UW.

ORCID iDs

F. S. Ferreira  <https://orcid.org/0000-0002-5879-2173>
 J. I. B. Camargo  <https://orcid.org/0000-0002-1642-4065>
 B. E. Morgado  <https://orcid.org/0000-0003-0088-1808>
 V. F. Peixoto  <https://orcid.org/0000-0002-3319-4548>
 J. Desmars  <https://orcid.org/0000-0002-2193-8204>
 F. Braga-Ribas  <https://orcid.org/0000-0003-2311-2438>
 A. R. Gomes-Júnior  <https://orcid.org/0000-0002-3362-2127>
 B. Sicardy  <https://orcid.org/0000-0003-1995-0842>
 J. L. Ortiz  <https://orcid.org/0000-0002-8690-2413>
 R. Vieira-Martins  <https://orcid.org/0000-0003-1690-5704>
 C. L. Pereira  <https://orcid.org/0000-0003-1000-8113>
 L. Liberato  <https://orcid.org/0000-0003-3433-6269>
 M. Assafin  <https://orcid.org/0000-0002-8211-0777>
 Y. Kilic  <https://orcid.org/0000-0001-8641-0796>
 R. C. Bouffleur  <https://orcid.org/0000-0003-3452-1114>
 F. L. Rommel  <https://orcid.org/0000-0002-6085-3182>
 G. Benedetti-Rossi  <https://orcid.org/0000-0002-4106-476X>
 M. V. Banda-Huarca  <https://orcid.org/0000-0002-2085-9467>
 F. Marchis  <https://orcid.org/0000-0001-7016-7277>
 P. Tanga  <https://orcid.org/0000-0002-2718-997X>
 R. Gonçalves  <https://orcid.org/0000-0001-6097-5297>
 K. Wagner  <https://orcid.org/0000-0002-4309-6343>

References

- Assafin, M. 2023a, *P&SS*, **238**, 105801
 Assafin, M. 2023b, *P&SS*, **239**, 105816
 Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., et al. 2019, *PASP*, **131**, 018002
 Botte, W. F., Marschall, R., Nesvorný, D., & Vokrouhlický, D. 2023, *SSRv*, **219**, 83
 Braga-Ribas, F., Crispim, A., Vieira-Martins, R., et al. 2019, *JPhCS*, **1365**, 012024
 Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2013, *ApJ*, **773**, 26
 Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2014, *Natur*, **508**, 72
 Buie, M. W., Olkin, C. B., Merline, W. J., et al. 2015, *AJ*, **149**, 113
 Butkevich, A. G., & Lindgren, L. 2014, *A&A*, **570**, A62
 Carry, B., Peloton, J., Le Montagner, R., Mähle, M., & Berthier, J. 2024, *A&A*, **687**, A38
 Chambers, K. C., Magnier, E. A., Metcalfe, N., et al. 2016, arXiv:1612.05560
 Desmars, J., Camargo, J. I. B., Bouffleur, R., et al. 2015, *A&A*, **584**, A96
 Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2017, *AJ*, **154**, 22
 Elliot, J. L. 1979, *ARA&A*, **17**, 445
 Fernández, Y. R., Sheppard, S. S., & Jewitt, D. C. 2003, *AJ*, **126**, 1563
 Ferreira, F. S., Camargo, J. I. B., Bouffleur, R., et al. 2025, *MNRAS*, **540**, 460
 Ferreira, J. F., Tanga, P., Machado, P., & Corsaro, E. 2020, *A&A*, **641**, A81
 Gaia Collaboration 2022, *yCat*, **1355**, 0
 Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., et al. 2022, *MNRAS*, **511**, 1167
 Grav, T., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Masiero, J. R., & Nugent, C. R. 2012, *ApJ*, **759**, 49
 Hanuš, J., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., et al. 2023, *A&A*, **679**, A56
 Harris, A. W., & Harris, A. W. 1997, *Icar*, **126**, 450
 JPL Solar System Dynamics Group 2025, <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>, data retrieved 2025-04-10
 Kilic, Y., Braga-Ribas, F., Kaplan, M., et al. 2022, *MNRAS*, **515**, 1346
 Masci, F. J., Laher, R. R., Rusholme, B., et al. 2019, *PASP*, **131**, 018003
 Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., & Gomes, R. 2005, *Natur*, **435**, 462
 Morgado, B. E., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2021, *A&A*, **652**, A141
 Morgado, B. E., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2023, *Natur*, **614**, 239
 Mottola, S., Di Martino, M., Erikson, A., et al. 2011, *AJ*, **141**, 170
 Muinonen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., et al. 2010, *Icar*, **209**, 542
 Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., & Morbidelli, A. 2013, *ApJ*, **768**, 45
 Nicholson, S. B. 1961, *ASPL*, **8**, 239
 Ortiz, J. L., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2012, *Natur*, **491**, 566
 Powell, M. J. D. 1994, *Advances in Optimization and Numerical Analysis* (Berlin: Springer), 51
 Roig, F., Ribeiro, A. O., & Gil-Hutton, R. 2008, *A&A*, **483**, 911
 Rommel, F. L., Braga-Ribas, F., Desmars, J., et al. 2020, *A&A*, **644**, A40
 Russell, H. N. 1916, *ApJ*, **43**, 173
 Satō, I., Šarounová, L., & Fukushima, H. 2000, *Icar*, **145**, 25
 Shevchenko, V. G., Slyusarev, I. G., & Belskaya, I. N. 2014, *MAPS*, **49**, 103
 Sicardy, B., Braga-Ribas, F., Buie, M. W., Ortiz, J. L., & Roques, F. 2024, *A&ARv*, **32**, 6
 Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Natur*, **478**, 493
 Stephens, R. D., & Coley, D. R. 2017, *MPBu*, **44**, 252
 Stephens, R. D., Pravec, P., Kučáková, H., et al. 2018, *MPBu*, **45**, 341
 Stephens, R. D., & Warner, B. D. 2019, *MPBu*, **46**, 315
 Tanga, P., Berthier, J., Cellino, A., et al. 2023, *LPICo*, **2851**, 2209
 Timerson, B., Brooks, J., Conard, S., et al. 2013, *P&SS*, **87**, 78
 Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., et al. 2012, *ApJ*, **750**, 99
 Usui, F., Kuroda, D., Müller, T. G., et al. 2011, *PASJ*, **63**, 1117
 Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., et al. 2009, *Icar*, **199**, 458
 Willmer, C. N. A. 2018, *ApJS*, **236**, 47