

MSc MA DEL CARMEN AYALA LOERA



# Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Observatório Nacional

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações

## **Estudos fotométricos de objetos transNetunianos**

**Orientador: Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal**

**Rio de Janeiro**

**Julio de 2019**



*"Dedicado a todos os que, por terem nascido em uma situação de maiores desvantagens, não conseguiram passar as barreiras entre eles e o próprio sonho almejado, e que com seu trabalho e esforço de cada dia deram para mim a oportunidade de viver o meu: aos meus pais e ao povo do Brasil."*



# Agradecimentos

A meu pai Jose Guadalupe Ayala Juarez quem com seu trabalho e amor, me deu a oportunidade de estudar e de viver meus sonhos de infância, gracias viejo.

A minha familia, que me apoiaram de diferentes maneiras durante esse período de pouco mais de quatro anos, especialmente aqueles que cuidaram do meu pai com amor e paciência em seus últimos anos de vida, mesmos que eu estive longe de casa: Zita, Alfonso, Cecy, Guadalupe, Juana e Abundio. A Laura, Alfredo e Edgar que estiveram perto de mim mesmo de longe.

A todos meus amigos que estando perto ou desde longe me ajudaram e me acompanharam sempre, cada día, especialmente para María Elena, meu maior exemplo de gentileza e coragem, obrigado por me ajudar para não desistir do meu propósito de ser astrônomo. A Rubén, quem além de conselhos valiosos me dá sempre uma boa discussão científica. A Filipe, Jessica e Verónica, obrigado meus queridos amigos.

A meu orientador me deu oportunidade para desenvolver este interessante projeto.

A meus profesores, colegas e colaboradores pela sua confiança, as discussões e as ideias compartilhadas que se conviteram em colaborações e trabalhos futuros, a Davide, Raúl, Aos professores Fernando Roig e Daniela Lazzaro pelo seu apoio em momentos cruciais da minha vida acadêmica no ON.

A o Observatório Nacional, a minha alma mater onde aprendi lições importantes da vida acadêmica que sem dúvida me ajudaram a formar meu próprio perfil.

Finalmente mais não menos importante, agradeço ao povo do Brasil, que através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) me deu a oportunidade de realizar meus estudos de pós-graduação.

Pela oportunidade que este país me deu para me formar cientista, com a esperança de que tempos melhores cheguem para o Brasil e seu povo, muito obrigado.



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO</b>	<b>15</b>
1.1	Refletância dos objetos transNetunianos, TNOs	15
1.2	Alcance da técnica de fotometria no estudo de objetos transNetunianos	17
1.3	Escopo do projeto e objetivos	18
<b>2</b>	<b>OBJETOS TRANSNETUNIANOS E CENTAUROS</b>	<b>21</b>
2.1	Origem e descoberta	21
2.2	Propriedades dinâmicas	22
2.3	Propriedades físicas	23
2.3.1	Composições, densidades e porosidade	25
2.3.2	Rotação e formas	27
<b>3</b>	<b>MAGNITUDES E CORES DOS TNOS</b>	<b>31</b>
3.1	Fundamentos das relações fluxo, albedo e magnitude	31
3.1.1	Albedo	31
3.1.2	Magnitudes	32
3.2	Magnitudes Absolutas dos TNOs	34
3.3	Cores dos TNOs	34
3.3.1	Cores de TNOs e grupos	35
3.3.2	Avermelhamento	36
<b>4</b>	<b>BASE DE DADOS FOTOMÉTRICOS DE TNOS</b>	<b>41</b>
4.1	Observação de TNOs com telescópios terrestres	41
4.1.1	Critérios de seleção de objetos para observação	42
4.2	Observações	42
4.2.1	Metodologia de observação	42
4.3	Fotometria	43
4.3.1	Redução das imagens FITs	43
4.3.2	Magnitudes aparentes	44
4.3.3	Cálculo dos erros	45
4.4	Dados da Literatura	45
4.4.1	Magnitudes reduzidas	45
4.4.2	Curvas de Luz e $\Delta m$ para TNOs	47
4.5	Estado da base de dados	47
<b>5</b>	<b>ESTUDOS FOTOMÉTRICOS DE TNOS</b>	<b>49</b>
5.1	Metodologia	49
5.1.1	Curvas de Fase e estimação de $H$ e $\beta_\lambda$	49
5.1.2	Ajuste linear	50

5.1.3	Comportamento das curvas de fase e $\beta$ . . . . .	52
<b>5.2</b>	<b>Análise estatística de <math>H_V</math>, <math>H_R</math>, <math>\beta_V</math>, <math>\beta_R</math>, <math>(H_V - H_R)</math> e <math>\Delta\beta</math> . . . . .</b>	<b>54</b>
5.2.1	Distribuições . . . . .	56
<b>5.3</b>	<b>Correlações . . . . .</b>	<b>58</b>
5.3.1	Correlações com parâmetros físicos e orbitais . . . . .	60
5.3.2	Correlação de $H_V - H_R$ e a $\Delta\beta$ . . . . .	61
5.3.3	Análise de grupos por tamanho . . . . .	62
<b>5.4</b>	<b>Cores e propriedades das superfícies dos TNOs . . . . .</b>	<b>63</b>
5.4.1	Aumento da mostra de TNOs e correlações . . . . .	64
5.4.2	Melhora da estimativa de $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$ pela variação por rotação. . . . .	65
5.4.3	Correlações de $H_V - H_R$ com grupos dinâmicos . . . . .	65
5.4.4	Um possível grupo baseado em $q$ . . . . .	67
5.4.5	Possíveis grupos dependentes de $i$ . . . . .	67
5.4.6	Análise da correlação $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$ . . . . .	69
5.4.7	Modelo HG e curvas de fase de TNOs . . . . .	70
5.4.8	Comportamento das cores . . . . .	72
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Análise da correlação <math>H_V - H_R</math> e <math>\Delta\beta</math> . . . . .</b>	<b>79</b>
6.1.1	Os coeficientes de fase . . . . .	81
6.1.2	Análise de $\Delta m$ de grupos por diâmetro . . . . .	81
6.1.3	Análise de grupos com respeito das cores observadas . . . . .	82
6.1.4	Conclusões . . . . .	85
<b>6.2</b>	<b>Trabalho futuro . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>PUBLICAÇÕES . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>91</b>



# Lista de figuras

Figura 1.1 – Representação esquemática da configuração de observação de um corpo menor.	16
Figura 2.2 – Adaptação da Fig.2 de Brown (2012), as linhas sólidas indicam os limites da temperatura efetiva em função do diâmetro, para a retenção dos voláteis CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> e CO, na idade do Sistema Solar. Os objetos indicados são representados considerando suas temperaturas equivalentes de perda de voláteis. Para os TNOs com $D < 500$ km, seu conteúdo volátil foi perdido. . . . .	27
Figura 2.3 – Magnitudes vs. tempo para os casos de diferentes comportamentos das curvas de luz devidos à forma e variações de albedo. O caso do TNO como elipsoides triaxiais (acima), e o caso do TNO é um esferoide MacLaurin com uma variação de albedo em sua superfície. Adaptação da Fig.1 de Thirouin et al. (2014). . . . .	28
Figura 3.4 – Esquema de distâncias usadas na definição de fluxo. . . . .	31
Figura 3.5 – Distribuição bimodal das cores B-R vs $H_R$ , na qual a aparente bimodalidade se incrementa com relação à diminuição do diâmetro ( $H \approx D$ ), sendo a brecha maior nos objetos com $H > 6,5$ . Figura No.1 de Peixinho et al. (2012).	38
Figura 3.6 – A figura amostra a relação do $p_v$ e inclinações espectrais, $S$ , para 111 TNOs. Os pontos em vermelho e azul indicam as agrupações identificadas por Lacerda et al. (2014) entanto que os pontos pretos indicam objetos que ficam no indeterminados, os pontos amarelos indicam objetos tipo Haumea e os pontos verdes os TNOs de maior tamanho. Os quadros roxos indicam os objetos 2013AZ <sub>60</sub> e 2012DR <sub>30</sub> . Figura No.7 de Pál et al. (2015). . . . .	39
Figura 5.7 – Curvas de fase do TNO 2001 FZ <sub>173</sub> nos filtros $V$ e $R$ . Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase $H$ vs. $\beta_\lambda$ de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas. . . . .	51
Figura 5.8 – Curvas de fase de TNOs mostram diferentes comportamentos fotométricos nos filtros $V$ e $R$ (esquerda), Thereus (acima), 1999 OX <sub>3</sub> (meio), e 1994 EV <sub>3</sub> (abaixo). Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase $H$ vs. $\beta_\lambda$ de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas. . . . .	53
Figura 5.9 – Curvas de fase nos filtros $V$ (azul) e $R$ (vermelho) dos TNOs Chariklo (esquerda) e Haumea (direita). Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase $H$ vs. $\beta_\lambda$ de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas . . . . .	55
Figura 5.10–Curvas de fase nos filtros $V$ (azul) e $R$ (vermelho) dos TNOs 2008 YB <sub>3</sub> e 1998 KG <sub>62</sub> . Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase $H$ vs. $\beta_\lambda$ de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas. . . . .	56
Figura 5.11–Distribuição de $H_V$ e $\beta_V$ (azul) para 133 TNOs e $H_R$ e $\beta_R$ (Vermelho) para 132 TNOs. . . . .	57
Figura 5.12–Distribuições de $H_V - H_R$ (esq.) e $\beta_V - \beta_R$ (dir.) para 104 TNOs. . . . .	58

Figura 5.13–Gráfico de dispersão de $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$ . Amostra [1] separados por semieixo maior por cores como: $a < 40$ AU em pontos azuis, $40 < a < 50$ AU em diamantes verdes, $a > 50$ AU em quadrados vermelhos (acima). Amostra [2] em pontos azuis e Amostra [3] em quadrados . . . . .	59
Figura 5.14–TNOs $H_V > 4,5$ mag em azul e $H_V < 4,5$ mag no espaço de parâmetros $H_V$ vs. $D$ (esquerda) e $H_V$ vs. $p_V$ (direita). . . . .	62
Figura 5.15–TNOs $H_V > 4,5$ mag em azul e $H_V < 4,5$ mag em vermelho no espaço de fase $H_V - H_R$ vs. $p_V$ . . . . .	63
Figura 5.16–Comparação considerando $\Delta m$ vs. $\Delta m/2$ em nosso processamento. Esquerda: Diferença entre os valores nominais de $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$ , tudo dentro 0.6%. Direita: Diferença entre os valores dos erros, nos casos extremos temos diferencias na estimativa dos erros nas cores de 1 magnitude. . . . .	66
Figura 5.17– $H_V$ vs. $\Delta m$ . Os asteriscos em preto indicam valores na literatura (ou seus limites superiores). A linha azul as medianas dos bins, e os símbolos vermelhos indicam os valores atribuídos para os 38 TNOs sem amplitude de curve reportada. . . . .	66
Figura 5.18–Distância do periélio versus $H_V - H_R$ dos objetos clássicos(acima esquerda) e o espaço de fase coberto pelo teste de correlação de Spearman ao considerar erros nos dados (acima direita). . . . .	67
Figura 5.19–Inclinação vs. $H_V - H_R$ de objetos clássicos (acima direita). Inclinação vs. $H_V - H_R$ dos TNOs excitados (abaixo esquerda). Na coluna direita são mostrados os espaços de fase cobertos pelo teste de correlação de Spearman ao considerar os erros nos dados para cada caso. . . . .	68
Figura 5.20–Left: $H_V - H_R$ vs. $\Delta\beta$ para toda a nossa amostra. . . . .	70
Figura 5.21–Comparações entre os resultados observacionais e os resultados obtidos a partir do modelo fotométrico. Em azul, são mostradas as $H_V - H_R$ de nossos objetos (normalizados para $H_V - H_R = 0$ ) e em vermelho as mesmas curvas se seguissem o modelo L&B-81 (esquerda). As estrelas em preto indicam nossos dados (sem barra de erro), em vermelho os resultados do modelo(direita). . . . .	72
Figura 5.22–Histograma mostrando $H_V - H_R$ de 117 TNOs. A linha vermelha mostra o histograma considerando os erros nas cores (vide texto). . . . .	73
Figura 6.23–Distribuição orbital dos objetos observados. Símbolos abertos indicam objetos mais fracos que $H_V = 4.5$ (pequenos), enquanto os símbolos preenchidos indicam objetos mais brilhantes que $H_V = 4.5$ . Os círculos azuis indicam objetos $H_V - H_R < 0,9 \times$ a cor mediana, quadrados verdes indicam cores dentro de 10% da mediana, enquanto diamantes vermelhos indicam objetos mais vermelhos que $1,1 \times$ a cor mediana. . . . .	83
Figura 6.24–Espacio fase de periélio ( $q$ ) vs. Seno da inclinação ( $\sin i$ ) para o nosso grupo clássico definido. As linhas horizontais mostram limites para inclinações $I = 5^\circ$ (linha tracejada preta), $I = 10^\circ$ (linha ponto-tracejada preta) e $I = 15^\circ$ (linha solida vermelha). O esquema de $H_V - H_R$ e símbolos é igual do que a Fig.6.23 (direita). Histograma de distribuição de $H_V - H_R$ para o mesmo grupo. . . . .	84

# Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Telescópios usados em nosso levantamento fotométrico. . . . .	41
Tabela 4.2 – Novas observações reportadas . . . . .	46
Tabela 4.3 – Referências incluídas na nossa base de dados fotométrica. . . . .	48
Tabela 5.4 – TNO (82155) 2001 FZ <sub>173</sub> As cinco colunas seguintes apresentam, nesta ordem, a data na qual foi feita a observação, a distância heliocêntrica $r$ , distância geocêntrica $\Delta$ , o ângulo de fase $\alpha$ , referência da observação. As duas últimas colunas indicam as magnitudes reduzidas obtidas nos dois filtros $V$ e $R$ , respectivamente. As referências Te03, SJ02, Px04 são indicadas na Tabela 4.3.	50
Tabela 5.5 – Correlações para todos os TNOs. A primeira e segunda coluna indicam os parâmetros testados, P1 e P2, respectivamente, as colunas 3 e 4 mostram os valores do teste de Spearman, a coluna 5, o índice de confiança CI, expresado em sigmas, $N$ indica o número de TNOs no teste. Os parâmetros testados: semi-eixo maior, $a$ , excentricidade $e$ , inclinação $i$ , albedo geométrico $p_V$ e diâmetro $D$ .	60
Tabela 5.6 – Correlações para as amostras [2] e [3]. . . . .	61
Tabela 5.7 – Novos dados da literatura incluídos em nossa base de dados . . . . .	64
Tabela 5.8 – $H_V - H_R$ vs. $\Delta\beta$ , correlações de Spearman para todas as amostras dinâmicas consideradas neste trabalho. . . . .	70
Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas . . . . .	74
Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas . . . . .	75
Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas . . . . .	76
Tabela 5.11 – Nas colunas se indica: nome dos TNOs [1], cores absolutas $H_V - H_R$ [2], coeficientes de fase relativos $\Delta\beta$ [3], erros com otimização em precisão entre parênteses, número de pontos de dados usados $V$ [4] e $R$ [5], o valor $\Delta m$ usado [6]. As bandeiras 1 e 0 [7] indicam se o valor é uma mediana calculada por nós ou um valor tomado da literatura, respectivamente. . . . .	77



# Estudos Fotométricos de objetos transNetunianos

Ma del Carmen Ayala Loera

Submetida ao Observatório Nacional do Rio de Janeiro  
em Julio de 2019, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Doutora em Astronomia.

## Resumo

Neste trabalho são apresentados os resultados de estudos fotométricos dos objetos transNeptunianos. Foram obtidas magnitudes absolutas e coeficientes de fase ( $H_V$  e  $\beta_V$  para 124 TNOs e  $H_R$  e  $\beta_R$  para 123 TNOs). Calculamos o que nos definimos como cores absolutas  $H_V - H_R$ , e coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$ , para 117 TNOs. Os dados observacionais foram obtidos utilizando vários telescópios em diferentes países: Chile, Brasil, Espanha e Reino Unido.

Foram usados dados próprios conjuntamente com dados da literatura para criar curvas de fase. Isto foi feito assumindo um comportamento linear das magnitude reduzidas com respeito do ângulo de fase. Encontramos que os objetos apresentam uma ampla gama  $H_V - H_R$ , que vai desde o azul até muito vermelho, enquanto que os coeficientes de fase relativos tem uma distribuição unimodal. Observamos que as curvas de fase em diferentes filtros  $R$  e  $V$  no mesmo intervalo de ângulo de fase podem mostrar diferentes comportamentos, alguns apresentando coeficientes de fase negativos.

Usamos o parâmetro de Spearman para calcular correlações de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  com parâmetros físicos e orbitais com o objetivo de comparar com aquelas que são debatidas na literatura. Não encontramos nenhuma correlação com elementos orbitais considerando a amostra completa nem considerando grupos dinâmicos como é sugerido por outros autores ([Tegler & Romanishin, 2000](#); [Peixinho et al., 2012](#)).

Encontramos que existe uma anti-correlação entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , a qual indica que os objetos mais vermelhos têm curvas de fase mais inclinadas no filtro  $R$ , enquanto os objetos mais azuis têm curvas de fase mais inclinadas no filtro  $V$ . A correlação se cumpre quando consideramos todos os TNOs de nossa amostra, e também para diferentes grupos dinâmicos ou qualquer outro tipo de grupo, i.e. grupos divididos pela magnitude. Portanto sugerimos que a anti-correlação depende de uma propriedade de toda a população, a qual não depende da localização dos objetos, sua temperatura superficial, composição (e/ou albedo) ou tamanho. Sugerimos que a anti-correlação pode ser devida às propriedades microscópicas das superfícies.

Encontramos uma correlação de  $H_V - H_R$  e o albedo geométrico  $p_V$  quando separamos a mostra por grupos de acordo a sua magnitude (como uma aproximação ao diâmetro). Para TNOs pequenos com  $H_V > 4,5$ , a correlação tem  $r_S = -0.7912$  e valor-p =  $3.34 \times 10^{-19}$ , enquanto

que para os TNOs maiores  $H_V < 4,5$ ,  $r_S = -0.8986$  e valor-p =  $3.15 \times 10^{-8}$ , consideramos que essa relação seja devida a diferenças de composição possivelmente uma menor quantidade de compostos voláteis nos menores.

Para testar nossa hipótese, usamos o modelo de Lumme & Bowell (1981), o qual estabelece que as curvas de fase podem ser caracterizadas por um único parâmetro, o fator de espalhamento múltiplo  $Q$ . Como na medida que  $Q$  depende dos componentes que descrevem a rugosidade e a porosidade, foi útil para procurar por evidência da ocultação de sombras na oposição ou SHOE (das siglas em inglês *Shadow Hiding Opposition Effect*), diferente entre as observações feitas no filtro  $V$  e  $R$ . Encontramos que o modelo não reproduz as curvas de fase observadas.

Existe um fenômeno conhecido como efeito da oposição (OE pelas siglas em inglês para *Opposition effect*) que é um incremento de magnitude observado em objetos do Sistema Solar em ângulos de fase pequenos (Gehrels, 1956; Harris & Young, 1989), o qual a literatura descreve como produzido por dois fenômenos: SHOE (Lumme & Bowell, 1981; Hapke et al., 1998) e pelo fenômeno de retrodispersão coerente da luz CBL, adiante (de *Coherent backscattering of light*), o qual foi proposto por Muinonen (1989).

Considerando que os TNOs são todos observados em ângulos de fase pequenos  $\alpha < 8^\circ$ , se espera que o SHOE e o CBL fossem as fontes dominantes que contribuem ao OE. As inclinações das curvas de fase têm relação com o OE de maneira que as curvas de fase mais íngremes indicam larguras angulares finas do OE, o qual contribui ao incremento do brilho de maneira diretamente proporcional ao incremento de  $Q$ . Se consideramos o comportamento indicado pela correlação nossos resultados indicam que os TNOs têm um comportamento contrário ao esperado para espalhamento múltiplo e portanto sugerimos que nos TNOs a fonte dominante de OE seja o espalhamento único.

# Abstract

This work reports the results of photometric studies of transNeptunian objects (TNOs). Absolute magnitudes and phase coefficient from TNOs were computed ( $H_V$  and  $\beta_V$  for 124 TNOs and  $H_R$  and  $\beta_R$  for 123 TNOs). We computed what we defined as absolute colours  $H_V - H_R$  and relative phase coefficients  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$  for 117 TNOs. Observational data was obtained from several telescopes in different countries: Chile, Brasil, Spain and United kingdom. We used our own data together with data from literature to compute phase curves. For this, we assumed a linear trend of reduced magnitudes and the phase angles. We find that the objects have a wide range of  $H_V - H_R$  ranging from blue to very red, while the relative phase coefficients have a unimodal distribution. We have observed that the phase curves in the same phase angle range show different behaviors in different filters  $R$  and  $V$ , some of them have negative values for  $\beta_\lambda$ .

We used the Spearman parameter to test correlations between  $H_V - H_R$  and  $\Delta\beta$  with physical and orbital parameters, in order to test correlations that are debated in literature. We did not find any correlation with orbital parameters, by considering the complete sample nor considering different dynamical groups as suggested by other authors (Tegler & Romanishin, 2000; Peixinho et al., 2012).

We find that there is an anti-correlation between  $H_V - H_R$  and  $\Delta\beta$ , which indicates that the reddest objects have more sloped phase curves in the  $R$  filter, while bluer objects have more sloped phase curves in the  $V$  filter. The correlation holds by considering all the objects of the sample as well as, considering different dynamical groups also any other type of group, i.e. groups divided by  $H$  or diameter  $D$ . Therefore, we suggest that the anti-correlation depends on a property of the whole population, which does not depend on the object location, their surface temperature, composition (and/or albedo) or size. We suggest that the anti-correlation may be due to the microscopic properties of the surfaces.

We find a correlation of  $H_V - H_R$  and the geometric albedo  $p_V$  when we separate the sample by groups according to  $H$  (as an approximation to the  $D$ ). For small TNOs with  $H_V > 4.5$  mag the correlation has  $r_S = -0.7912$  and p-value =  $3.34 \times 10^{-19}$ , while for the larger TNOs  $H_V < 4.5$ ,  $r_S = -0.8986$  and p-value =  $3.15 \times 10^{-8}$ , we consider that this ratio is due to composition differences, possibly a smaller amount of volatile compounds in the minor ones.

In order to test our hypothesis we used the Lumme & Bowell (1981) model which states that the phase curves can be characterized by one single parameter, the multiple scattering factor  $Q$ . Since it depends of two components that describe roughness and porosity, it was useful to corroborate if there was evidence of different shadowing effect between the  $V$  and  $R$  data. We found that the model does not reproduce the observed phase curves.

The phenomenon known as opposition effect is an increase of the aparent magnitude of the Solar System objects observed at small phase angles (Gehrels, 1956; Harris & Young, 1989). It

is produced by the decrease of the shadowing effect ([Hapke et al., 1998](#)) and by the coherent backscattering of light phenomenon ([Muinonen, 1989](#)).

Considering that TNOs are all observed at small phase angles  $< 8^\circ$ , it is expected that coherent backscatter will be the dominant source that contributes to the opposing effect. Thus, our results indicate that the TNOs show opposite behavior to what was expected for multiple scattering, and therefore we suggest that in the TNOs the dominant source of OE is the single scattering.



# 1 Introdução e Objetivos do projeto

Os objetos trans-Netunianos TNOs, são corpos menores localizados na periferia do Sistema Solar. Acredita-se que eles são vestígios do disco protoplanetário onde se formaram os planetas, por isso eles são a evidência mais clara que temos para traçar as linhas da evolução do Sistema Solar. Existem outras populações de corpos menores relacionadas aos TNOs entre as quais se encontram os centauros, que têm órbitas entre os planetas gigantes e cuja dinâmica sugere que eles sejam uma população transiente entre os TNOs e os cometas de período curto (e.g. [Levison & Duncan, 1997](#)).

Portanto, os estudos fotométricos dos TNOs assim como dos centauros são aqui apresentados visando estimar suas propriedades físicas e os comportamentos fotométricos relativos às características da sua superfície.

## 1.1 Refletância dos objetos transNetunianos, TNOs

A brilho de um TNO é luz refletida por sua superfície, portanto a luz que nós medimos contém informações das propriedades ópticas da superfície e dos possíveis fenômenos que resultam desta interação em uma configuração específica de observação.

Os modelos clássicos de espalhamento da luz dos corpos menores, geralmente usados para estudos de TNOs, consistem de métodos nos quais é assumida dispersão cromática na qual a luz é refletida de maneira difusa. Assim, as propriedades de dispersão individual das partículas são usadas para caracterizar a superfície completa, assumindo que o diâmetro da partícula refletora é muito maior do que o comprimento de onda [Lumme & Bowell \(1981\)](#).

Então, se a luz incide perpendicularmente na superfície será quase totalmente refletida em direção à fonte luminosa. Isso ocorre quando o objeto é observado em oposição, ou seja, em ângulo de fase igual a zero. O ângulo de fase  $\alpha$ , é a distância angular entre a Terra e o Sol como observada desde o TNO.

Como mostrado na [Fig.1.1](#), a configuração de oposição é uma definição baseada em uma configuração ideal, na realidade os objetos somente podem ser observados em ângulos de fase muito próximos de zero. O fluxo solar incidente no corpo menor é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$ . A interação da luz com a superfície resulta no espalhamento da luz em diferentes ângulos dando lugar a três tipos de resposta: i) espalhamento isotrópico, ou seja, espalhamento da luz em todas as direções, ii) espalhamento para trás ou retroespalhamento, e iii) espalhamento para frente ([Fig. 1.1-b](#)). Uma parte da radiação é absorvida pelo objeto e eventualmente é irradiada como calor, no caso de medidas em comprimentos de onda no visível a radiação térmica pode ser negligenciada. No entanto, estimativas de alta precisão do diâmetro e albedo dos corpos menores são feitas a partir de modelos térmicos ([Morrison & Lebofsky, 1979](#)). A luz incide na superfície do objeto com um ângulo  $\Phi_1$  com respeito à normal do plano da superfície, uma parte da luz é refletida com um ângulo  $\Phi_2$  e outra é refratada com um ângulo

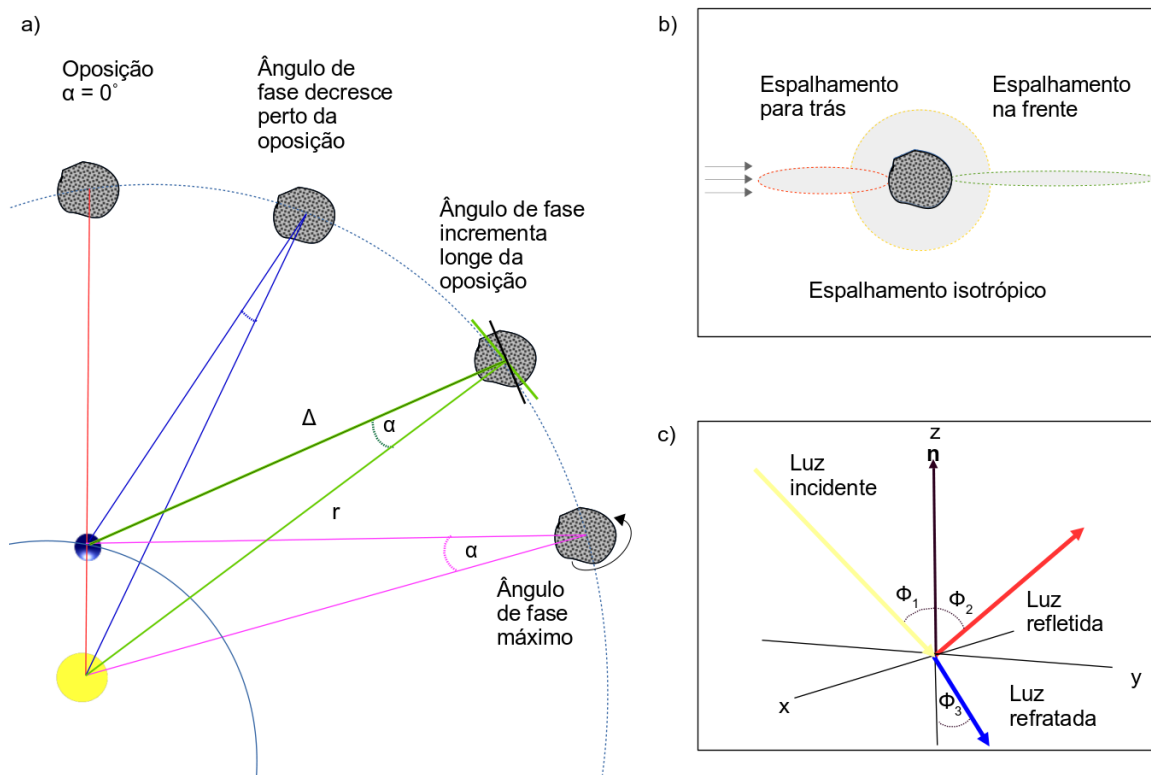


Figura 1.1 – Representação esquemática da configuração de observação de um corpo menor.

$\Phi_3$  (Fig. 1.1-c).

O fluxo refletido será a distribuição da luz espalhada pela superfície do objeto e o fluxo observado dependerá do ângulo de incidência e da direção de espalhamento da linha de visão do observador, geralmente assumindo que o objeto reflete a luz de maneira difusa. Vale ressaltar que, o fluxo refletido pelo objeto será observado de maneira inversamente proporcional ao quadrado da distância  $\Delta$  na que se encontra o observador.

Para os asteroides essa queda do brilho é aproximadamente linear em em ângulos de fase maiores do que  $10^\circ$ . As órbitas dos TNOs são excêntricas e afastadas, por isso a maioria são observados perto do seu periélio e apresentam ângulos de fase máximos apenas de  $\sim 3^\circ$  para TNOs e  $\sim 8^\circ$  para os centauros.

O efeito de oposição aparece quando os objetos são observados próximos a  $\alpha = 0^\circ$ , ele esta relacionado com as propriedades das superfícies dos objetos (Gehrels et al., 1964; Gehrels & Teska, 1963). A origem do OE é ainda um problema em aberto, sendo proposto que ele seja produzido por duas causas principalmente, i) o retroespalhamento coerente da luz (CBL das siglas em inglês *coherent backscattering of light*) (Muinonen, 1989) e o efeito de ocultação de sombras em oposição, (SHOE das siglas em inglês *shadow-hiding opposition effect*). Ambos fenômenos estão relacionados com o espalhamento da luz, motivo pelo qual devem ser levados com consideração nos modelos de caracterização dos objetos planetários (Hapke et al., 1998). O CBL se refere à interferência construtiva de dois raios de luz que seguem o mesmo caminho em sentidos opostos, o que leva ao incremento do brilho (Muinonen, 1989; Hapke, 1990). o segundo

efeito, SHOE, se refere à diminuição do efeito de sombras. O efeito de diminuição de sombras esta relacionado com a rugosidade e porosidade da superfície do objeto, podemos dizer que ele tem uma componente macroscópica que depende da textura das superfícies, e uma componente microscópica que depende da separação e tamanho das partículas dispersoras, assim superfícies altamente porosas e/ou altamente rugosas são mais suscetíveis aos efeitos de sombreamento (Bowell et al., 1989; Hapke, 1990, 2008).

Ambos fenômenos são relativos ao espalhamento da luz e como os TNOs são observados dentro do intervalo de ângulos de fase nos quais os efeitos de oposição aparecem, isso pode ser uma vantagem para inferir as propriedades das suas superfícies.

Como possivelmente os TNOs tiveram uma evolução envolvendo colisões, as quais devem ter afetado suas propriedades rotacionais, assim este tipo de estudos podem fornecer informações sobre tais processos. Uma curva de luz mostra a variação do brilho do objeto no tempo, em particular ao longo de sua rotação. Essas variações são produzidas por efeitos que podem ser periódicos ou não. A variação da magnitude do TNO devida á rotação pode ser caracterizada com a quantidade  $\Delta m$  que depende diretamente da forma e das propriedades superficiais do objeto. Assim,  $\Delta m$  indica mudanças na superfície (albedo ou topografia) ou variações devidas a forma alongada do objeto. O tamanho, forma e a orientação do eixo de rotação do TNO podem ser calculados usando curvas luz. A partir do  $\Delta m$  podem ser identificadas variações periódicas de brilho devidas a formas irregulares bem como variações do albedo geométrico como indicado por Duffard et al. (2009). A quantidade  $\Delta m$  será abordado em mais detalhes nas próximas seções.

## 1.2 Alcance da técnica de fotometria no estudo de objetos transNetunianos

A determinação de brilho é essencial para o estudo das propriedades dos TNOs, já que ela descreve a resposta das superfícies à luz (Muinonen et al., 1995). Desde a descoberta dos TNOs, a técnica de fotometria tem sido a mais utilizada para caracterizá-los, suas diferentes aplicações usando grandes amostras de TNOs vão desde a determinação de magnitudes, diâmetros e albedos geométricos até a inferência de composições das superfícies (junto com outras técnicas como espectroscopia), a correção e restrições de modelos de forma, de rotação etc (Barucci, 2008).

A magnitude absoluta de um TNO é definida como a magnitude relativa medida ao longo de um ciclo de rotação completo, como se o objeto fosse observado em 1 au do Sol e 1 au da Terra e em oposição, ou seja,  $\alpha=0$  (Muinonen et al., 2010).

A determinação de magnitudes absolutas de TNOs é feita a partir de observações utilizando magnitudes reduzidas em curvas de fase (Bowell et al., 1989). Vale ressaltar que as magnitudes reduzidas  $M(1, 1, \alpha)$ , são magnitudes aparentes  $M(r, \Delta, \alpha)$  corrigidas pelos efeitos da distância heliocêntrica  $r$  e geocêntrica  $\Delta$ , nas quais o objeto é observado. Foram determinadas mais de 200 magnitudes absolutas  $H_\lambda$  usando dados fotométricos de nosso levantamento que tem obtido mais de 120 novas  $M(1, 1, \alpha)$  nos filtros  $V$  e  $R$ , e a compilação de mais de 2000  $M(r, \Delta, \alpha)$  dadas em 95 artigos, Isto faz da nossa base de dados a mais completa no intervalo do espectro óptico,  $V$  e  $R$ , o qual é ideal para a determinação da curva de fase. Vale ressaltar que a curva de fase precisa de medidas do espalhamento da luz no visível onde a componente da

luz refletida é mais fácil de ser medida. As curvas de fase foram computadas nos dois filtros,  $V$  e  $R$ , mediante a utilização de um método simples de ajuste por mínimos quadrados de uma quantidade significativa de curvas de luz sintéticas cujas soluções foram usadas para o calcular a partir da sua média  $H_\lambda$  e os correspondentes coeficientes de fase  $\beta_\lambda$  dos objetos.

Com os valores de  $H_V$  e  $H_R$  determinamos o que nós denominamos como cores absolutas  $H_V - H_R$  e coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$  para pouco mais de 130 TNOs. Com objetivo de procurar por agrupamentos que permitam entender a evolução dos TNOs como parte de populações específicas (i.e. possíveis populações na região do cinturão clássico), procuramos por relações dos parâmetros computados e parâmetros físicos e orbitais usualmente utilizados na literatura que indicam correlações das cores com o tamanho e inclinação dos objetos principalmente (Tegler & Romanishin, 1998, 2000; Peixinho et al., 2012, 2015).

Nossos resultados indicam que  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  estão correlacionados independentemente da distribuição orbital dos TNOs. Propomos a hipótese de que esta correlação indica propriedades de compactação e porosidade da superfície, o que poderia ser causado pela distribuição das partículas dispersoras de diferente tamanho e/ou o espaço entre esses dispersores.

A presente tese tem sido organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1. Apresentação da pesquisa, com uma breve descrição das questões básicas dos TNOs, seu estudo mediante técnica fotométricas, a justificativa e os objetivos.
- Capítulo 2. Descrição dos TNOs, algumas das suas propriedades fundamentais relevantes nos estudos fotométricos apresentados nesta tese.
- Capítulo 3. Estimativas de magnitudes e cores dos TNOs, descrição dos conceitos e relações fundamentais entre fluxos medidos e parâmetros físicos dos objetos.
- Capítulo 4. Descrição da obtenção de dados fotométricos, as metodologias de observação e a redução dos dados utilizados para produzir a base de dados utilizada nesta tese, a qual inclui dados observacionais e da literatura (magnitudes reduzidas) para mais de 200 TNOs.
- Capítulo 5. Apresentação dos estudos fotométricos realizados, descrição da metodologia, dos resultados obtidos e das novas questões que surgem a partir destes resultados.
- Capítulo 6. Apresentação da discussão e as conclusões.

### 1.3 Escopo do projeto e objetivos

A caracterização dos TNOs tem que lidar com o baixo brilho que caracteriza esses objetos distantes. Por este motivo, a análise fotométrica continua sendo uma ferramenta muito útil para o estudo de suas propriedades físicas e superficiais.

#### Objetivo

O objetivo deste trabalho é utilizar a técnicas de fotometria com a finalidade de estudar propriedades físicas dos TNOs e os centauros.

Como será descrito no Capítulo 4, os dados utilizados neste trabalho correspondem a um seguimento fotométrico, iniciado anos antes do início desta tese, que tem como principal objetivo aumentar o número de observações dos TNOs no intervalo do óptico nos filtros V e R de maneira substancial. Nosso levantamento está orientado a fornecer dados com razoável precisão, procurando que as imagens alcancem uma razão sinal-ruído  $S/N \simeq 30$ , embora as imagens individuais sejam combinadas, o tempo de exposição para cada medida é padronizado em 1800 s. As observações têm sido feitas utilizando diferentes telescópios como será explicado na seção 4.1.

O primeiro objetivo foi computar uma quantidade grande de magnitudes absolutas,  $H_\lambda$  e coeficientes de fase  $\beta_\lambda$  em V e R, a partir das curvas de fase. Para isto foi necessário aumentar a base de dados fotométricos, o que implicou na preparação de pedidos de tempo de telescópio, observação, compilação e análise dos dados. A metodologia seguida foi apresentada em Alvarez-Candal et al. (2016) como será descrita no Capítulo 3.

A distribuição e variedade das cores dos TNOs tem sido um problema em aberto desde os primeiros levantamentos fotométricos realizados nos anos noventa Luu & Jewitt (1996); Barucci et al. (2000). Então um segundo objetivo foi a análise estatística da amostra. Nós procuramos por correlações de  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$  com outros parâmetros físicos ou orbitais com objetivo de interpretar os comportamentos observados das curvas de fase e sua relação com as propriedades superficiais dos objetos.

O terceiro objetivo surgiu durante o desenvolvimento do projeto, com a identificação da correlação entre os parâmetros da cor absoluta  $H_V - H_R$  e o coeficiente de fase relativo  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$ , a qual consideramos relativa às propriedades de aglomeração das partículas e da porosidade das superfícies dos TNOs. Assim, procurando melhor entender esta correlação testamos se a componente de espalhamento múltiplo poderia revelar um efeito de sombreamento diferente nos filtros V e R.



## 2 Objetos transNetunianos e centauros

Atualmente o Minor Planet Center <sup>1</sup> lista cerca de 3.000 TNOs, orbitando a grandes distâncias heliocêntricas. Se estima que a masa total do cinturão dos TNOs seja  $\sim 0,1 M_{\oplus}$ , pelo qual acredita-se que a quantidade real de TNOs seja substancialmente maior do que a distribuição observada (Jewitt et al., 1998). Estudos recentes indicam que a masa total seja de  $1.97 \pm 0.35) \times 10^{-2} m_{\oplus}$  (Pitjeva & Pitjev, 2018).

### 2.1 Origem e descoberta

A atual distribuição dinâmica dos planetas e dos objetos menores sugerem que há uns 3,9 Ga suas órbitas sofreram rearranjos que envolveram instabilidades orbitais importantes, as quais provocaram a perda de quase todo o material do disco protoplanetário mediante processos de ejeção (Morbidelli et al., 2008; Gomes et al., 2008).

Accredita-se que esse material foi dispersado e ejetado formando assim as atuais estruturas dinâmicas onde se situam os TNOs e o reservatório de cometas conhecido como nuvem de Oort. A existência de objetos além de Plutão, foi proposta por Edgeworth (1943) e Kuiper (1951). No entanto foi somente após a descoberta do mecanismo de migração planetária, junto com a análise das órbitas dos cometas (Fernandez & Ip, 1984; Fernandez, 1980) que as bases para um novo paradigma do Sistema Solar foram colocadas. Assim, os planetas exteriores não estariam isolados no meio interplanetário, senão que deveriam coexistir com objetos menores, restos do disco protoplanetário, ou seja, tinha que existir um cinturão de objetos transNetunianos.

O primeiro TNO descoberto foi Plutão, embora tenha sido considerado um planeta por mais de 70 anos. No entanto sua alta inclinação orbital indicava que ele era um objeto diferente dos planetas (Malhotra, 1996). O segundo TNO descoberto foi 15760 Albion (1992 QB<sub>1</sub>) no começo dos anos 90's, o que resultou em monitoramentos orientados na procura de mais TNOs (Jewitt & Luu, 1993). Eventualmente, com a descoberta de TNOs com diâmetros semelhantes ao de Plutão, este foi reclassificado como um planeta anão no ano 2006. Atualmente quatro dos cinco planetas anões são TNOs.

Acredita-se que os TNOs foram formados além da linha dos gelos <sup>2</sup> e que sejam componentes primordiais do disco protoplanetário (Luu & Jewitt, 2002). Então, os TNOs são interessantes porque são um reservatório dos elementos primordiais, sendo que suas composições e distribuição orbital fornecem informações sobre a evolução do Sistema Solar.

Além dos TNOs, entre as órbitas de Júpiter (5.2 au) e Netuno (30 au) estão os centauros,

<sup>1</sup> <http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

<sup>2</sup> Na nebulosa planetária, a linha dos gelos é a distância da proto-estrela central, a partir da qual são atingidas temperaturas que permitem a condensação de grãos de gelo sólidos de água e compostos voláteis (entre 170-200 K). A temperatura de condensação depende da quantidade de elementos voláteis e da pressão do gás, assim as estimativas reais de temperatura e distância para cada composto dependem do modelo, para o caso do Sistema Solar a linha de gelos é estimada a partir de  $\approx 2-5$  au (Jewitt et al., 2007)

uma população com órbitas dinamicamente instáveis. Estudos dinâmicos sugerem que sejam uma população que representa um estado intermediário da evolução dinâmica entre TNO e cometa de curto período. Estima-se que seu deslocamento desde a região transNetuniana até atingir órbitas tipo centauro leve  $4 \times 10^7$  anos (Levison & Duncan, 1997).

O primeiro centauro descoberto foi 2060 Chiron (Kowal et al., 1979). Além dele, alguns outros cometas da família de Júpiter podem ser dinamicamente classificados como centauros. Alguns centauros apresentam atividade cometária, a qual se sugere que seja um processo temporal e recorrente devido a efeitos da radiação solar (Cruikshank et al., 2007) ou bombardeio da radiação cósmica que produzem transformação ou sublimação de materiais voláteis na superfície do objeto (Strazzulla & Johnson, 1991). Os TNOs e os centauros apresentam uma distribuição de cores heterogênea que compreende desde objetos neutros até extremadamente avermelhados. Essa variedade de cores tem sido interpretada como uma ampla variedade de composições superficiais dos TNOs, assumindo que não foram afetados significativamente pela radiação nas suas composições primordiais as quais poderiam corresponder aos locais de formação (Jewitt et al., 1998; Barucci et al., 2000).

No presente trabalho tanto os TNOs quanto os centauros, são considerados como parte de um único grupo. Algumas das propriedades dinâmicas e físicas dos TNOs são descritas no que segue.

## 2.2 Propriedades dinâmicas

A caracterização dinâmica dos TNOs tem implícitas restrições devido a tendências observacionais. Os objetos com baixas inclinações têm maior probabilidade de ser observados porque eles permanecem perto da eclíptica por tempos maiores do que aqueles com inclinações maiores, objetos com diâmetros pequenos nas áreas mais externas são mais difíceis de observar do que aqueles com tamanhos maiores.

Uma característica dinâmica fundamental dos TNOs é que uma grande percentagem deles se encontram em uma configuração orbital ressonante de movimentos médios<sup>3</sup> RMM ou de primeira ordem com Netuno. Entre estas, a ressonância 2:3 contêm o maior número dos objetos conhecidos como Plútinios. Kavelaars et al. (2008) propõe um grupo dos objetos ressonantes na qual se consideram todos os objetos que estão em MMR com Netuno e com órbitas altamente estáveis. De maneira geral os TNOs são agrupados de acordo com suas propriedades orbitais. Diferentes autores escolhem diferentes critérios, no entanto a maioria dos objetos coincidem nos grupos propostos por cada autor (Kavelaars et al., 2008; Gladman et al., 2008). A seguir mencionamos os principais grupos.

1. Cinturão clássico. É a estrutura dinâmica maior, contêm o maior numero de objetos observados, pode-se dividir de dois maneiras:

---

<sup>3</sup> Uma ressonância RMM é aquela na qual o quociente dos períodos de dos TNO e o planeta pode ser expresso como a razão de dois inteiros pequenos (m/n).



- a) Considerando três estruturas, i) cinturão clássico interno em  $a < 39,4$  au, com objetos não ressonantes, e ii) o cinturão clássico externo com semi-eixos  $a > 48,4$  au, que são objetos não-ressonantes com órbitas mais excêntricas,  $e < 0,24$ , e iii) o cinturão clássico principal também conhecido como objetos cubewanos (porque contém 1992 QB<sub>1</sub>).
- b) Com base nas inclinações em dois subgrupos: i) o cinturão clássico quente, com órbitas que se estendem de modo que  $30 \lesssim a \lesssim 50$  au,  $i > 5^\circ$  e excentricidades  $e < 0,3$ ; e o cinturão clássico frio com órbitas com  $42 \lesssim a \lesssim 47$  au,  $i < 5,0^\circ$  (principalmente entre  $0,05 < i < 0,2$ ) e localizado entre as MMR 2:1 e 3:4. (Kavelaars et al., 2008; Gladman et al., 2008).
2. Cinturão de objetos espalhados. Constituído por objetos com órbitas instáveis que apresentam variações em semi-eixo maiores do que 1,5 au em tempos menores do que 10 Myr, grandes excentricidades e periélios próximos a Netuno (a maioria com  $q > 34$  au), semi-eixo  $a > 50$  au, além de alguns TNOs com  $a > 30$  au.
3. Cinturão de objetos destacados. São TNOs que têm órbitas afastadas e com grandes excentricidades,  $a > 2000$  ua e  $e > 0.24$ . Sua dinâmica é estável, mas os possíveis mecanismos que colocaram os TNOs nessas órbitas são ainda estudados (Gladman et al., 2008).

No caso dos centauros, estes têm vidas dinâmicas muito mais curtas do que a idade do Sistema Solar. Os centauros não se encontram em configurações ressonantes com Netuno, mas estudos, através de simulações numéricas, indicam que durante sua evolução dinâmica podem ultrapassar a esfera de Hill do planeta em tempos menores do que 9 Mys. Isto leva a numerosos encontros próximos com Netuno e suas órbitas se tornam instáveis (Tiscareno & Malhotra, 2003). Por este motivo, se considera que os centauros sejam uma população transitória entre os TNOs e os cometas da família de Júpiter (ou JFC *Jupiter family comets*), objetos com períodos  $P < 20$  anos e parâmetro de Tisserand<sup>4</sup>  $2,5 < T < 3,0$ .

## 2.3 Propriedades físicas

A natureza dos TNOs faz com que eles sejam pouco brilhantes, o que dificulta a obtenção de estimativas confiáveis das suas propriedades físicas fundamentais tais como tamanhos (diâmetros), albedos e composições superficiais. No que segue vamos descrever algumas das propriedades físicas dos TNOs.

A ampla diversidade de cores observada nos TNOs é atribuída à diferentes regiões de formação (Schwamb et al., 2018). Isto implica em diferentes condições de formação e acreção

<sup>4</sup> O parâmetro de Tisserand é uma quantidade dinâmica que é aproximadamente conservada durante um encontro próximo entre um planeta e um objeto menor e que permite relacionar as propriedades dinâmicas do sistema antes e depois do evento. Para um corpo pequeno com uma órbita com semi-eixo " $a$ ", excentricidade " $e$ " e inclinação " $i$ " se define como  $T_p = \frac{a_p}{a} + 2\cos i \sqrt{\frac{a}{a_p}(1-e^2)}$ .

de material também. Como os TNOs foram afetados por processos de colisão e mudanças orbitais durante os estágios de migração planetária sua distribuição de tamanhos atual é um indicativo desses processos. Assumindo que a distribuição de tamanhos dos TNOs tem relação com seus tamanhos primordiais, é sugerido que os objetos maiores ( $D \gtrsim 400$  km) tem estruturas diferenciadas, ou seja, que eles têm uma estrutura interna complexa, i.e. núcleo rochoso, um manto (possivelmente uma ou várias camadas de gelos e até camadas com água líquida) e uma crosta superficial com um conteúdo específico de elementos voláteis (Hussmann et al., 2006; Rambaux et al., 2017). Por outro lado, no caso dos TNOs pequenos a suposição é de que eles sejam resultado da acreção do material ejetado das camadas superficiais de esses planetesimais, pelo qual apresentem estruturas não diferenciadas (Brown, 2012).

### 2.3.0.1 Albedo

O Albedo é a propriedade que quantifica a capacidade do TNO para refletir a luz, ele depende da composição superficial, essencialmente do índice de refração e das propriedades térmicas do objeto. Materiais altamente reflexivos apresentam valores de albedo altos. De maneira geral, uma adequada determinação do albedo precisa da determinação do diâmetro através de medidas da emissão térmica do TNO além da luz refletida porque, por exemplo: um objeto de pouco brilho não implica que ele necessariamente seja um objeto pequeno, ele pode ser na realidade um objeto grande e escuro com albedo baixo (Lebofsky & Spencer, 1989).

Os albedos dos TNO cobrem toda a gama de albedos observada para o resto dos corpos pequenos no Sistema Solar, e essa faixa excede significativamente a faixa observada para os asteroides, centauros e cometas (Lacerda et al., 2014). Por esse motivo, acredita-se que os TNOs poderiam ter sido formados em diferentes regiões passando por diferentes processos evolutivos, dinâmicos e diferentes tempos de exposição ao intemperismo espacial. As possíveis relações do albedo com outros parâmetros físicos ou orbitais podem ajudar a estabelecer relações mais claras entre esses processos.

### 2.3.0.2 Albedo e diâmetros

O diâmetro  $D$  e albedo  $p$  são propriedades importantes, particularmente para a determinação da composição e inferência da estrutura interna dos TNOs. As possíveis relações entre ambos parâmetros estão ligadas aos processos da formação e evolução do TNO.

A determinação do  $D$  depende diretamente de  $H$  e  $p$  (esta relação é definida no capítulo 3, seção 3.1, Eq. 3.12), pelo qual a determinação do albedo é muito importante. Objetos com diferentes diâmetros podem apresentar magnitudes da uma ordem similar se eles possuem albedos diferentes. Estimções mais precisas dos albedos dos TNOs são feitas com observações na faixa térmica de maneira conjunta com observações no visível (Barucci et al., 2004; Vilenius et al., 2011).

Os TNOs apresentam uma diversidade de tamanhos que vai desde umas dezenas de quilômetros até objetos do tamanho semelhante ao diâmetro de Plutão, como Eris com  $D > 2000$  km. De modo geral, podemos dizer que há objetos pequenos com diâmetros da ordem  $D < 400$  km, medianos com  $400 < D < 1000$  km e grandes com  $D > 1000$  km. Por exemplo, objetos

pequenos têm maior probabilidade de ter sido afetados por colisões, o que implica processos de renovação da superfície a partir de material interno ejetado (Durda & Stern, 2000; Davis et al., 2002; Grundy et al., 2005).

Estatisticamente, a distribuição de albedos e diâmetros dos TNOs não apresenta relações claras (Doressoundiram et al., 2002, 2008). Mas é sugerido que os albedos baixos indicariam a presença de materiais com conteúdo de orgânicos, enquanto os de albedo alto corresponderiam a composições de gelos mais puros (Barucci et al., 2004). Se sugere que os TNOs binários e os TNOs isolados poderiam apresentar relações de diâmetro e albedo, assumindo que todos os TNOs foram gerados a partir de colisões de objetos distribuídos ao longo do disco protoplanetário, e que eles foram afetados pelas instabilidades dinâmicas dos planetas, eles teriam por tanto, histórias dinâmicas e evolutivas diferentes (Grundy et al., 2005; Kovalenko et al., 2017).

Uma sugestão de agrupamento de TNOs com base no albedo, tem sido proposta por Lacerda et al. (2014), que apresenta uma análise de pouco mais de 100 TNOs com dados do Herschel para os quais consegue identificar dois grupos principais, possivelmente dois tipos diferentes de superfícies. Assim objetos de tamanho mediano mostram uma correlação entre cores e albedo, que indica que TNOs muito brilhantes ( $p_v \sim 0.15$ ) apresentam cores vermelhas e TNOs escuros (com  $p_v \sim 0.05$ ) apresentam cores mais neutras. Os autores concluem que os primeiros foram formados em regiões mais afastadas do que os últimos, e que a correlação indica uma descontinuidade nas composições do Sistema Solar primordial.

No cinturão clássico, os TNOs frios apresentam albedos menores do que os TNOs quentes, embora os últimos apresentam variações do diâmetro maiores do que os clássicos frios. Isto tem sido sugerido como uma pista possível do que os TNOs frios foram formados em regiões mais afastadas das suas órbitas atuais (Vilenius et al., 2014).

Atualmente, a base de dados de albedos e diâmetros computados com maior precisão, foi obtida mediante a utilização de dados de dois telescópios espaciais Herschel<sup>5</sup> e NASA's Spitzer Space Telescope<sup>6</sup>, é o levantamento conhecido como TNOs are Cool<sup>7</sup>, o qual apresenta estimativas de diâmetros, magnitudes absolutas e albedos de 136 TNOs, incluindo mais de 20 sistemas múltiplos (Lellouch et al., 2013).

### 2.3.1 Composições, densidades e porosidade

Devido a que os TNOs se encontram em uma região afastada do Sol suas composições são principalmente gelos de compostos voláteis e gelo de água, sendo os mais comum o nitrogênio  $N_2$ , metano  $CH_4$ , água  $H_2O$ , e dióxido de carbono  $CO_2$ . Compostos voláteis se encontram presentes na camada superficial do TNO, mas acredita-se também que objetos com um manto estão constituídos de gelos com compostos voláteis (Brown et al., 2006; Brown, 2012).

As superfícies também possuiriam elementos orgânicos processados, principalmente compostos de carbono conhecidos como Tolinas. As Tolinas são compostos orgânicos formados mediante processos de radiação de raios ultravioleta e de raios cósmicos a partir de materiais

<sup>5</sup> <http://sci.esa.int/herschel/>

<sup>6</sup> <http://www.spitzer.caltech.edu/>

<sup>7</sup> <http://public-tnoarecool.lesia.obspm.fr/Published-results.html>

que contêm carbono. Esses compostos apresentam uma cor vermelha pelo qual se sugere que eles são formados nas superfícies dos TNOs a partir de gelos com uma quantidade de carbono irradiados, principalmente do  $\text{CH}_4$ . Assim sua presença nas superfícies nos TNOs faz com que eles adquiram uma coloração avermelhada (Brown et al., 2006; Grundy et al., 2016).

O conteúdo de material rochoso como os silicatos depende da estrutura do TNO, sendo maior sempre que o objeto seja diferenciado. Os TNOs não diferenciados, por outra parte, são objetos com estruturas simples, constituídos por uma mistura de gelos e material rochoso (Grundy et al., 2005; Carry, 2012).

A densidade de um objeto depende de sua composição e estrutura interna. As densidades dos TNOs são importantes na determinação das composições, objetos com diferentes densidades podem ser resultado de diferentes núcleos, que por sua vez podem indicar diferentes regiões de formação no disco protoplanetário.

Os TNOs com  $D > 500$  apresentam superfícies com conteúdo rico em voláteis,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , e  $\text{CO}$  principalmente. objetos menores, normalmente observados a distâncias  $< 20$  au apresentam superfícies com apenas gelos de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ . (Brown, 2012).

Para a maioria dos TNOs as incertezas nas estimativas dos diâmetros e massas são muito grandes, o que afeta a estimativa de suas densidades também. Se conhece que TNOs maiores  $D > 1000$  km, apresentam densidades  $\rho > 1.5 \text{ g cm}^{-3}$  que coincidem com estimativas para composições com aproximadamente 50% de  $\text{H}_2\text{O}$  e 50% de material rochoso. Esses objetos poderiam apresentar uma estrutura parecida com a dos satélites maiores de Júpiter, Calisto, Ganimede e Europa, com camadas de água líquida no interior (Hussmann et al., 2006). Para os TNOs de tamanho  $D > 600$  km estima-se  $\rho > 1.0 \text{ g cm}^{-3}$  o que sugere que eles sejam compostos por gelo com alguns materiais mais densos. Por outro lado, para objetos menores  $D < 600$  km com  $\rho < 1.0 \text{ g cm}^{-3}$  sugere-se que eles possuem uma alta porosidade (Jewitt et al., 1998; Grundy et al., 2005).

É observado que os TNOs com diâmetros da ordem miles de km, como Plutão, possuem superfícies com um alto conteúdo de materiais voláteis enquanto que objetos com diâmetros menores,  $D \approx 500$  km, apresentam superfícies compostas de voláteis. No caso dos TNOs com  $500 > D > 1200$  km, é observada a presença de gelos de  $\text{H}_2\text{O}$  sendo possivelmente formados pela irradiação de voláteis, assim objetos medianos poderiam representar um estágio transitório de superfícies de objetos diferenciados Brown (2012).

No caso das superfícies de objetos com  $D < 500$  km, seus conteúdos de materiais voláteis dever ter sido esgotados, sendo que os gelos de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  seriam o produto da irradiação de voláteis misturados com alguns silicatos. Isso poderia explicar eles apresentarem superfícies escuras e cores mais neutras neutras Brown et al. (2006); Brown (2012).

O caso especial de superfícies como de Haumea e seus satélites, dominadas por gelos de água quase puros, sugere-se que elas sejam resultado da exposição do material de uma camada de gelo interna. Por exemplo, se Haumea fosse um objeto diferenciado cuja crosta superficial foi ejetada e formou seus satélites, então os denominados satélites de Haumea poderiam ser objetos não diferenciados com interiores compostos de gelos de água também (Brown, 2012). De modo

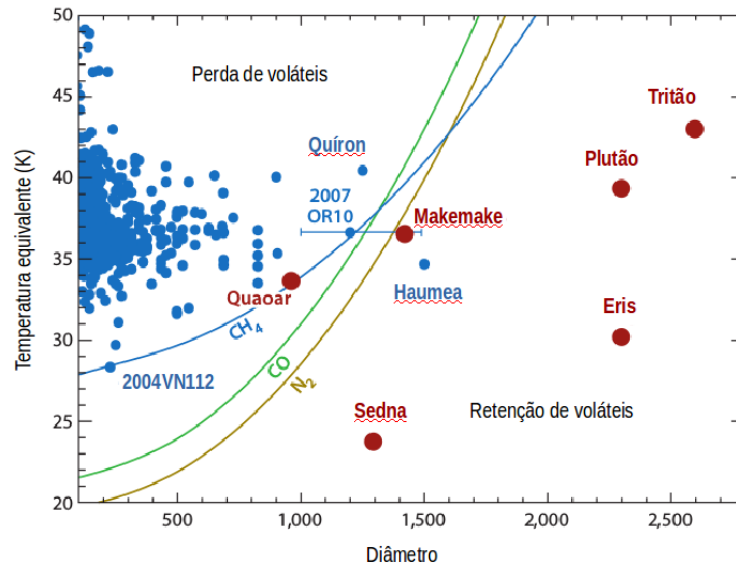


Figura 2.2 – Adaptação da Fig.2 de [Brown \(2012\)](#), as linhas sólidas indicam os limites da temperatura efetiva em função do diâmetro, para a retenção dos voláteis  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{CO}$ , na idade do Sistema Solar. Os objetos indicados são representados considerando suas temperaturas equivalentes de perda de voláteis. Para os TNOs com  $D < 500$  km, seu conteúdo volátil foi perdido.

geral, os TNOs apresentam densidades baixas  $\lesssim 1 \text{ g cm}^{-3}$ , entre  $0.7$  e  $0.8 \text{ g cm}^{-3}$ , assumindo sempre pouca ou nenhuma coesão, o que é esperado para objetos do tipo pila de entulho ou *rubble pile*<sup>8</sup>, ou objetos altamente fraturados ([Sheppard & Jewitt, 2002](#)).

As baixas densidades dos TNOs podem ser explicadas como consequência de uma alta porosidade dos objetos. A densidade aparente esperada para objetos com composição de gelo de água pura varia significativamente ao considerar diferentes porosidades ou diferentes quantidades de conteúdo rochoso. Por exemplo:  $\rho \gg 1.5 \text{ g cm}^{-3}$  corresponde para gelo + 50% material rochoso,  $1.5 \gtrsim \rho \gtrsim 1.0 \text{ g cm}^{-3}$  para gelo + 25% material rochoso,  $1.0 \gtrsim \rho \gtrsim 0.5 \text{ g cm}^{-3}$  para gelo + 25% de porosidade e  $\rho \lesssim 0.48 \text{ g cm}^{-3}$  para gelo + 50% de porosidade ([Lupo & Lewis, 1979](#)).

As altas porosidades dos TNOs, são explicadas como consequência da presença de partículas altamente irregulares (como os flocos de neve). Acredita-se que os TNOs se formaram como agregados, o que de fato implica que eles sejam objetos porosos, mas eles tiveram que evoluir interna e externamente também. Assim, uma porosidade maior pode ser causada por reestruturações internas e também pela exposição da superfície ao impactos de micro-meteoros possíveis efeitos de acreção de material e colisões ([McKinnon et al., 2008](#)).

### 2.3.2 Rotação e formas

A magnitude aparente de um TNO apresenta variações durante um período de rotação. Essas variações podem ser geradas por variações no albedo superficial do TNO, por não apresentar

<sup>8</sup> Um objeto rubble pile é um objeto que se formou a partir de numerosos pedaços de rocha que se juntaram por causa da influência da gravidade, portanto eles tem muito baixa densidade, porque existem grandes cavidades entre os pedaços que o compõem.

uma forma esférica ou por ser um sistema binário. As variações por rotação são quantificadas mediante curvas de luz que mostram o comportamento do brilho dos objetos durante períodos curtos no tempo. As curvas de luz são utilizadas nos estudos de rotação, forma e densidade dos TNOs. Com respeito das formas dos TNOs, pode-se assumir que eles apresentam dois tipos de formas: objetos esféricos (modelo de esfera de McLaurin) e objetos oblatos (modelo de elipsoide triaxial de Jacobi) e ambas formas podem ser inferidas da curva de luz.<sup>9</sup>

Uma curva de luz, mostra a variação periódica do brilho do TNO com respeito do tempo, o qual é resultado da sua rotação. A amplitude da curva de luz  $\Delta m$  é dada pela diferença entre o máximo e o mínimo das magnitudes medidas no período. Os picos de magnitude repetidos na curva de luz indicam onde começa e onde termina o período de rotação do objeto. No entanto, é possível observar picos duplos na curva de luz no mesmo período, os quais são interpretados como efeito da forma do objeto.

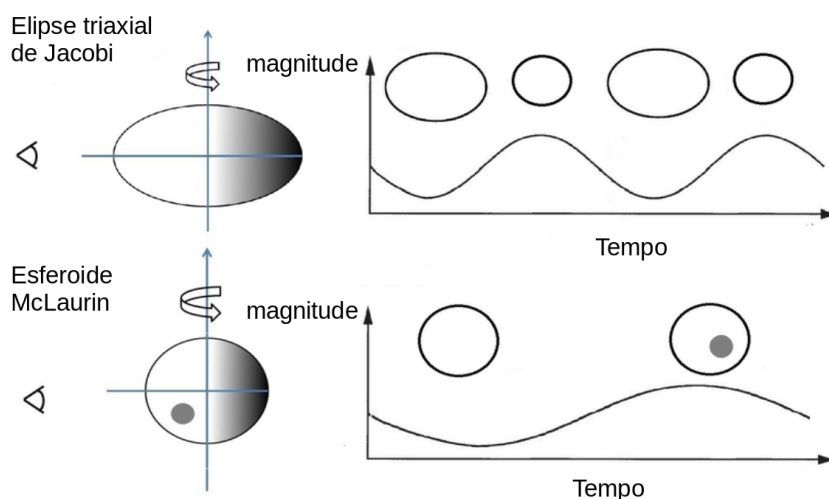


Figura 2.3 – Magnitudes vs. tempo para os casos de diferentes comportamentos das curvas de luz devidos à forma e variações de albedo. O caso do TNO como elipsóides triaxiais (acima), e o caso do TNO é um esferoide MacLaurin com uma variação de albedo em sua superfície. Adaptação da Fig.1 de [Thirouin et al. \(2014\)](#).

Assim, objetos oblatos (com semi-eixo  $a > b > c$ ) mostraram maiores amplitudes  $\Delta m$  do que objetos esféricos (com semi-eixo  $a = b \approx c$ ) que podem ser representados por um esferoide McLaurin, como se mostra na Figura 2.3. Os objetos oblatos apresentam dois máximos e mínimos de magnitude no mesmo período rotacional, a forma da curva corresponde às diferentes áreas iluminadas do esferoide na direção do observador, correspondendo o máximo e o mínimo do brilho (menor e maior valor em magnitude) a área maior do esferoide e a área menor respectivamente.

A maioria dos TNOs tem variações de magnitude devido à rotação  $0.1 < \Delta m < 0.2$  embora existam objetos variações maiores, e que ultrapassam 1.0 mag [Thirouin et al. \(2010\)](#),

<sup>9</sup> Essas formas são adequadas no cenário da formação de objetos a partir de união de sedimentos, como um problema de equilíbrio de massas em rotação uniforme também. Não entanto, deve-se considerar que existem outros factores, como a capacidade de coesão dos detritos que podem dar passo a formação de objetos com formas não esférico dependendo das propriedades dos materiais.

2012); Benecchi & Sheppard (2013).

Estima-se que, as variações das curvas de luz devidas à variações de albedo sejam da ordem  $\Delta m \lesssim 0.15$ . Por outro lado variações maiores estariam associadas à forma do TNO, ou seja, objetos com  $\Delta m > 0.15$  seriam menos esféricos. Assim, baixas amplitudes da curva de luz podem ser explicadas por i) superfícies uniformes, isto é sem variações de albedo na superfície, e ii) uma forma esférica. Por outro lado, grandes amplitudes das curvas de luz são explicadas por formas mais alongadas dos TNOs (Lacerda et al., 2008; Thirouin et al., 2012; Fernandez-Valenzuela et al., 2016; Ortiz et al., 2017).

A curva de luz de um TNO pode apresentar variações  $\Delta m$  a longo prazo, o que pode ser explicado por diferentes ângulos de aspecto ao ser observado em diferentes épocas. O ângulo de aspecto é aquele formado pelo eixo de rotação do objeto e a linha de visão do observador, na Figura 2.3, o ângulo de aspecto para ambos casos é  $90^\circ$  por exemplo. Dependendo das propriedades superficiais do objeto, variações no espalhamento da luz podem gerar incrementos na  $\Delta m$  medida do TNO em diferentes ângulos de fase (Belskaya et al., 2006) o que é importante para estudos das propriedades superficiais e de espalhamento dos TNOs, especialmente ao fenômeno conhecido como efeito de oposição que será explicado mais na frente.





## 3 Magnitudes e cores dos TNOs

### 3.1 Fundamentos das relações fluxo, albedo e magnitude

#### 3.1.1 Albedo

O albedo é a quantidade que define a capacidade que um objeto tem para refletir a luz. Para compreender melhor as relações de brilho e distâncias podemos nos basear no esquema mostrado na Fig. 3.4, onde temos um TNO iluminado (esfera cinza), a Terra (esfera azul) e o Sol (esfera amarela).

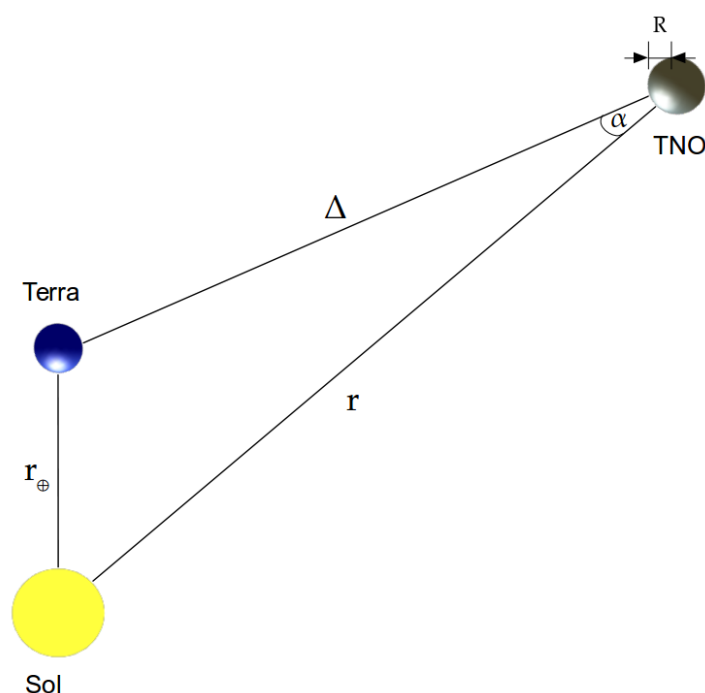


Figura 3.4 – Esquema de distâncias usadas na definição de fluxo.

A densidade do fluxo incidente no TNO em função da distância  $r$  é o fluxo solar

$$F = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}. \quad (3.1)$$

A seção iluminada  $S$  do TNO é definida como  $S = \pi R^2$ , com  $R$  equivalente ao raio do TNO. Então, o fluxo total incidente na superfície do TNO será,

$$L_i = \pi R^2 \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} = \frac{L_{\odot} R^2}{4r^2}. \quad (3.2)$$

A fração do fluxo total incidente que é espalhada pela superfície do TNO, ou albedo esférico  $A$  é definido como,

$$A = \frac{L_r}{L_i}, \quad (3.3)$$

Onde  $L_i$  é a luz incidente,  $L_r$  é a fração de luz espalhada em todas as direções, em todos os comprimentos de onda, em todos os ângulos de fase. Uma parte da luz é absorvida pela superfície e é reemitida no IR térmico. Então, desde que os TNOs são observados em um intervalo de ângulos de fase reduzidos, o albedo esférico  $A$  (ou também *Albedo Bond*), somente pode ser calculado de maneira aproximada. De maneira geral  $A$  é normalizado para o intervalo  $[0, 1]$ . O albedo geométrico  $p$ , é a razão entre a densidade de fluxo refletido pelo TNO em oposição e o fluxo que teria uma superfície Lambertiana do mesmo tamanho. Uma superfície Lambertiana é definida como uma superfície branca que reflete toda a luz de maneira difusa, ou seja, ela reflete todos os comprimentos de onda de igual maneira em todas as direções. Para um absorvedor perfeito  $p = 0$ , e para um refletor perfeito  $p = 1$ .

A aproximação do albedo esférico em qualquer comprimento de onda  $A = A(\lambda)$  pode ser estimada a partir da relação entre  $A$  e  $p$  (Russell, 1916; Morrison & Lebofsky, 1979) de maneira que,

$$A(\lambda) = p(\lambda)q(\lambda), \quad (3.4)$$

onde o termo  $q(\lambda)$  é a integral de fase, termo que pode ser expressado como,

$$q(\lambda) = 2 \int_0^\pi \frac{I(\alpha)}{I(0)} \sin(\alpha) d\alpha. \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Magnitudes

Conforme indicado na Eq. A2 de [Bowell et al. \(1989\)](#), a magnitude reduzida  $M(1, 1, \alpha)$  pode ser obtida a partir das magnitudes observadas (ou magnitudes aparentes)  $M(r, \Delta, \alpha)$  considerando a seguinte relação,

$$M(1, 1, \alpha) = M(r, \Delta, \alpha) - 5 \log(r\Delta), \quad (3.6)$$

as estimativas das magnitudes dos TNOs tem uma relação direta com  $\alpha = 0$  e as propriedades do TNO (tamanho, forma e composição, etc). A função de fase descreve o brilho da superfície iluminada do TNO medido para um determinado  $\alpha$ . A magnitude absoluta  $H$ , é o brilho da superfície iluminada do TNO para  $\alpha = 0$ , se ele fosse observado a uma distância heliocêntrica  $r=1$  au e uma distância geocêntrica  $\Delta = 1$  au.

A União Astronômica Internacional (UAI) determinou que o modelo de [Lumme & Bowell \(1981\)](#), LB81 na frente, fosse a base original para determinação dos albedos de asteroides mediante curvas de fase. O modelo determina a função de fase com respeito a diferentes componentes da luz refletida, o espalhamento único e o espalhamento múltiplo dos ftons em sua interação com os elementos da superfície. Assumindo semelhanças de textura dos asteroides e que a porosidade e rugosidade de suas superfícies são moderadas em relação ao comprimento de onda, as formas das curvas de fase e, portanto, os coeficientes de fase, podem ser caracterizados pelo parâmetro que quantifica o espalhamento múltiplo,  $Q$ . Assim, assumindo que  $Q$  se correlaciona com o  $p$ , o modelo utiliza relações empíricas entre o coeficiente de fase e  $Q$  com as quais albedos e diâmetros podem ser determinados com o uso exclusivo de dados fotométricos. O objetivo do

modelo é proporcionar uma generalização das diferentes superfícies dos asteroides através do qual é possível determinar a função de fase para asteroides de alto e de baixo albedo.

Esse modelo original foi adaptado depois por [Bowell et al. \(1989\)](#), que incorporou o efeito da oposição como resultado da atenuação do efeito de sombreamento entre as partículas dispersoras, e não somente como efeito da porosidade como LB81. No entanto, ambos os modelos desprezaram o efeito da refração, o qual também pode contribuir para o OE como indicado por [Muinonen \(1989\)](#).

Em [Muinonen et al. \(2010\)](#) um novo modelo foi apresentado, o modelo HG1G2, que permite descrever a integral de fase, o coeficiente de fase e a amplitude do efeito de oposição. Esse modelo foi definido como o padrão pela IAU e substituiu os anteriores.

Assim, levando em conta o modelo apresentado por [Lumme & Bowell \(1981\)](#), a correção por ângulo de fase de um asteroide pode ser calculada a partir de

$$H(\alpha) - H = -2.5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)], \quad (3.7)$$

onde  $H$  e  $G$  são parâmetros fotométricos fundamentais para cada asteroide.  $G$  é definido como o parâmetro da inclinação, que indica o gradiente da curva de fase que caracteriza o TNO,  $G \approx 0$  para curvas muito inclinadas e  $G \approx 1$  para curvas com inclinações baixas, o que indica albedos altos e baixos, respectivamente.

$H(\alpha)$  é a magnitude reduzida, a magnitude aparente no ângulo de fase  $\alpha$ , corrigida pela distância (isso é, assume-se que o objeto encontra-se a uma distância  $\Delta = 1$ , e  $r = 1$ ), e  $H$  é a magnitude absoluta do objeto, isso é, a magnitude reduzida do objeto em  $\alpha = 0^\circ$

$$H(\alpha) = M(1, 1, \alpha), \quad (3.8)$$

e

$$H(\alpha = 0) = M(1, 1, 0). \quad (3.9)$$

Os termos  $\Phi_1(\alpha)$  e  $\Phi_2(\alpha)$  são duas funções de fase específicas normalizadas em  $\alpha = 0$ . A diferença entre a  $H(\alpha)$  e  $M(1, 1, \alpha)$  de um pequeno corpo do Sistema Solar é igual à correção de fase como indica a Eq.3.7. A correção de fase  $\Phi(\alpha)$  depende da função de fase. Se pode dizer que a correção e fase seja,

$$\Phi(\alpha) = -2.5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)]. \quad (3.10)$$

reordenando podemos reescrever a Eq.3.7 como,

$$M(1, 1, \alpha) = H + \Phi(\alpha). \quad (3.11)$$

A magnitude  $H_\lambda$ , tem uma relação com o diâmetro do objeto  $D$  e  $p_\lambda$  tal que:

$$D[km] \approx C \times 10^{3-H/5} p_\lambda^{-0.5}. \quad (3.12)$$

Assim, computada a magnitude  $H$  e o  $p_V$ , o diâmetro pode ser calculado. No entanto, deve-se considerar que as estimativas do  $p_V$ , as simplificações na estimativa de  $H$  e seus erros pela falta de precisão fotométrica, interferem na precisão do diâmetro também.

## 3.2 Magnitudes Absolutas dos TNOs

Define-se como magnitude absoluta de um asteroide, “sua magnitude aparente média na banda V de Johnson ao longo de um ciclo de rotação completa (a fim de explicar a forma irregular da maioria dos asteroides que apresentam uma variação periódica de brilho) quando observado a 1 ua do Sol e da Terra e a ângulo de fase solar  $\alpha = 0^\circ$  Muinonen et al. (2010).

Em uma primeira aproximação (sem considerar efeitos relativísticos) podemos considerar que a luz se propaga em linha reta. Então um asteroide de forma esférica, iluminado em oposição e com uma superfície perfeitamente lisa, refletiria a luz sem variações durante um período de rotação. Na realidade, as formas irregulares, o meio particulado das superfícies, as asperezas e outras particularidades da superfície podem contribuir para variações nas magnitudes.

Os TNOs, assim como os asteroides, não são observáveis em todos os ângulos de fase. A maioria dos asteroides não atingem  $\alpha > 30^\circ$ , isso levou à criação de modelos que levam em conta as variações na estimativa de  $H$ . Isso sendo feito mediante a determinação de uma função que descreve o comportamento do brilho do objeto.

A função de dispersão de fase ou função de fase, descreve a distribuição angular da intensidade da luz dispersada pela superfície planetária em um determinado comprimento de onda. A forma da função e o método para resolvê-la dependerão dos dados observacionais disponíveis (Bowell & Lumme, 1979; Hapke, 1981; Shkuratov et al., 2002; Muinonen et al., 2010).

Para o caso dos TNOs, devido ao fato que eles são observados em ângulos de fase pequenos, um modelo linear é aceitável para realizar estimativas de  $H$  e do comportamento fotométrico dos objetos em uma primeira aproximação (Alvarez-Candal et al., 2016).

## 3.3 Cores dos TNOs

A cor de um TNO é uma propriedade básica obtida a partir da diferença em magnitude medida em vários filtros. Assim, um objeto com uma cor neutra se refere a objetos que refletem de igual maneira em vários filtros. Uma comparação dos índices de cor do Sol com respeito àqueles do objeto permite determinar qual é o comprimento de onda predominantemente refletido pela sua superfície, i.e. para o Sol  $(V - R)_\odot = 0,36$ , então  $(V - R) < 0,36$  indica uma cor azul,  $(V - R) > 0,36$  uma cor vermelha, e  $(V - R) \approx 0,36$  uma cor neutra. As cores podem ser usadas como uma primeira aproximação para espectros de refletância do TNO.

Os TNOs apresentam uma ampla gama de cores que vai do azul e neutro até muito vermelho. A cor depende diretamente da resposta da superfície (estrutura e composição) e portanto, a variedade das cores pode ser interpretada como uma abundância de diferentes superfícies, o que seria uma consequência de que os TNOs foram formados em sob diferentes condições em diferentes regiões da nebulosa protoplanetária, e de que passaram por diversos processos evolutivos.

### 3.3.1 Cores de TNOs e grupos

Visto que, em primeira instância as superfícies dos TNOs mantêm suas composições primordiais melhor do que objetos menores mais próximos ao Sol, se esperaria que suas cores descreveriam melhor as composições correspondentes as diferentes regiões de formação, bem como as características derivadas de uma mesma evolução. Então a evolução dinâmica dos objetos poderia fornecer informações da sua evolução superficial também. Entretanto, na literatura não tem sido relatada nenhuma evidência clara da correlação das cores dos TNOs com suas propriedades físicas, nem com seus parâmetros orbitais. Vale mencionar que foram reportadas algumas tendências com os parâmetros orbitais para grupos específicos de TNOs, embora questionáveis devido à indefinição dos objetos entre diversos grupos. Estas tendências serão melhor descritas no que segue.

Entre os grupos dinâmicos de TNOs, aquele dos TNOs Clássicos é o que apresenta algumas relações que podem ser consideradas como evidência de propriedades superficiais similares. Eles mostram uma relação de cor ( $B - R$ ) e excentricidade  $e$ , ou seja, a maiores excentricidades os objetos são mais azuis (Hainaut & Delsanti, 2002; Hainaut et al., 2012). Se a excentricidade aumenta então o periélio diminui, pelo qual se esperaria observar uma relação das cores com o periélio a qual tem sido sugerida por Tegler & Romanishin (2000), onde se indica que os TNOs com  $q > 40$  au são mais vermelhos.

O fato acima pode ser interpretado da seguinte maneira: objetos azuis são dinamicamente excitados porque experimentaram eventos de colisão e sofreram revestimento da suas superfícies, enquanto objetos vermelhos apresentam superfícies mais afetadas pelo intemperismo espacial. Não obstante, a relação da cor e periélio apresenta uma certa dependência com a magnitude do objeto, assumindo que os albedos têm uma distribuição uniforme com a magnitude. É observado que, para objetos de magnitudes menores ( $H_R < 6,5$ ) essa relação é mais forte, donde poderia estar condicionada a um determinado diâmetro Peixinho et al. (2003).

O subgrupo dos TNOs clássicos frios (com inclinações  $i < 15^\circ$ ) apresentam cores vermelhas, enquanto que o subgrupo dos clássicos quentes apresenta cores mais azuis (Tegler & Romanishin, 2000; Trujillo & Brown, 2002; Doressoundiram et al., 2008; Peixinho et al., 2008). É possível que esses comportamentos distintos indiquem de duas populações com diferentes origens, as quais ficaram superpostas devido à migração de Netuno (Nesvorn, 2015; Gomes et al., 2018).

Os centauros apresentam uma correlação da cor e excentricidade, embora diferente do caso dos TNOs clássicos. Eles não apresentam relação de cores com periélio (Peixinho et al., 2004). O resto dos grupos dinâmicos não apresentam nenhum tipo de correlação.

Existem duas linhas em discussão para explicar o comportamento das cores dos TNOs, i) que eles apresentam uma distribuição contínua e unimodal na qual as cores indicam diferentes estágios evolutivos para diferentes composições e ii) que eles apresentem uma tendência bimodal, na qual seria possível distinguir entre duas populações com diferentes tipos de evolução e composições superficiais. No entanto, esses comportamentos de uma análise estatística robusta a qual depende do tamanho da amostra, sendo que uma tendência pode ser resultante apenas de um viés observacional

Barucci et al. (2000) definiu quatro grupos taxonômicos a partir das cores dos TNOs e determinou espectros de refletância a partir de,  $R(\lambda) = 10^{\pm 0.4(C_\lambda - C_{\lambda_0})}$ , onde  $C_\lambda$  e  $C_{\lambda_0}$  são as cores  $\lambda - V$  do objeto e do Sol, respectivamente. Esses espectros de refletância foram classificados em quatro grupos, BB, BR, IR e RR, onde BB e RR indicam os extremos da distribuição, com TNOs neutros com inclinações baixas e muito vermelhas com inclinações altas, respectivamente. De maneira diferente os grupos, e BR e IR são constituídos por TNOs com escalas de avermelhamento menores e indicam objetos com superfícies em estágios transitórios de um extremo a outro.

O estudo de cores de TNOs mostra, desde seu início, que eles apresentam avermelhamento. O avermelhamento é observado em todos os grupos dinâmicos dos TNOs, mas as cores de TNOs de maneira geral não revelam indicações claras das possíveis relações entre sua distribuição orbital e outras propriedades físicas como albedo, composição ou tamanho, que poderiam ajudar para estabelecer uma taxonomia. A capacidade de um TNO de rejuvenescer sua superfície depende em grande parte de sua capacidade para reter uma atmosfera (Grundy et al., 2016), ou uma coma no caso de objetos ativos, o que por sua vez depende do tamanho do objeto. No caso dos TNOs clássicos objetos com  $D > 150$  km (Delsanti et al., 2004)

Os estudos fotométricos precisam de mais dados observacionais, pois as distribuições observadas precisam ser avaliadas através de uma análise estatística robusta além de considerar os processos evolutivos que afetam a superfície dos objetos, tais como: ejeções de material mais interno ou desgasificação, intemperismo espacial, interação atmosférica, entre outros.

### 3.3.2 Avermelhamento

As interações entre os planetas e o cinturão dos TNOs seriam propícias a colisões, as quais se estima que diminuiriam com o aumento da distância heliocêntrica Farinella & Davis (1996). Assim, a diversidade e aparente distribuição homogênea das cores, pode ser explicada num cenário de dinâmica caótica que originou a atual estrutura do Sistema Solar. Inicialmente, os estudos das cores de TNOs e centauros indicavam uma distribuição das cores avermelhados que era interpretada como possíveis uniformidades das propriedades de superfícies. O avermelhamento pode ser explicado considerando o intemperismo espacial, radiação e bombardeio de partículas no espaço, que geram diferentes graus de alteração das superfícies, cujos efeitos são proporcionais à idade do objeto, assim superfícies mais antigas seriam mais vermelhas (Luu & Jewitt, 1996).

A primeira análise de cores  $B - V$ ,  $V - R$ ,  $V - I$  foi apresentada por Barucci et al. (2000), na qual os objetos apresentavam uma gama de cores de neutro até muito vermelho. Tal variedade não permite assumir que os TNOs sejam de origem local, porque isso implicaria processos de formação muito complexos pelo qual a atual distribuição seria associada à diferentes camadas superficiais, produzida por possíveis colisões.

Os trabalhos mais destacados de taxonomia são aqueles apresentados por Barucci et al. (2000). Outros trabalhos foram dirigidos para a busca de correlações da cor com os parâmetros orbitais, mas sem nenhum resultado claro, i.e. Doressoundiram et al. (2002) observou um excesso de objetos vermelhos a distâncias maiores do que 40 au, e uma tendência cores neutras em inclinações maiores do que  $5^\circ$ , no entanto tais correlações foram interpretadas como viés observacionais.

A literatura não reporta nenhum mecanismo, dinâmico ou de processos evolutivos da superfície que expliquem completamente a distribuição das cores dos TNOs. Estabelecer relações das cores com parâmetros físicos e orbitais ajudaria para estabelecer se ela é resultado de uma diversidade das composições da superfície ou se é devida a processos de evolução dos objetos.

### 3.3.2.1 Bimodalidade

Alguns autores indicam a existência de uma bimodalidade nas cores, a qual tem sido defendida como um efeito da evolução dinâmica de TNOs. Esta bimodalidade não pode ser atribuída a um viés observacional, já que atinge uma significância estatística apenas para alguns grupos.

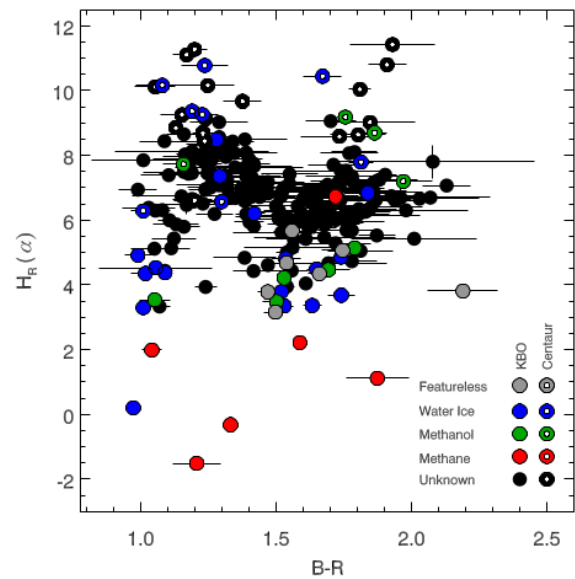
Dos primeiros levantamentos fotométricos focados na análise das cores [Luu & Jewitt \(1996\)](#) apresentam resultados sem bimodalidade. A bimodalidade foi, em seguida, proposta por [Tegler & Romanishin \(1998\)](#), onde os dados apresentados indicavam uma bimodalidade na qual se podiam distinguir dois grupos bem definidos de objetos, um com cores apenas mais vermelhas que a cor do Sol, e outra constituída por objetos mais vermelhos sendo, inclusive, os objetos mais vermelhos conhecidos até então no Sistema Solar (apenas recentemente tem-se identificado TNOs extremamente vermelhos). No entanto, essa bimodalidade foi obtida a partir do análise de um grupo pequeno de TNOs e centauros, apenas 15 objetos, os erros observacionais indicavam que três objetos poderiam pertencer a qualquer dos grupos. Mais tarde [Barucci et al. \(2000\)](#), indicou não ter encontrado evidência de bimodalidade para uma amostra de 8 objetos observados nas quatro bandas principais de fotometria de banda larga,  $V, B, R, I$ .

Assim, durante a primeira década de estudos dos TNOs o resultado principal que a maioria dos levantamentos fotométricos convergiram, e que continua em aberto, é que eles apresentam cores vermelhas e que são observados em todas as populações dinâmicas de objetos conhecidas. As explicações possíveis para o avermelhamento da cor são: i) Que ele pode ser maior para corpos mais distantes pois a formação das moléculas orgânicas é favorecida nas regiões externas do disco protoplanetário propiciando a coloração avermelhada das superfícies; e ii) A distribuição heterogênea das cores poderia ser resultado da quantidade de colisões que produziram revestimento das suas superfícies durante os estágios iniciais do Sistema Solar [Luu & Jewitt \(1996\)](#); [Tegler & Romanishin \(1998\)](#); [Barucci et al. \(2000\)](#).

Eventualmente a hipótese de bimodalidade surgiu novamente com os resultados apresentados por [Peixinho et al. \(2012\)](#). Neste trabalho os autores apresentaram uma compilação de cores,  $B - R$  vs.  $H_R(\alpha)$  para 253 objetos. A bimodalidade aparece considerando objetos com  $H_R(\alpha) \gtrsim 6.8$ , e apresenta diferentes graus de significância estatística que depende da separação em diâmetros.

A bimodalidade se mantém quando, i) TNOs e centauros são considerados, ii) quando são considerados unicamente os centauros, e iii) quando se consideram somente os TNOs  $H_R(\alpha) \gtrsim 6.8$  ( $D \approx 400$  km). Como se observa na Fig. 3.5, o diagrama da cor apresenta um espaço vazio no caso dos objetos com  $H_R(\alpha) \gtrsim 5.0$ , centrado em  $B - R = 1.5$ . Os dados indicam uma forte correlação entre a  $H_R$  e o diâmetro com um índice de anti-correlação Spearman  $r_s = -0.92_{-0.02}^{+0.03}$  e com um nível de significância estatística  $p \ll 0.01\%$  que tem sido testada com dados de 74

Figura 3.5 – Distribuição bimodal das cores B-R vs  $H_R$ , na qual a aparente bimodalidade se incrementa com relação à diminuição do diâmetro ( $H \approx D$ ), sendo a brecha maior nos objetos com  $H > 6,5$ . Figura No.1 de Peixinho et al. (2012).



objetos observados com os telescópios espaciais Herschel e Spitzer. Os autores concluem que a bimodalidade poderia ser relativa ao diâmetro dos objetos, sob a hipótese de que diminui em relação ao aumento do diâmetro. Isto, por sua vez, poderia ter uma relação com a composição, com o argumento de que a capacidade de retenção de voláteis voláteis é proporcional ao aumento do diâmetro Schaller & Brown (2007). No entanto, a distribuição de objetos conhecidos com voláteis não indica nenhuma relação clara no espaço fase da  $B - R$  vs.  $H_R$ , e a significância estatística da correlação desaparece quando os 253 objetos são considerados.

Contudo, se a bimodalidade da cor e magnitude for real, ela deve ser relativa a região de formação. Então, o natural seria esperar que esses parâmetros mostrassem alguma relação com a composição e/ou estrutura das superfícies.

Assim, outra relação que poderia fornecer mais informações sobre bimodalidade é através do albedo. Com dados obtidos com o telescópio Herschel, Lacerda et al. (2014) encontraram que as distribuições cor-albedo dos TNOs, apresentam dois conjuntos principais, um de objetos brilhantes, alto albedo e superfícies avermelhadas, e outro com objetos mais escuros, baixo albedo e com cores mais neutras. Devido ao fato de que o grupo de TNOs com alto albedo apresenta órbitas externas a órbita de Netuno, se sugere que esses objetos compartilham uma mesma origem. Embora, o fato dos objetos neutros terem uma menor probabilidade de ser observados nessas distâncias deixa em aberto a dúvida de que os grupos observados sejam reais. Isso porque há objetos para os quais suas incertezas permitiriam classificá-los em qualquer um dos grupos.

Pál et al. (2015) apresenta dados de albedo e cor de 2012DR<sub>30</sub>, que é um objeto que fica exatamente no meio de ambos grupos e que junto com aqueles que ficam indeterminados poderiam representar uma população de objetos ainda não observada que ocuparia o espaço entre ambos grupos.

Posteriormente a bimodalidade identificada por Peixinho foi apresentada novamente com uma amostra de dados maior. O novo estudo consistiu em uma análise estatística das variações dos principais elementos que poderiam afetar a confirmação da bimodalidade: as barras de erro,



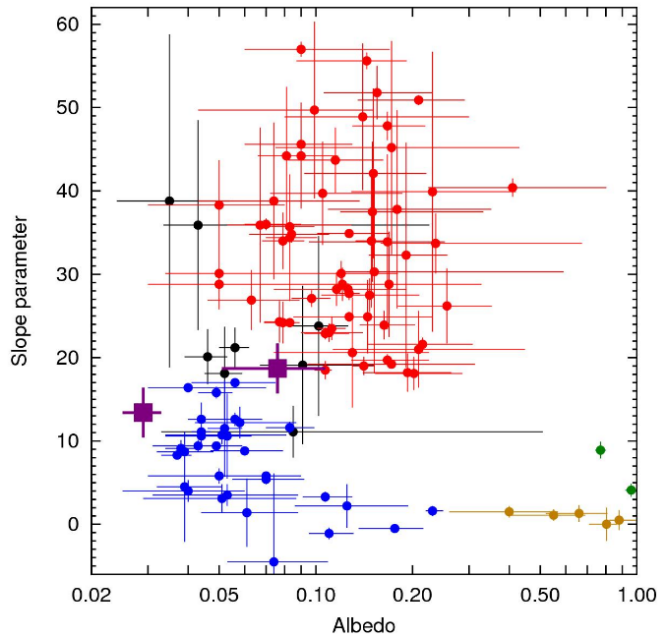


Figura 3.6 – A figura amostra a relação do  $p_v$  e inclinações espectrais,  $S$ , para 111 TNOs. Os pontos em vermelho e azul indicam as agrupações identificadas por [Lacerda et al. \(2014\)](#) entanto que os pontos pretos indicam objetos que ficam no indeterminados, os pontos amarelos indicam objetos tipo Haumea e os pontos verdes os TNOs de maior tamanho. Os quadros roxos indicam os objetos 2013AZ<sub>60</sub> e 2012DR<sub>30</sub>. Figura No.7 de [Pál et al. \(2015\)](#).

o tamanho da amostra e os filtros. O estudo conclui que, todas as famílias dinâmicas precisam de maiores amostragens para garantir a detecção de possíveis correlações, mas também que, as barras de erro sobrepõem limites na detecção das correlações, sem levar em conta o tamanho da amostra, o que dá uma sugestão importante a considerar nas estimativas das mesmas. Outra conclusão importante é sobre o grupo dinâmico dos TNOs clássicos que não mostram nenhuma relação entre os índices de cor [Peixinho et al. \(2015\)](#).

Assim, podemos concluir que a evidência sobre a bimodalidade não é conclusiva. Isto não significa que não pode existir senão que, deve-se considerar que há viés observacionais na amostra dos TNOs conhecidos atualmente. Então, se o calculo da correlação que confirma a bimodalidade for feito usando parâmetros que dependem de outros parâmetros, observá-la de maneira clara a partir de uma amostra com viés se torna impossível.



## 4 Base de dados fotométricos de TNOs

A fotometria de banda larga tem sido a ferramenta inicialmente utilizada no estudo dos TNOs, mostrando-se eficiente para a caracterização desses objetos. A técnica de fotometria resulta ótima para o estudo dos TNOs com telescópios terrestres porque é a mais econômica em termos de tempo do telescópio, e que permite obter dados suficientes para realizar a caracterização básica tanto de objetos individuais quanto de populações. Os estudos fotométricos fornecem informações fundamentais para o entendimento dos TNOs e, apesar de apresentar limitações, são ponto de partida para análises mais complexas como por exemplo espectroscopia da superfície e a exploração *in situ*.

A nossa base de dados inclui mais de 2.400 magnitudes reduzidas, cada uma representando uma noite individual. Ela contém magnitudes aparentes nos filtros  $V$  e/ou  $R$  calculadas para 340 TNOs assim como as informações referentes às configurações de observação: a distância heliocêntrica  $r$ , a distância geocêntrica  $\Delta$  e o ângulo de fase  $\alpha$ , todos valores utilizados para estimar  $M(1, 1, \alpha)$ . Os objetos pertencem a todas as classes dinâmicas de TNOs e ao grupo dos centauros. Na base de dados foram incluídas informações sobre os telescópios e os instrumentos utilizados em cada observação, além das referências encontradas na literatura com dados reportados por outros autores. A estimativa das magnitudes reduzidas é descrita detalhadamente a seguir.

### 4.1 Observação de TNOs com telescópios terrestres

O trabalho apresentado nesta tese corresponde à análise de dados fotométricos de TNOs em bandas óticas, com observações feitas ao longo de vários anos usando diferentes telescópios terrestres, indicados na Tabela 4.1. Também foram incluídos novos dados derivados de novas observações realizadas no Observatório de Calar Alto, com o telescópio de 2,2 m, e com o telescópio SOAR de 4,1 m. Mais dados da literatura foram incorporados também.

Telescópio	Instrumento	Observatório	Localização
1)Southern Astrophysical Research SOAR 4,1 m <sup>1</sup>	SOI	Cerro Tololo	Chile
2)Centro Astronómico Hispano-Alemán CAHA 3,5 m <sup>2</sup>	CAHA	Calar Alto	Espanha
3)Centro Astronómico Hispano-Alemán CAHA 2,2 m <sup>3</sup>	CAHA	Calar Alto	Espanha
4)Telescópio Isaac Newton (INT) de 2,5 m <sup>4</sup>	câmera direta	Roque de los Muchachos	Espanha
5)Telescópio de 1,5 m, OSN <sup>5</sup>	câmera direta	Serra Nevada	Espanha
6)IMPACTON 1,0 m <sup>6</sup>	câmera direta	Sertão de Itaparica	Brasil
7)Liverpool 2,0 m <sup>7</sup>	Live	Roque de Los Muchachos	Espanha

Tabela 4.1 – Telescópios usados em nosso levantamento fotométrico.

<sup>1</sup> <http://www.ctio.noao.edu/soar/content/soar-optical-imager-soi>

<sup>2</sup> <https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/3.5m.html>

Durante o período de desenvolvimento do presente trabalho foram solicitada duas campanhas observacionais, das quais conseguimos observar TNOs somente em um período aprovado no ano 2015. No segundo período as condições climáticas não foram favoráveis e não conseguimos fazer nenhuma observação. Os detalhes dos instrumentos e os telescópios são descritos nos sites indicados.

#### 4.1.1 Critérios de seleção de objetos para observação

Os TNOs são objetos nos quais o brilho é função ao tamanho e sua distância ao Sol. Os TNOs estão em grandes distâncias heliocêntricas e a maioria tem órbitas muito excêntricas, pelo qual eles são maiormente observados perto do seu periélio. Em nossa amostra os objetos mais brilhantes são centauros com magnitudes da ordem de  $V_{mag} \gtrsim 18$ , enquanto os menos brilhantes são TNOs dos quais alguns deles atingem magnitudes  $V_{mag} > 26$ .

Para a seleção dos objetos devemos levar em consideração a magnitude aparente aproximada do TNO e o telescópio que será utilizados para a observação. A razão sinal ruído (S/R) é definido como a razão entre a sinal do objeto e a incerteza no sinal entregue ou ruído (isto é o sinal do objeto mais o sinal do fundo do céu, a corrente escura e a leitura do ruído da eletrônica). A S/R a ser utilizada dependerá da ciência que se deseja fazer. Para medições fotométricas a comboam S/R deve-se ter a menor contribuição possível do céu e a máxima contagem de fótons do TNO. Para nosso trabalho as imagens são obtidas com  $S/N \sim 30$ , o que significa  $\sigma \sim 0.03$  o qual é suficiente para observar o objeto.

## 4.2 Observações

As observações apresentadas neste trabalho foram obtidas em noites escuras e cinzas. Vale ressaltar que a base de dados inclui diferentes telescópios, sendo que o trabalho é mais focado na acurácia das magnitudes do que na precisão.

As observações no SOAR se concentraram nos objetos menos brilhantes, os quais atingem magnitudes maiores  $22V_{mag}$ . Neste trabalho foram incluídas novas magnitudes aparentes para um total de 34 TNOs que, junto com seus parâmetros de observação, são indicados na Tabela 4.2. No que segue será descrita a metodologia de observação, redução de dados e computo de magnitudes reduzidas, magnitudes absolutas e coeficientes de fase.

#### 4.2.1 Metodologia de observação

As efemérides de TNOs observáveis foram obtidas utilizando a ferramenta do Horizons Jet Propulsion Laboratory <sup>8</sup>, os horários preferentemente devem considerar os tempo no qual os TNOs sejam observados próximos ao zênite ou pelo menos com pequenas massas de ar. A massa

<sup>3</sup> <https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/2.2m.html>

<sup>4</sup> <http://www.ing.iac.es/Astronomy/telescopes/int/>

<sup>5</sup> <http://www.osn.iaa.es/content/15-m-telescope>

<sup>6</sup> <http://www.on.br/impacton>

<sup>7</sup> <http://telescope.livjm.ac.uk>

<sup>8</sup> <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbwoobs.cgi>

de ar é o comprimento da coluna atmosférica na direção da observação. Sempre que possível, nossos objetos foram observados em massas de ar  $< 1.41$ .

Para a identificação dos alvos no campo utiliza-se o software interativo Aladin Sky Atlas<sup>9</sup>. Procuramos por alvos em campos do céu com a menor quantidade possível de estrelas ao redor e preferencialmente sem estrelas brilhantes próximas ao TNO.

As observações de TNOs com telescópios terrestres requerem tempos de exposição longos. Para cada imagem de ciência estabelecemos um tempo de exposição padrão de 1800s, com objetivo de atingir a S/R mínima requerida do TNO. Na prática esse tempo não pode ser atingido em uma única exposição, devido ao fato de que tempos de exposição longos levam a problemas de saturação do CCD pelas estrelas próximas ao objeto e a uma maior probabilidade das imagens ser afetadas pela presença de raios cósmicos. Por isso, as nossas imagens de ciência foram obtidas a partir de várias imagens com integrações de tempos de exposição menores (600 s, mas com variações dependendo do telescópio). Assim, procuramos evitar os problemas antes mencionados. As observações foram realizadas fazendo imagem direta e usando filtros padrões nas bandas *V* e *R*.

As imagens foram combinadas com a ferramenta `imcombine` (o alinhamento é feito com `imalign`) e usando uma operação de combinação com a mediana. Usar a mediana é útil porque é menos sensível aos valores extremos das medições, assim são descartados os pixels quentes e os correspondentes à raios cósmicos. Os raios cósmicos são partículas de alta energia que podem ser detetadas pelo CCD durante a integração da imagem.

Tomamos imagens bias e flats para a calibração das imagens científicas. Esses calibradores são usados para minimizar os erros sistemáticos e as heterogeneidades do CCD.

Foram observadas estrelas padrão do catálogo do Landolt (2009) as quais foram observadas próximas ao meridiano em diferentes massas de ar, para calcular adequadamente o ponto zero. As imagens foram realizadas com binning 2x2 para minimizar o tempo de leitura do CCD.

## 4.3 Fotometria

### 4.3.1 Redução das imagens FITs

Todas as imagens foram calibradas, corrigidas e reduzidas usando arquivos de calibração diários e rotinas padrão do IRAF. Estrelas padrão de Landolt (2009) e Clem & Landolt (2013) foram usadas para calcular os pontos zero. Os coeficientes de extinção médios das cores foram usados para calibrar as magnitudes instrumentais.

A calibração das imagens de ciência refere-se a correção de efeitos sistemáticos, implicando na criação de um master bias (uma imagem FIT que caracteriza o viés do CCD) e um master flat (uma imagem fFIT que caracteriza um campo plano medido em um filtro específico).

O máster bias serve para corrigir o ruído produzido pelas variações intrínsecas à eletrônica do CCD que alguns pixels podem experimentar. Para criá-lo usamos várias imagens com tempo

---

<sup>9</sup> <https://aladin.u-strasbg.fr/>

de exposição quase nulo e com obturador fechado. A combinação de imagens bias foi feita usando a ferramenta `zerocombine`. O máster bias é extraído das imagens de ciência (em qualquer filtro) mediante uma operação de subtração simples. O master bias é subtraído das imagens de ciência mesmo das imagens de campo plano.

O máster flat é a imagem de um campo iluminado uniformemente. Os flats podem ser obtidos observando o céu durante o crepúsculo e/ou a alba, momentos nos quais a iluminação do céu é mais uniforme. Os flats podem também serem feitos utilizando uma lampada halógena e uma superfície uniforme branca com a cúpula do telescópio fechada. O objetivo de obter imagens uniformizadas é detectar as diferenças nas contagens devidas à sensibilidade do CCD e à distribuição da luz ao longo do plano focal, por exemplo. Os máster flats devem ser obtidos nos filtros correspondentes às imagens de ciência. O máster flat é feito a partir da combinação de várias imagens flat (10 a 15) no mesmo filtro, isto foi feito usando a ferramenta `flatcombine` e a operação de combinação por média. O máster flat é normalizado com respeito à média do fluxo e as imagens de ciência são divididas pelo máster flat utilizando `imarith`.

### 4.3.2 Magnitudes aparentes

Como já mencionado anteriormente, os fluxos medidos dos TNOs têm alguns efeitos implícitos, principalmente do detector e da extinção atmosférica (a variação do fluxo em sua passagem pela atmosfera da Terra). A magnitude instrumental  $m_0$  é o número de fótons contados pelo detector  $N$ , convertidos para escala de magnitude, isto é  $m_0 = -2,5 \log N$ .

No cálculo das magnitudes instrumentais foi usada a ferramenta `phot` para realizar a fotometria de abertura fixa nas imagens de ciência, TNOs e estrelas padrão. Ela determina os centroides das distribuições de fluxo e as magnitudes instrumentais dos objetos bem como as contribuições do brilho do céu. Para fazer uma contagem adequada do sinal dos objetos o mais importante é definir o diâmetro da abertura, porque disso dependerão as incertezas referentes ao fundo do céu.

O uso de telescópios e instrumentos diferentes leva a utilização da fotometria absoluta, a qual é utilizada no cálculo dos coeficientes de extinção que por sua vez serão usados no cálculo da magnitude aparente dos objetos.

Os coeficientes de extinção e termos das cores foram calculados usando um ajuste de regressão linear dado por.

$$m_0 = m - \chi k_1 + \chi k_2 (v - r), \quad (4.1)$$

onde  $m_0$  é a magnitude instrumental corrigida, podendo ser  $v_0$  ou  $r_0$ ,  $\chi$  é a massa de ar; os termos  $k_1$  e  $k_2$  são os coeficientes de extinção zero e de primeira ordem, respectivamente e  $(v - r)$  é a cor instrumental aparente do TNO. As soluções fotométricas do ajuste são obtidas mediante observações de várias estrelas padrão. O ideal é observar as estrelas em intervalos de tempo no qual elas atingem diferentes  $\chi$ . A magnitude  $m_0$  é levada para o sistema padronizado através de uma transformação da ordem zero expressa por,

$$M = m_0 + ZP, \quad (4.2)$$

onde  $M$  é a magnitude calibrada e  $ZP$  é o ponto zero.

É importante mencionar que os coeficientes de extinção e os pontos zero foram calculados a partir de várias missões em cada telescópio, o que permitiu calcular valores médios. Eles podem ser usados quando não é possível observar as estrelas padrão.

### 4.3.3 Cálculo dos erros.

Os erros nas magnitudes consideram o erro instrumental das observações computado no IRAF  $\sigma_i^2$ , o erro devido a extinção  $\sigma_e^2$  e o erro da calibração ao sistema padrão  $\sigma_{ZP}^2$ .

$$\sigma^2 = \sigma_i^2 + \sigma_e^2 + \sigma_{ZP}^2 \quad (4.3)$$

O erro do sistema padrão  $\sigma_{ZP}$  é computado como mencionado acima. O erro por extinção atmosférica é dado por,

$$\sigma_e = m_0 - (m - \chi k_1) \quad (4.4)$$

Para os casos onde foi necessário fazer uma correção de abertura utilizou-se a ferramenta `mkapfile`, a qual calcula as correções de abertura entre as aberturas menor e maior para cada imagem com uma média que pondera os erros em comparação a um modelo de crescimento. O erro instrumental é calculado através de,

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2, \quad (4.5)$$

onde  $\sigma_{i1}^2$  e  $\sigma_{i2}^2$ , são os erros da abertura menor e maior, respectivamente.

## 4.4 Dados da Literatura

Com a finalidade de aumentar o número de pontos em cada curva de fase e obter um ajuste mais representativo, acrescentamos dados de magnitudes existentes na literatura e não descartamos nenhuma observação.

### 4.4.1 Magnitudes reduzidas

A maioria dos dados de magnitudes reduzidas da literatura foram obtidos tomando como primeira referência a base de dados *Minor Bodies in the Outer Solar System: Magnitudes and Colours, MBOSS-2*<sup>10</sup>, a qual contém dados fotométricos de objetos pequenos do Sistema Solar Exterior como cometas, objetos transneptunianos, centauros e troianos. Essa base inclui informações de dados obtidos até 2011 e relatadas em mais de 100 artigos, compreendendo mais de 2000 medições para 555 objetos.

Os métodos utilizados na criação da base de dados MBOSS são descritos em detalhes nos artigos de [Hainaut et al. \(2012\)](#) e [Hainaut & Delsanti \(2003\)](#). MBOSS relata medições de brilho, cores e espectros fotométricos no sistema de filtros de banda larga  $U, B, V, R, I, J, H, K$ , e  $L$  tomadas da literatura. Nós não utilizamos as magnitudes absolutas nem cores diretamente do MBOSS, mas sim procuramos as magnitudes relatadas diretamente nos artigos.

<sup>10</sup> <http://www.eso.org/~ohainaut/MBOSS/>

Tabela 4.2 – Novas observações reportadas

Objeto	$V$	$R$	noite	$r$ [au]	$\Delta$ [au]	$\alpha$ [°]
19308 1996 TO <sub>66</sub>	20.91±0.24	20.17±0.17	2014-07-20	47.14	46.94	1.2159
44594 1999 OX <sub>3</sub>	20.99±0.27	20.06±0.10	2014-07-20	19.95	19.36	2.4347
47932 2000 GN <sub>171</sub>	21.00±0.10	20.71±0.08	2014-06-22	28.42	27.62	1.2949
82158 2001 FP <sub>185</sub>	22.30±0.21	21.56±0.09	2014-07-20	35.79	35.81	1.6249
82158 2001 FP <sub>185</sub>	...	22.15±0.53	2014-07-18	35.79	35.77	1.6260
82155 2001 FZ <sub>173</sub>	21.55±0.14	20.95±0.11	2014-05-30	32.54	31.77	1.1679
82155 2001 FZ <sub>173</sub>	21.74±0.17	21.70±0.18	2014-06-22	32.55	32.06	1.5808
2001 KD <sub>77</sub>	22.25±0.14	21.35±0.11	2014-05-30	36.05	35.12	0.6455
2001 QC <sub>298</sub>	23.36±0.68	23.14±0.63	2014-07-22	40.78	40.19	1.1823
275809 2001 QY <sub>297</sub>	22.31±0.16	21.59±0.12	2014-06-22	43.52	42.93	1.0962
119951 2002 KX <sub>14</sub>	20.77±0.15	20.12±0.12	2014-05-30	39.24	38.23	0.0920
119951 2002 KX <sub>14</sub>	20.71±0.09	20.18±0.06	2014-06-22	39.24	38.27	0.4645
120178 2003 OP <sub>32</sub>	...	19.79±0.04	2014-07-20	41.93	41.15	0.8933
307616 2003 QW <sub>90</sub>	21.09±0.32	20.99±0.14	2014-07-22	43.67	43.37	1.2798
120216 2004 EW <sub>95</sub>	21.23±0.11	22.08±0.37	2014-06-22	27.09	26.49	1.7573
90568 2004 GV <sub>9</sub>	20.22±0.14	19.61±0.11	2014-05-30	39.35	38.46	0.6945
2004 NT <sub>33</sub>	20.73±0.10	20.29±0.04	2014-07-20	38.67	37.92	1.0360
307982 2004 PG <sub>115</sub>	21.20±0.36	20.58±0.15	2014-07-19	37.48	36.66	0.9276
145452 2005 RN <sub>43</sub>	20.03±0.13	19.74±0.11	2014-07-20	40.64	39.88	0.9721
145480 2005 TB <sub>190</sub>	21.18±0.24	20.71±0.13	2014-07-20	46.21	45.59	1.0111
202421 2005 UQ <sub>513</sub>	21.71±0.40	20.43±0.19	2014-07-20	48.39	48.27	1.1980
248835 2006 SX <sub>368</sub>	21.81±0.45	21.24±0.23	2014-07-20	12.97	13.14	4.3995
278361 2007 JJ <sub>43</sub>	...	20.35±0.26	2014-07-17	41.28	40.61	1.0608
2007 JK <sub>43</sub>	20.90±0.14	20.58±0.15	2014-07-22	23.67	23.07	2.0091
2007 OC <sub>10</sub>	21.14±0.16	20.62±0.16	2014-07-22	35.68	34.80	0.8284
2008 OG <sub>19</sub>	...	22.13±0.38	2014-07-18	38.57	37.59	0.3652
2008 OG <sub>19</sub>	...	21.53±0.38	2014-07-17	38.57	37.59	0.3838
2008 OG <sub>19</sub>	21.07±0.10	20.58±0.07	2014-06-22	38.57	37.77	0.9270
2008 OG <sub>19</sub>	20.50±0.14	20.04±0.10	2014-05-30	38.57	38.03	1.2894
65489 Ceto	...	20.84±0.18	2014-07-20	35.22	34.95	1.5970
65489 Ceto	22.06±0.35	22.56±0.64	2014-07-22	35.23	34.99	1.6089
2060 Chiron	18.30±0.06	18.07±0.04	2014-07-19	17.87	17.21	2.5103
2060 Chiron	...	17.88±0.04	2014-07-18	17.87	17.22	2.5426
5145 Pholus	...	21.22±0.30	2014-07-22	25.88	25.11	1.4889
120347 Salacia	21.24±0.24	20.17±0.12	2014-07-19	44.47	44.01	1.1759
174567 Varda	20.38±0.14	19.80±0.11	2014-05-30	47.21	46.27	0.4555
2000 OK <sub>67</sub>	21.96±0.18	21.30±0.17	2014-08-04	40.14	39.35	0.9215
2001 QY <sub>297</sub>	21.78±0.33	21.22±0.20	2014-08-04	43.53	42.54	0.2950
2007 JK <sub>43</sub>	20.43±0.05	19.66±0.04	2014-08-04	23.67	23.26	2.2586
2007 RW <sub>10</sub>	20.95±0.09	20.16±0.07	2014-08-04	28.71	28.32	1.8805
2010 JJ <sub>124</sub>	21.05±0.57	21.17±0.11	2014-08-29	23.69	23.49	2.4014
Teharonhiawako	21.64±0.13	21.67±0.28	2014-08-04	45.12	44.22	0.5974



#### 4.4.2 Curvas de Luz e $\Delta m$ para TNOs

As curvas de luz medem o comportamento fotométrico dos objetos ao longo de um período rotacional. Elas mostram as variações da magnitude  $\Delta m$  produzidas por variações de albedo ou forma. Tais variações devem ser consideradas na estimativa das curvas de fase, todavia são poucos os TNOs que possuem curvas de luz.

Nós utilizamos valores de  $\Delta m$  obtidos a partir de curvas de luz de TNOs e centauros relatados em três artigos diferentes: dois de [Thirouin et al. \(2010\)](#) com observações próprias de 25 curvas de luz, [Thirouin et al. \(2012\)](#) com estimativa para 14 TNOs para as quais combinaram seus dados com outros reportados na literatura. [Benecchi & Sheppard \(2013\)](#) apresentam resultados para 32 TNOs, dos quais a maioria pertence ao grupo dinâmico de objetos dispersos. Os autores apresentam um amplo número de estimativas em cada trabalho, o que proporciona homogeneidade nos métodos de computação de  $\Delta m$  utilizado em nosso ajuste. Usamos apenas a informação rotacional pico a pico, ou seja, a que foi obtida da amplitude de curva de luz total. Os valores alocados de  $\Delta m$  para os ajustes mudaram da seguinte maneira: no primeiro relatório dos resultados, apresentado em [Alvarez-Candal et al. \(2016\)](#), é usado  $\Delta m = 0$  para os objetos para os quais não conhecemos seu valor, no segundo relatório alocamos um valor médio dos TNOs de nossa amostra com valor  $\Delta m$  conhecido,  $\Delta m = \sum \frac{\Delta m_i^N}{N}$  e no terceiro relatório utilizamos um valor médio por magnitude como é descrito detalhadamente no próximo capítulo 5. Este último proporciona uma melhor avaliação das incertezas. Porém, somente usamos a metade desse valor como será indicado no seguinte capítulo.

### 4.5 Estado da base de dados

As novas magnitudes reduzidas foram obtidas das observações realizadas durante campanhas de observação em 2014. Foram reduzidos dados observacionais para os objetos listados na Tabela 4.2. A maioria deles faz parte do grupo dinâmico de TNO clássicos, com exceção de 1999 OX<sub>3</sub>, 2000 GN<sub>171</sub>, 2004 EW<sub>95</sub>, 2006 SX<sub>368</sub>, Chiron e Pholus, que fazem parte do grupo centauros. A base de dados foi incrementada numa segunda etapa, com novas observações para um total de 10 TNOs, seguindo sempre a mesma metodologia de redução já apresentada. Foram incluídos também, mais dados da literatura. No final desta tese, a base de dados contém medidas de  $H_V$  e  $\beta_V$  para 133 TNOs e,  $H_R$  e  $\beta_R$  para 132 TNOs.

Etiqueta	ano	autores
BB92	1992	Buie, M.W., Bus, S.J., 1992, Icarus, 100, 288
Mu92	1992	Mueller, B.E.A., Tholen, D.J., Hartmann, W.K., et al., 1992, Icarus, 97, 150
LJ96	1996	Luu, J., Jewitt, D., 1996, AJ, 112, 2310
BL97	1997	Brown, W.R., Luu, J.X., 1997, Icarus, 126, 218
Ro97	1997	Romanishin, W., Tegler, S.C., Levine, J., et al. 1997, SJ, 113, 1893
TR97	1997	Tegler, S.C., Romanishin, W. 1997, Icarus, 126, 212
Te97	1997	Tegler, S.C., Romanishin, W., Stone, A., et al. 1997, AJ, 114, 1230
JL98	1998	Jewitt, D.C., Luu, J.X., 1998, AJ, 115, 1667
MB99	1999	McBride, N., Davies, J.K., Green, S.F., et al., 1999, MNRAS, 306, 79t9
RT99	1999	Romanishin, W., Tegler, S.C., 1999, Nature, 398, 129
Ba00	2000	Barucci, M.A., Romon, J., Doressoundiram, A., et al., 2000, AJ, 120, 496
Da00	2000	Davies, J.K., Green, S., McBride, N., et al. 2000, Icarus, 146, 253
TR00	2000	Tegler, S.C., Romanishin, W. 2000, Nature, 407, 979
Bo01	2001	Boehnhardt, H., Tozzi, G.-P., Birkle, K., et al., 2001, A&A, 378, 653
De01	2001	Delsanti, A., Boehnhardt, H., Barrera, L., et al., 2001, A&A, 380, 347
Do01	2001	Doressoundiram, A., Barucci, M.A., Romon, J., et al. 2001, Icarus, 144, 277
Fe01	2001	Ferrin, I., Rabinowitz, D., Schaefer, B., et al., 2001, ApJ, 548, L243
GH01	2001	Gil-Hutton, R., Licandro, J., 2001, Icarus, 152, 246
JL01	2001	Jewitt, D.C., Luu, J.X., 2001, AJ, 122, 2099
Pe01	2001	Peixinho, N., Lacerda, P., Ortiz, J.L., et al. 2001, A&A, 371, 753
Ba02	2002	Barucci, M.A., Boehnhardt, H., Dotto, E., et al., 2002, A&A, 392, 335
BA02	2002	Bauer, J.M., Meech, K.J., Fernandez, Y.R., et al. 2002, PASP, 114, 1309
Bo02	2002	Boehnhardt, H., Delsanti, A., Barucci, M.A., et al., 2002, A&A, 395, 297
Do02	2002	Doressoundiram, A., Peixinho, N., de Bergh, C., et al., 2002, APJ, 124, 2279
Du02	2002	Duffard, R., Lazzaro, D., Pinto, S., et al. 2002, Icarus, 160, 44
Je02	2002	Jewitt, D.C., AJ, 2002, 123, 1039
JS02	2002	Jewitt, D.C., Sheppard, S.S., 2002, AJ, 123, 2110
RM02	2002	Romon-Martin, J., Barucci, M.A., de Bergh, C., et al., 2002, Icarus, 160, 59
SR02	2002	Schaefer, B.E., Rabinowitz, D.L., 2002, Icarus, 160, 52
Se02	2002	Seiguchi, T., Boehnhardt, H., Hainaut, O.R., et al. 2002, A&A, 385, 61
SJ02	2002	Sheppard, S.S., & Jewitt, D.C., 2002, AJ, 124, 1757
BA03	2003	Bauer, J.M., Meech, K.J., Fernandez, Y.R., et al. 2003, Icarus, 166, 195
Do03	2003	Dotto, E., Barucci, M.A., Boehnhardt, H., et al., 2003, Icarus, 162, 408
FD03	2003	Farnham, T.L., Davies, J.K., 2003, Icarus, 164, 418
MB03	2003	McBride, N., Green, S.F., Davies, J.K., et al., 2003, Icarus, 161, 501
Ro03	2003	Rousselot, P., Petit, J.-M., Poulet, F., et al. 2003, A&A, 407, 1139
TR03	2003	Tegler, S.C., Romanishin, W. 2003, Icarus, 161, 181
Te03	2003	Tegler, S.C., Romanishin, W., Consolmagno, G.J. 2003, ApJ, 599, L49
Bo04	2004	Boehnhardt, H., Bagnulo, S., Muinonen, K., et al. 2004, A&A, 415, L21
Fo04	2004	Fornasier, S., Doressoundiram, A., Tozzi, G.P., et al 2004, A&A, 421, 353
Mu04	2004	Mueller, B.E.A., Hergenrother, C.W., Samarishina, N.H., et al. 2004, Icarus, 171, 506
Or04	2004	Ortiz, J.L., Sota, A., Moreno, R., et al., 2004, A&A, 420, 383
Px04	2004	Peixinho, N., Boehnhardt, H., Belskaya, I., et al. 2004, Icarus, 170, 153
Ra04	2004	Rabinowitz, D., Toutellotte, S., Brown, M., et al., 2004, IAUCS295, 2
Ba05	2005	Barucci, M.A., Cruikshank, D.P., Dotto, E., et al., 2005, A&A, 439, L1
dB05	2005	de Bergh, C., Delsanti, A., Tozzi, G.P., et al., 2005, A&A, 437, 1115
Do05	2005	Doressoundiram, A., Peixinho, N., Doucet, C., et al., 2005, Icarus, 174, 90
Hi05	2005	Hicks, M.D., Simonelli, D.P., & Buratti, B.J. 2005, Icarus, 176, 492
Ro05	2005	Rousselot, P., Petit, J.-M., Poulet, F., et al. 2005, Icarus, 478, 491
Ba06	2006	Bagnulo, S., Boehnhardt, H., Muinonen, K., et al. 2006, A&A, 450, 1239
Be06	2006	Belskaya, I.N., Ortiz, J.L., Rousselot, P., et al. 2006, Icarus, 184, 277
Ca06	2006	Carraro, G., Maris, M., Bertin, D., et al., 2006, A&A, 460, L39
LL06	2006	Lacerda, P., Luu, J.X., 2006, AJ, 131, 2314
Ra06	2006	Rabinowitz, D., Barkume, K., Brown, M.E., et al. 2006, ApJ, 639, 1238
Ba07	2007	Barucci, M. A., F. Merlin, E. Dotto, A. Doressoundiram, and C. de Bergh
Or07	2007	Ortiz, J.L., Santos-Sanz, P., Gutiérrez, P.J, et al., 2007, A&A, 468, L13
Ra07	2007	Rabinowitz, D., Schaefer, B.E., Tourtellotte, S.W., AJ, 2007, 133, 26
Be08	2008	Belskaya, I., Bagnulo, S., Muinonen, K., Barucci, M. A., Tozzi, G. P., A&A 479, 265–269
DM09	2009	DeMeo, F., Fornasier, S., Barucci, M.A., et al. 2009, A&A, 493, 283
SS09	2009	Santos-Sanz, P., Ortiz, J.L., Barrera, L., et al., 2009, A&A, 494, 693
Be10	2010	Belskaya, I.N., Bagnulo, S., Barucci, M.A., et al. 2010, Icarus, 210, 472
Pe10	2010	Perna, D., Barucci, M.A., Fornasier, S., et al. 2010, A&A, 510, A53
Ro10	2010	Romanishin, W., Tegler, S.C., Consolmagno, G.J., AJ, 140, 29
Sh10	2010	Sheppard, S.S. 2010, AJ, 139, 1394
Sn10	2010	Snodgrass, C., Carry, B., Dumas, C., et al., 2010, A&A, 511, A72
Ca12	2012	Carry, B., Snodgrass, C., Lacerda, P., et al. 2012, A&A, 544, A137
Px12	2012	Peixinho, N., Delsanti, A., Guilbert-Lepoutre, A., et al. 2012, A&A, 546, A86
Th12	2012	Thirouin, A., Ortiz, J.L., Campo Bagatin, A., et al. 2012, MNRAS, 424, 3156
Ki13	2013	Kiss, Cs., Szabo, G., Horner, J., et al. 2013, A&A, 555, A3
Pe13	2013	Perna, D., Dotto, E., Barucci, M.A., et al. 2013, A&A, 554, A49
PA13	2013	Pinilla-Alonso, N., Alvarez-Candal, A., Melita, M., et al. 2013, A&A 550, A13
Bo14	2014	Boehnhardt, H., Schulz, D., Protospapa, S., et al. 2014, EMP, October 2014
Fo14	2014	Fornasier, S., Lazzaro, D., Alvarez-Candal, A., et al. 2014, A&A, 568, L11
Je15	2015	Jewitt, D.C., AJ, 2015, accepted
Ga16	2016	Galiazzo, M., Carraro, G., Montalto, M., et al., 2016, Astroph. Space Sci., 361, 212
TR16	2016	Tegler, S.C., Romanishin, W., and Consolmagno, G.J., 2016, S.J., AJ, 152, id 210

Tabela 4.3 – Referências incluídas na nossa base de dados fotométrica.

## 5 Estudos fotométricos de TNOs

A partir dos dados descritos no capítulo 4 aumentamos o número de magnitudes aparentes de nosso levantamento fotométrico de TNOs. Calculamos  $M(1, 1, \alpha)$  e criamos curvas de fase a partir das quais estimamos  $H$ . As magnitudes foram calculadas seguindo uma adaptação do procedimento apresentado por Alvarez-Candal et al. (2016) cujas diferenças são descritas nas seções seguintes. Calculamos  $M(1, 1, \alpha)$  para criar curvas de fase que foram utilizadas para estimar  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$  para uma amostra de mais de 100 TNOs.

O primeiro relatório da base de dados foi apresentado em Alvarez-Candal et al. (2016), no qual os resultados incluem magnitudes absolutas e coeficientes de fase no filtro  $V$ . O procedimento de estimação de  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$  descrito pelos autores é a base desta tese.

Nesta tese apresentamos o segundo relatório de resultados do nosso levantamento fotométrico com mais dados nos filtro  $V$  e dados no filtro  $R$  também. Mais dados da literatura foram incluídos também.

Nosso resultado principal é a correlação entre as cores absolutas  $H_V - H_R$  e os coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta$  para uma amostra de um total de 117 TNOs. Nós sugerimos que ela é relativa as propriedades de espalhamento das superfícies dos objetos.

Em Alvarez-Candal et al. (2016) os autores relataram que os coeficientes de fase de TNOs no filtro  $V$  apresentavam uma amplitude muito grande (-0,88 até 1,35 mag por grau) e seis objetos que apresentavam coeficientes de fase negativos afirmando não conhecerem nenhum mecanismo físico que pudesse explicá-los através dos modelos de espalhamento.

Em Ayala-Loera et al. (2018) com a introdução dos dados do filtro  $R$  na análise (além dos dados em  $V$ ) foi possível observar que as curvas de fase em cada filtro apresentam tendências diferentes. Assim, a grande amplitude no intervalo de valores de  $\beta_\lambda$  aponta ser um efeito fotométrico implícito na refletância da superfície. A definição do parâmetro  $\Delta\beta$  como um indicador da amplitude do OE é confirmada por sua correlação com a cor. Mostramos que as curvas de fase dos TNOs não têm relação direta com o albedo geométrico. Isto pode ser explicado como efeito da sua estrutura superficial.

Além disso, as curvas de fase indicam uma relação entre o  $\Delta\beta$  e a amplitude do OE. Por isso, utilizamos o modelo de espalhamento de Lumme & Bowell (1981) com a finalidade de testar o comportamento observado com respeito aquele previsto pelo modelo. As conclusões e discussão desses resultados são apresentados mais detalhadamente no capítulo 7.

### 5.1 Metodologia

#### 5.1.1 Curvas de Fase e estimação de $H$ e $\beta_\lambda$

Uma curva de fase descreve o brilho do objeto com respeito ao ângulo de fase. Como discutido na seção 3.1, capítulo 3, as magnitudes reduzidas  $M(1, 1, \alpha)$  podem ser calculadas a

partir da magnitude aparente  $M(r, \Delta, \alpha)$  quando  $r$  e  $\Delta$ , são conhecidas.

Na Tabela 5.4 são mostrados os dados do TNO (82155) 2001 FZ<sub>173</sub>. Os dados incluem  $M(r, \Delta, \alpha)$  nos filtros  $V$  e  $R$ , tanto do nosso levantamento como da literatura. Para criar as curvas de fase nos dois filtros usamos os objetos que tem três ou mais observações em um filtro, isto com a finalidade de ter pelo menos três pontos para fazer o ajuste linear, como detalhado mais adiante. Os dados de  $r$ ,  $\Delta$  e  $\alpha$  foram obtidos no site JPL-Horizons<sup>1</sup> para cada observatório e data de observação dos objetos.

$V(r, \Delta, \alpha)_V$	erro <sub>V</sub>	$R(r, \Delta, \alpha)$	erro <sub>R</sub>	data	$r$	$\Delta$	$\alpha$	Ref.	$V(1, 1, \alpha)$	$R(1, 1, \alpha)$
[mag]	[mag]	[mag]	[mag]	data	[au]	[au]	[°]		[mag]	[mag]
21.480	0.010	20.930	0.014	2003-03-02	33.091	32.173	0.6601	Te03	6.344	5.794
21.569	0.052	20.991	0.035	2002-04-18	33.249	32.358	0.8035	Px04	6.410	5.832
0.0	0.0	21.075	0.037	2001-04-24	33.447	32.633	1.0187	SJ02	0.0	5.885
0.0	0.0	21.059	0.021	2001-04-25	33.446	32.642	1.0428	SJ02	0.0	5.868
21.556	0.147	20.957	0.112	2014-05-30	32.545	31.774	1.1679	SOAR	6.483	5.884
21.748	0.170	21.701	0.182	2014-06-22	32.550	32.063	1.5808	SOAR	6.655	6.608

Tabela 5.4 – TNO (82155) 2001 FZ<sub>173</sub> As cinco colunas seguintes apresentam, nesta ordem, a data na qual foi feita a observação, a distância heliocêntrica  $r$ , distância geocêntrica  $\Delta$ , o ângulo de fase  $\alpha$ , referência da observação. As duas últimas colunas indicam as magnitudes reduzidas obtidas nos dois filtros  $V$  e  $R$ , respectivamente. As referências Te03, SJ02, Px04 são indicadas na Tabela 4.3.

### 5.1.2 Ajuste linear

Estimadas as magnitudes reduzidas  $M(1, 1, \alpha)$  podemos utilizá-las para criar curvas de fase como aquelas mostradas na Fig. 5.7. A maioria das magnitudes  $m_0$  correspondem a observações de apenas uma noite, mas algumas são provenientes de curvas de luz obtidas de duas ou mais noites de observação consecutivas, das quais tomamos a média.

Como indicado na Eq. 3.11, a magnitude reduzida  $M(1, 1, \alpha)$  tem uma relação com  $H$  e a função de fase como,

$$M(1, 1, \alpha) = H + \Phi(\alpha),$$

Da equação anterior, somente  $M(1, 1, \alpha)$  e  $\alpha$  são conhecidas. Considerando que o intervalo de ângulos de fase dos TNOs é pequeno (a maioria  $< 5^\circ$ ), assumimos que há uma relação linear da magnitude com a fase. Para converter a magnitude aparente (que depende do ângulo da fase) em magnitude absoluta podemos aproximar a correção de fase  $\Phi(\alpha)$ . Assim temos que,

$$M(1, 1, \alpha) = H + \alpha \times \beta, \quad (5.1)$$

sabemos que a solução que minimiza o erro é,

$$E = \sum_{j=0}^k |p(X_j) - y_j|^2. \quad (5.2)$$

Utilizamos a função `numpy.polyfit` do Python para fazer um ajuste de mínimos quadrados. Como a magnitude  $M(1, 1, \alpha)$  pode ter uma variação devida à rotação do objeto  $\Delta m$ , essa variação deve ser considerada. Desta forma, geramos curvas de fase sintéticas que estão dentro do intervalo que corresponde à variação  $\Delta m$  reportada para cada objeto.

<sup>1</sup> <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

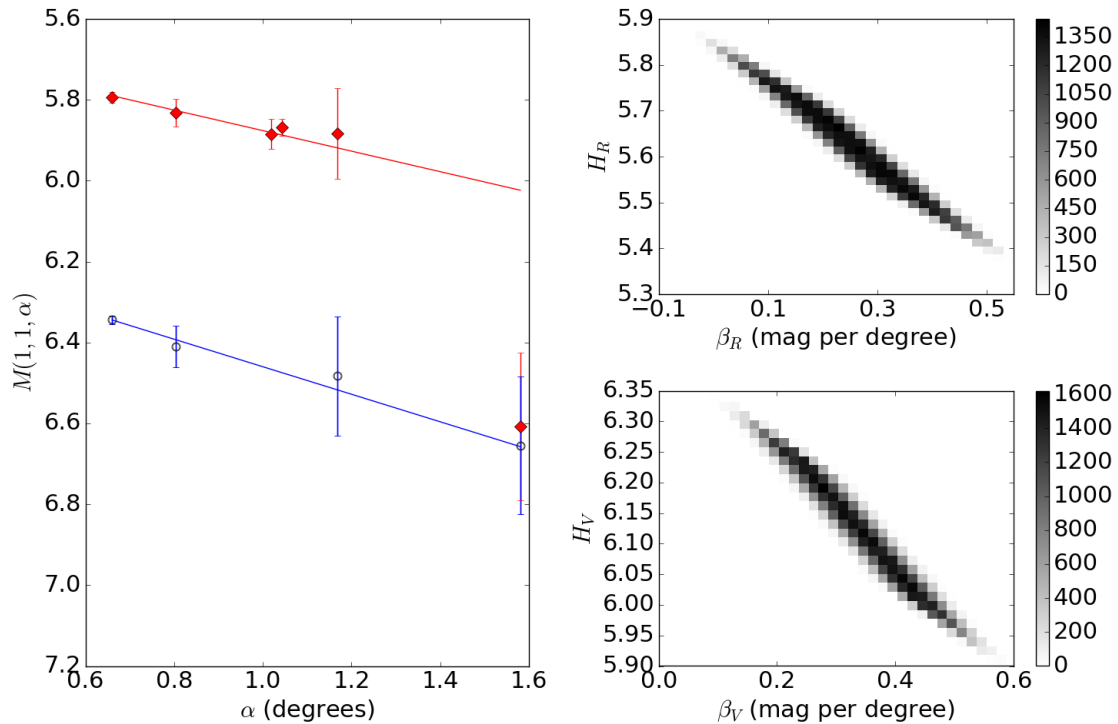


Figura 5.7 – Curvas de fase do TNO 2001 FZ<sub>173</sub> nos filtros V e R. Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase  $H$  vs.  $\beta_\lambda$  de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas.

Como mencionado no capítulo 2,  $\Delta m$  é estimada mediante curvas de luz, as quais, de acordo com a literatura, são obtidas de múltiplas noites de observação. Conforme já mencionado,  $\Delta m$  é conhecida apenas para alguns TNOs. Dos trabalhos de [Thirouin et al. \(2010, 2012\)](#) e [Benecchi & Sheppard \(2013\)](#) conseguimos reunir estimativas de  $\Delta m$  para um total de 135 objetos. Para os casos nos quais os TNOs fazem parte de dois trabalhos, damos preferência ao valor maior. Porém,  $\Delta m$  não é conhecido para todos os TNOs.

Geramos 100.000 curvas sintéticas criando uma medida aleatória para cada observação dentro de uma distribuição  $rand_i$  que pode tomar valores aleatórios entre -1 e 1, e que fica restrita a variações a partir do intervalo  $\Delta m$ , como indicado na equação,

$$M(1, 1, \alpha)_i = M(1, 1, \alpha) + rand_i \times \Delta m, \quad (5.3)$$

Diferentemente do processo do cálculo das magnitudes apresentado em [Alvarez-Candal et al. \(2016\)](#), no qual para os objetos com  $\Delta m$  desconhecida é assumida como  $\Delta m = 0$ , neste caso foi atribuído um valor representativo. Assim, dos nossos objetos, 117 deles coincidem com os que tem  $\Delta m$  conhecida na literatura. Então, calculamos um valor meio  $\Delta m = 0.14$  e atribuímos esse valor como é explicado a seguir.

A solução é inserida na Eq.5.1 e criamos um conjunto de soluções possíveis para  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$ . Esses valores são amostrados em espaço fase dos parâmetros em histogramas bidimensionais, como mostrado na Fig.5.7. As soluções que aparecem com maior frequência correspondem às áreas mais escuras do espaço de fase mostrado no painel da direita. Por fim, consideramos as

100.000 soluções dos ajustes das curvas de luz sintéticas e tomamos os valores médios como uma solução final para atribuir os valores de  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$ . As curvas de fase se encontram disponíveis em formato eletrônico.<sup>2</sup> Os resultados obtidos de  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$  estão indicados na Tabela 5.9.

A função de fase relaciona a distribuição da luz espalhada pela superfície do TNO e a distância angular Terra-Sol. O primeiro depende basicamente dos parâmetros físicos do objeto (tamanho e forma) e das propriedades da superfície (características das partículas refletoras). Assim, uma parte essencial no estudo de informações relativas à distribuição e composição dos TNOs é procurar por possíveis relações entre esses parâmetros e o comportamento fotométrico dos objetos a diferentes ângulos de fase.

### 5.1.3 Comportamento das curvas de fase e $\beta$

Encontramos que a maioria dos objetos aumentam o seu brilho quando estão próximos de oposição. Não obstante, é possível identificar objetos com um comportamento oposto, ou seja, que sua magnitude diminui conforme  $\alpha$  diminui.

Na Fig.5.8 são apresentados os três exemplos de comportamentos observados: i) TNOs com o comportamento esperado, isto é, que  $M(1, 1, \alpha)$  aumenta à medida que  $\alpha$  diminui, como o caso de Thereus (topo), ii) TNOs cujo brilho decai com  $\alpha \approx 0$  em um dos filtros, como 1999 OX<sub>3</sub> (meio) e iii) TNOs que apresentam diminuição aparente do brilho em ambos filtros, como 1994 EV<sub>3</sub> (abaixo). No entanto, deve-se considerar que, para algumas das curvas com diminuição da magnitude, o espaço de fase poderia permitir soluções com valores positivos de  $\beta_\lambda$ .

Como é possível notar nos gráficos na coluna direita na Fig.5.8 o espaço de soluções para cada objeto têm densidades diferentes, o que poderia ser considerado como devido às diferenças de  $\Delta m$  para cada objeto: Thereus,  $\Delta m = 0,34$ , 1999 OX<sub>3</sub>,  $\Delta m = 0,11$  e 2002 KY<sub>14</sub>,  $\Delta m = 0,13$ . No entanto, observamos que 1999 OX<sub>3</sub>, por exemplo, apresenta um valor  $\Delta m$  menor que aquele de 2002 KY<sub>14</sub> e uma variação maior das soluções. Também poderíamos sugerir que é devida a amplitude do erro, mas TNOs com erros com amplitudes pequenas apresentam um espaço de soluções mais amplo do que outros com erros maiores, como é o caso de 1994 EV<sub>3</sub>. O número de observações de cada curva tampouco indica alguma relação com a densidade de probabilidade das soluções. Portanto, nossa sugestão é de que estes resultados indicam que o número de soluções para  $H$  e  $\beta$  têm dependência com a amplitude do intervalo de  $\alpha$  e a inclinação da curva de fase. Isso porque uma grande inclinação indica que a magnitude varia rapidamente por grau de ângulo, o que por sua vez implica um menor número de soluções. Embora seja importante notar de que o número de pontos em algumas curvas de fase é menor do que 5 pontos.

Para conseguir interpretar os comportamentos das curvas de fase é preciso considerar que a interação da luz com uma superfície resulta de diferentes processos que dependem diretamente das propriedades das partículas que compõem as superfícies. A seguir são enumerados de maneira breve alguns pontos importantes a considerar:

- A luz refletida por um objeto iluminado tem duas componentes, a componente de dispersão única, e a componente múltipla. A primeira é a quantidade de luz refletida em direção

<sup>2</sup> <http://extranet.on.br/alvarez/TNOs-AbsMags/phase-curves.tar>

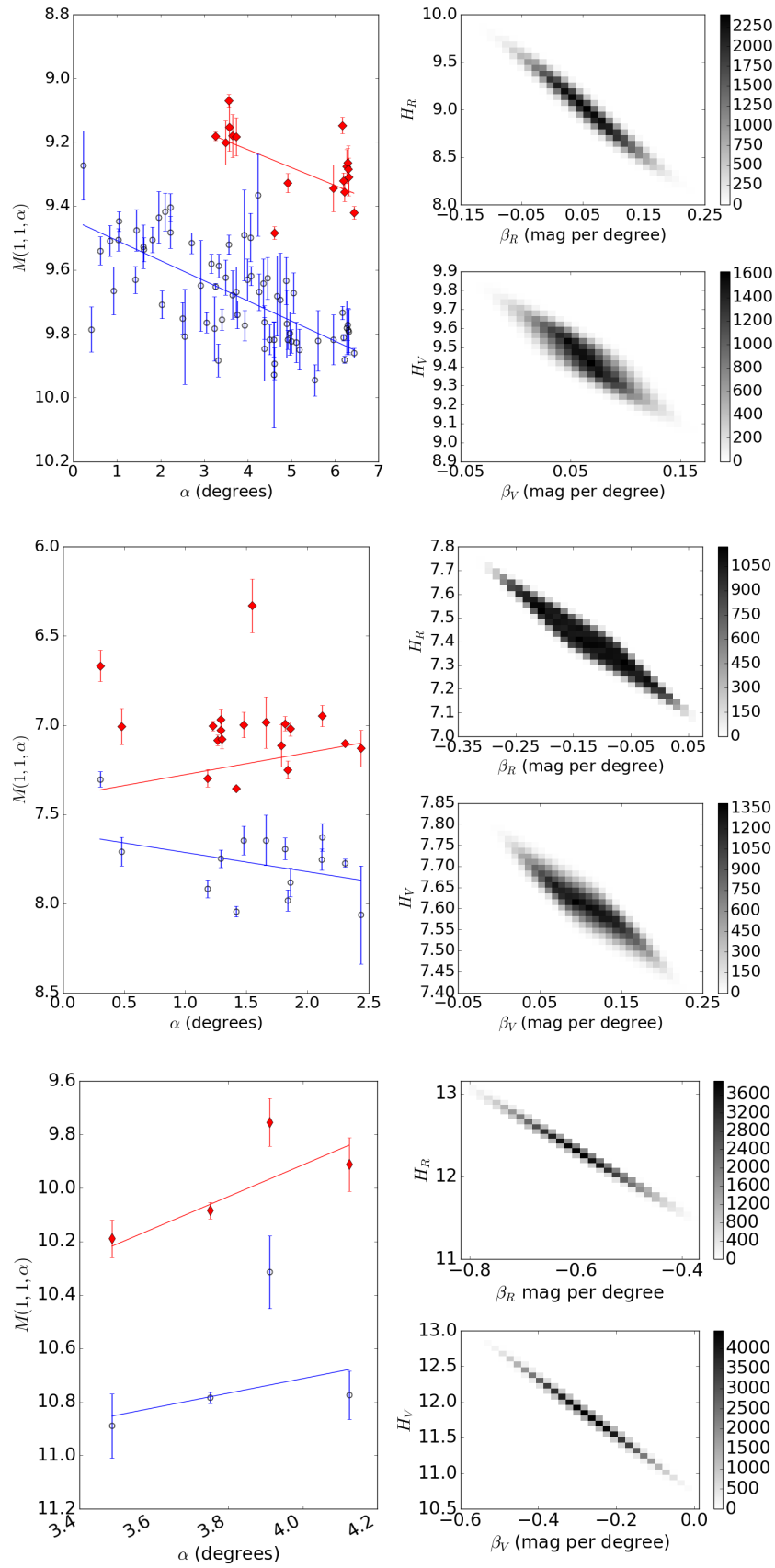


Figura 5.8 – Curvas de fase de TNOs mostram diferentes comportamentos fotométricos nos filtros  $V$  e  $R$  (esquerda), Thereus (acima), 1999 OX<sub>3</sub> (meio), e 1994 EV<sub>3</sub> (abaixo). Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase  $H$  vs.  $\beta_\lambda$  de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas.

à retrodispersão, ou seja, a luz refletida em sentido oposto e paralela à luz incidente, enquanto a segunda é a luz refletida em qualquer outra direção diferente da retrodispersão. Assim, as variações de brilho ao longo de um intervalo de ângulos de fase pode ser estudado a partir das contribuições de ambas componentes (Bowell & Lumme, 1979).

- Os modelos clássicos focados na determinação da função de fase de asteroides, que é usada para TNOs também, assumem que o coeficiente de fase tem uma relação linear com as componentes de dispersão, e portanto com o albedo do objeto. Entretanto, essa relação é assumida com a condição de que as superfícies dos asteróides são moderadamente porosas e moderadamente ásperas em uma escala maior que o comprimento de onda da luz.
- Belskaya et al. (2006) encontrou que para os TNOs as curvas de fase seguem o comportamento linear em  $\alpha < 2^\circ$  e curvas mais íngremes. Então, a função de fase de TNOs pode ser representada como uma função linear (Alvarez-Candal et al., 2016), como a indicada na Eq.5.1, onde o parâmetro  $\beta$  indica a inclinação da curva.

As nossas curvas de fase indicam valores negativos para  $\beta$ . Embora o cálculo dos coeficientes de fase possam estar afetados pelo número reduzido de pontos para algumas curvas, assumindo que os  $\beta$  não sejam afetados por nenhum bias observacional ou de outro tipo, o  $-\beta$  pode ser interpretado fisicamente a partir de:

1. Uma diminuição fictícia de  $M(1, 1\alpha)$ , ou seja que há um efeito de eventos esporádicos (renovação da superfície por impactos) ou uma estimativa da magnitude contaminada por outros fenomenos que afeta a estimativa dos coeficientes. Desde que as observações não sejam consecutivas no tempo, pode-se assumir que o TNO tenha experimentado alguma mudança significativa na reflectância, i.e. atividade cometaria ou intromissão de possíveis macro estruturas (Alvarez-Candal et al., 2016). As curvas de fase dos objetos que têm anéis como Chariklo e Haumea, apresentam comportamentos fotométricos diferentes nas suas curvas de fase como se pode observar na Fig.5.9.
2. Um valor subestimado da variação rotacional  $\Delta m$ , como é sugerido para o caso do centauro retrógrado (342842) 2008 YB<sub>3</sub> (Alvarez-Candal et al., 2016), que é apresentado na Fig.?? (ezq).
3. Um efeito relativo a processos de dispersão incoerente de segunda ordem (Shkuratov et al., 2002).

## 5.2 Análise estatística de $H_V$ , $H_R$ , $\beta_V$ , $\beta_R$ , $(H_V - H_R)$ e $\Delta\beta$

O uso da análise estatística tem como objetivo conhecer a estrutura dos nossos dados e procurar por relações que permitam definir comportamentos fotométricos específicos que possam ser relativos as propriedades físicas de TNOs.

As características estatísticas da nossa amostra foram avaliadas inicialmente através de medidas de dispersão, que mostram a variabilidade da distribuição, indicando o nível de



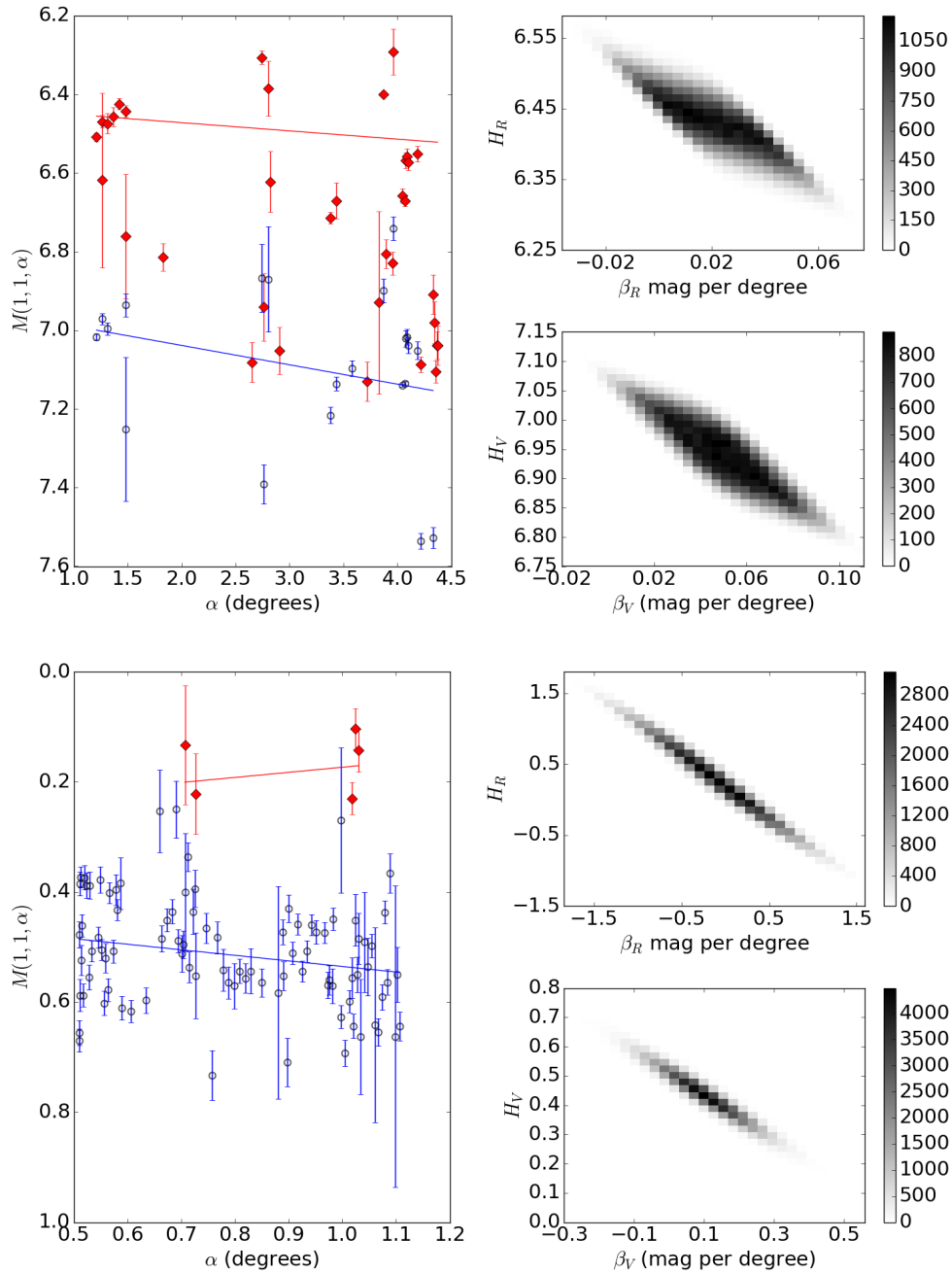


Figura 5.9 – Curvas de fase nos filtros  $V$  (azul) e  $R$  (vermelho) dos TNOs Chariklo (esquerda) e Haumea (direita). Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase  $H$  vs.  $\beta_\lambda$  de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas

homogeneidade da amostra. Inicialmente foram calculadas as medidas de dispersão dimensionais como o desvio padrão. Existem outras que são adimensionais, como o coeficiente de correlação de Pearson, que permite determinar se os dados tem um comportamento linear ou não. Entretanto, esse tipo de medida exige que os dados cumpram com o princípio de normalidade. Como não temos certeza da normalidade dos dados nós utilizamos o parâmetro de Spearman que permite estabelecer relações entre variáveis não-monotônicas. Os detalhes dos parâmetros estatísticos e os resultados obtidos para nossa amostra são descritos a seguir.

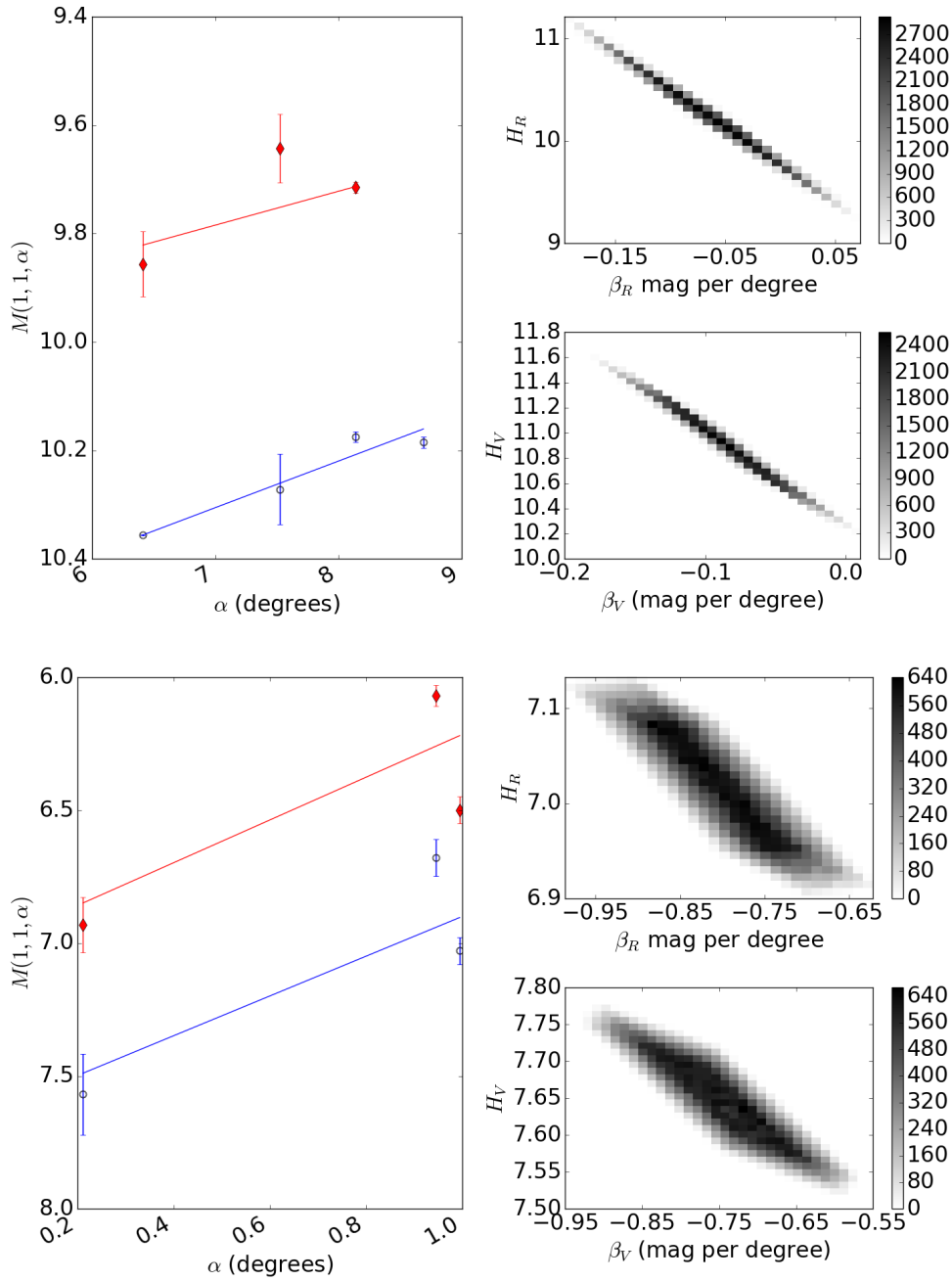


Figura 5.10 – Curvas de fase nos filtros V (azul) e R (vermelho) dos TNOs 2008 YB<sub>3</sub> e 1998 KG<sub>62</sub>. Os gráficos da coluna direita indicam o espaço fase  $H$  vs.  $\beta_\lambda$  de 100.000 ajustes lineares de curvas de fase sintéticas.

### 5.2.1 Distribuições

Na primeira parte da análise calculamos  $H_\lambda$  vs  $\beta_\lambda$  para um total de 113 TNOs no filtro R e 114 no filtro V, com um total de 105 objetos com curvas de fase nos dois filtros. Na Fig. 5.11 são apresentadas as distribuições dos parâmetros calculados. Como pode ser observado não há indícios claros ou evidentes de um comportamento bimodal. A forma normal (curva normal) de uma distribuição é determinada pela média e o desvio padrão. As médias das distribuições dos parâmetros calculados são  $\bar{H}_V = 6,47 \pm 0,131$  (acima, esquerda), e  $\bar{\beta}_V = 0,155 \pm 0,094$  (acima

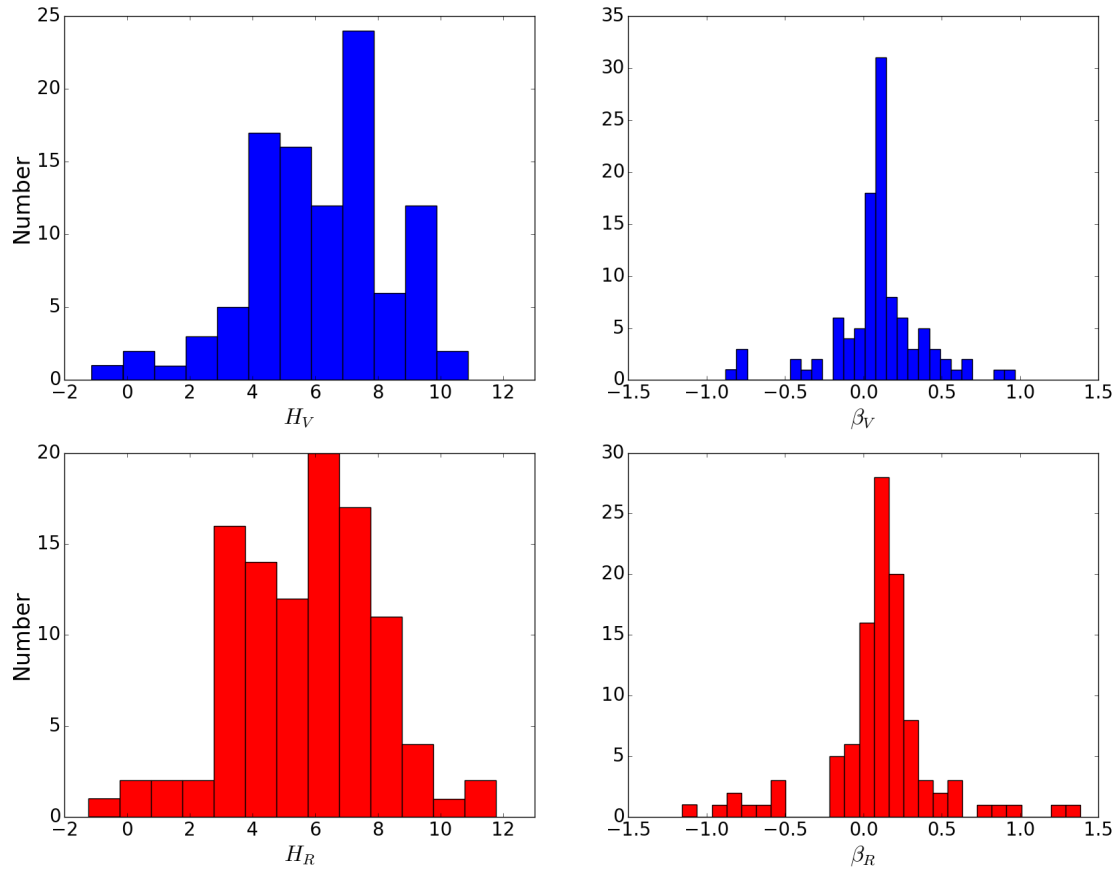


Figura 5.11 – Distribuição de  $H_V$  e  $\beta_V$  (azul) para 133 TNOs e  $H_R$  e  $\beta_R$  (Vermelho) para 132 TNOs.

direita) e de  $\bar{H}_R = 5,91 \pm 0,136$  (abaixo esquerda) e  $\bar{\beta}_R = 0,203 \pm 0,101$  (abaixo direita).

No filtro  $V$  84,4% dos objetos estão distribuídos no intervalo  $2,68 < H_V < 9,59$ , enquanto no filtro  $R$  78,6% dos objetos estão distribuídos no intervalo de  $3,14 < H_R < 8,64$ . No caso dos coeficientes de fase, no filtro  $V$ , 87,7% dos objetos estão distribuídos no intervalo de  $-0,14 < \beta_V < 1,32$  [mag por grau], sendo que no filtro  $R$  81,9% dos objetos se distribuem no intervalo  $-0,55 < \beta_R < 1,09$  [mag por grau].

No entanto, a forma das distribuições não é inteiramente simétrica, o que pode ser interpretado como uma consequência de várias condições: i) a distribuição dos errors, a qual apresenta diferenças intrínsecas às condições de observação e ii) variedade de telescópios.

É preciso mencionar que alguns objetos têm parâmetros com valores muito extremos, alguns não aparecem na distribuição da Fig. 5.11. Esses objetos apresentam valores de  $H$  e/ou  $\beta$  suficientemente diferentes para considerá-los como objetos isolados. Alvarez-Candal et al. (2016) relatou uma aparente combinação de duas distribuições diferentes para os valores de  $\beta$ , uma larga e quase plana, e uma segunda mais estreita e muito marcada (ambas gaussianas), as quais poderiam indicar duas possíveis populações. No entanto, os autores enfatizaram que tal conclusão está sujeita às imprecisões derivadas da qualidade dos dados.

Como mencionado no Capítulo 3, existe um debate acerca da existência de uma bimodalidade na distribuição das cores dos TNOs, a qual não têm sido completamente explicada.

Os nossos dados não indicam bimodalidade nas distribuições de magnitude nem das cores. No entanto, há um fato importante a ser considerado na distribuição das cores dos objetos, isso é que o  $p_V$  não segue a mesma tendência com respeito aos índices de cor. Essa peculiaridade do  $p_V$  será discutida mais à frente.

Assim, sugerimos que qualquer interpretação sobre a bimodalidade da distribuição de cada parâmetro pode ser debatido sempre que existir a possibilidade de tendências observacionais intrínsecas ao tamanho da amostra, as quais podem afetar a forma da curva da distribuição.

Utilizamos  $H_V$  e  $H_R$ ,  $\beta_V$  e  $\beta_R$  para calcular cores  $H_V - H_R$  e coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$ , como pode ser observado na Fig. 5.12. A maioria das cores absolutas são vermelhas, ou seja,  $H_V - H_R > (V - R)_\odot = 0,36$ . As cores vermelhas foram observadas anteriormente em TNOs podendo ser associadas a um efeito relativo ao processamento das superfícies dos objetos nos quais observamos uma grande concentração em  $H_V - H_R \approx 0,5$ .

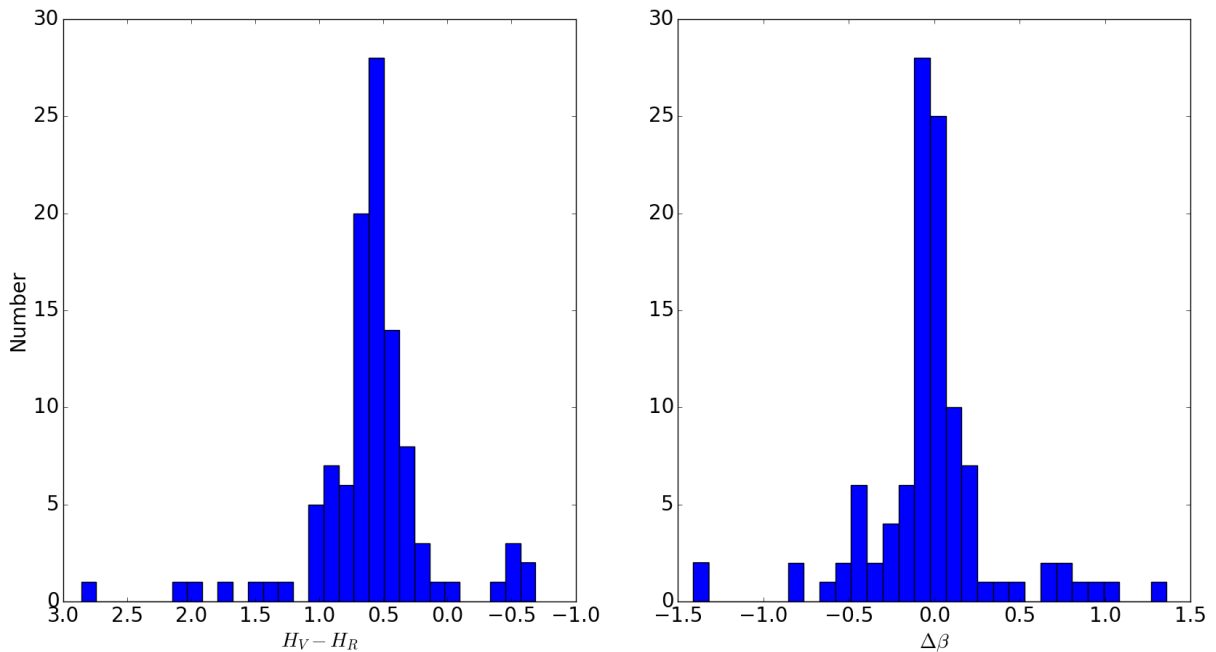


Figura 5.12 – Distribuições de  $H_V - H_R$  (esq.) e  $\beta_V - \beta_R$  (dir.) para 104 TNOs.

### 5.3 Correlações

Para testar as correlações foi utilizado o teste de correlação de Spearman. O teste de Spearman é uma medida de intervalo não paramétrica que mede a dependência estatística entre duas variáveis. É similar à correlação de Pearson sem a restrição de que a relação entre as duas variáveis (dependente,  $X_i$ , e independente,  $Y_i$ ) seja linear. Em outras palavras Spearman mede o grau de associação entre duas variáveis de acordo com o sentido da sua relação. As correlações podem ser i) linear ou curvilínea dependendo da nuvem de pontos. ii) positiva quando a variável independente aumenta assim como a variável dependente e iii) negativo, quando uma

das variáveis aumenta e a outra diminui. O  $r_s$  tem a forma,

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n d_i^2, \quad (5.4)$$

onde  $d_i$  é a diferença entre os intervalos atribuídos entre as duas variáveis,  $X_i$  e  $Y_i$  e  $n$  é o número de pares de dados atribuídos. A correlação de Spearman aumenta em magnitude conforme as variáveis ficam mais próximas de serem funções monótonas perfeitas uma da outra. Dois pares de variáveis são correlacionados se  $|r_s| \rightarrow 1$ , enquanto que para  $|r_s| \approx 0$  não existe correlação. A hipótese nula, do que os dois pares de variáveis não estão correlacionados é testada com  $P_{r_s}$ . A hipótese nula é rejeitada se o  $P_{r_s} \rightarrow 1$ .

Assim, para testes de hipóteses, deve-se adotar um valor crítico de significância que seja o máximo de probabilidade (ou risco) para não rejeitar a hipótese nula  $H_0$ . Afirmar que não existe correlação quando a correlação é verdadeira, isso é chamado de probabilidade de erro tipo I. O valor assumido para a significância depende de quanto uma interpretação errada pode afetar uma decisão. Para evitar problemas de erro tipo I, neste trabalho, as associações foram restritas de modo que elas tenham um grau de significância de  $\pm 3\sigma$  (equivalente à um intervalo de confiança IC = 99.7%) então consideramos uma correlação como apreciável somente quando  $|r_s| > 0.5$ , e significância estatística  $P_{r_s} \leq 0.05$ .

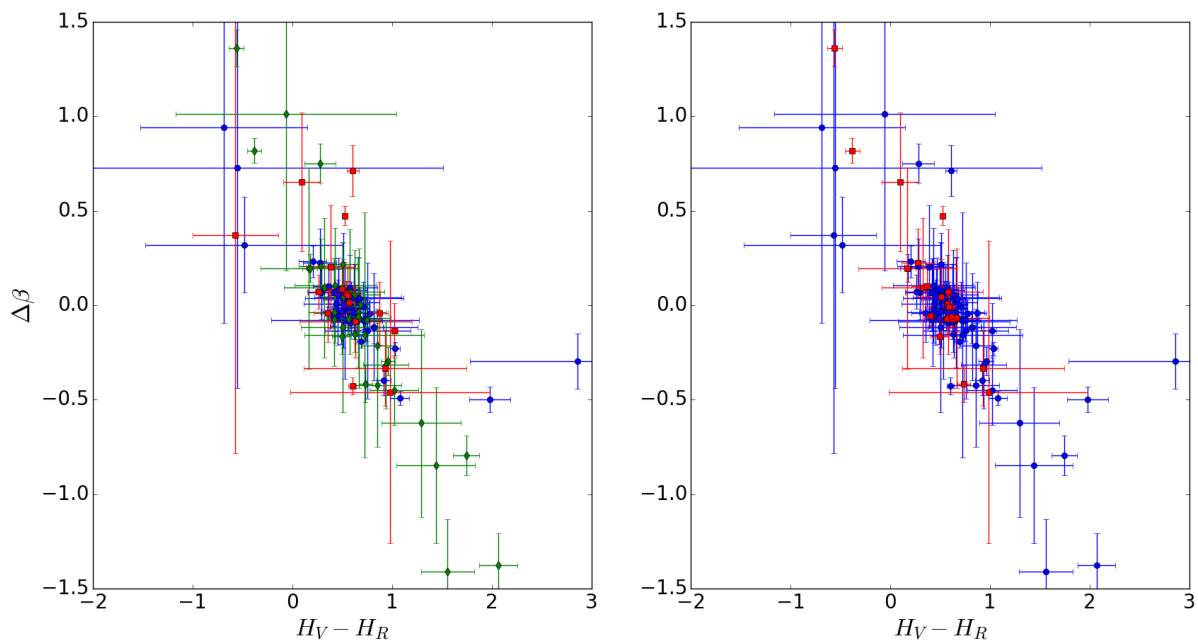


Figura 5.13 – Gráfico de dispersão de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ . Amostra [1] separados por semieixo maior por cores como:  $a < 40$  AU em pontos azuis,  $40 < a < 50$  AU em diamantes verdes,  $a > 50$  AU em quadrados vermelhos (acima). Amostra [2] em pontos azuis e Amostra [3] em quadrados

Tabela 5.5 – Correlações para todos os TNOs. A primeira e segunda coluna indicam os parâmetros testados, P1 e P2, respectivamente, as colunas 3 e 4 mostram os valores do teste de Spearman, a coluna 5, o índice de confiança CI, expresado em sigmas, é  $N$  indica o número de TNOs no teste. Os parâmetros testados: semi-eixo maior,  $a$ , excentricidade  $e$ , inclinação  $i$ , albedo geométrico  $p_V$  e diâmetro  $D$ .

P1	P2	$r_s$	$P_{r_s}$	CI	N
$H_V$ [1]	$a$	-0.4868	$3.968 \times 10^{-8}$	(3 $\sigma$ )	114
	$e$	0.2380	$1.07 \times 10^{-2}$	(2 $\sigma$ )	114
	$i$	-0.3913	$1.66 \times 10^{-5}$	(3 $\sigma$ )	114
	$\beta_V$	-0.1548	0.1014	(2 $\sigma$ )	114
	$D$	<b>-0.9808</b>	$1.6901 \times 10^{-46}$	(3 $\sigma$ )	64
	$p_V$	<b>-0.5807</b>	$3.94 \times 10^{-7}$	(3 $\sigma$ )	64
$H_R$ [1]	$a$	-0.4754	$1.02 \times 10^{-7}$	(3 $\sigma$ )	113
	$e$	0.2518	$7.12 \times 10^{-3}$	(3 $\sigma$ )	113
	$i$	-0.3584	$9.67 \times 10^{-5}$	(3 $\sigma$ )	113
	$\beta_R$	-0.1652	$8.01 \times 10^{-2}$	(2 $\sigma$ )	113
	$D$	<b>-0.9630</b>	$1.334 \times 10^{-37}$	(3 $\sigma$ )	64
	$p_V$	<b>-0.6389</b>	$1.021 \times 10^{-8}$	(3 $\sigma$ )	64
$H_V - H_R$ [1]	$\Delta\beta$	<b>-0.8117</b>	$8.295 \times 10^{-26}$	(3 $\sigma$ )	105
	$a$	0.0377	0.7018	(< 1 $\sigma$ )	105
	$e$	-0.0054	0.9558	(< 1 $\sigma$ )	105
	$i$	-0.1697	0.0834	(1 $\sigma$ )	105
	$H_V$	0.1364	0.1651	(1 $\sigma$ )	105
	$H_R$	-0.0382	0.6987	(< 1 $\sigma$ )	105
	$D$	-0.1016	0.4204	(< 1 $\sigma$ )	64
$\Delta\beta$ [1]	$a$	-0.0074	0.9397	(< 1 $\sigma$ )	105
	$e$	0.0526	0.5935	(< 1 $\sigma$ )	105
	$i$	0.0172	0.8613	(< 1 $\sigma$ )	105
	$H_V$	-0.0793	0.4213	(< 1 $\sigma$ )	105
	$H_R$	0.0766	0.4370	(< 1 $\sigma$ )	105
	$D$	0.0475	0.7069	(< 1 $\sigma$ )	64
	$p_V$	-0.0892	0.4796	(< 1 $\sigma$ )	64

### 5.3.1 Correlações com parâmetros físicos e orbitais

Numa primeira parte da análise da base de dados, utilizamos os parâmetros calculados de 113 objetos com  $H_V$ ,  $\beta_V$ , e 114 com  $H_R$ ,  $\beta_R$ , dos quais calculamos  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  para 105 TNOs que tinham magnitudes e coeficientes de fase calculados em ambos filtros. Dos 105 objetos com cores computadas, 65 coincidem com dados do levantamento chamado de *TNOs are Cool Data Base*. Para esses objetos testamos correlações com dados de  $p_V$  e  $D$ <sup>3</sup>. As correlações com elementos orbitais incluem semieixo,  $a$ , excentricidade  $e$ , e inclinação  $i$ , utilizando dados da *Astorb Database*<sup>4</sup>.

Todos os resultados das correlações são apresentados na Tabela 5.5 onde marcamos em negrito aqueles que são estatisticamente significativos. Testamos a correlação entre  $H_V$  ( $H_R$ ) e  $D$ ,  $p_V$ . Não encontramos nenhum parâmetro orbital correlacionado com  $H_V$  e  $H_R$ ,  $\beta_V$  e  $\beta_R$ . As magnitudes  $H_V$  e  $H_R$  estão correlacionadas com  $D$  e  $p_V$ , que é devido à relação entre esses

<sup>3</sup> <http://public-tnosarecool.lesia.obspm.fr/Published-results.html>

<sup>4</sup> <https://asteroid.lowell.edu/main/astorb>

Tabela 5.6 – Correlações para as amostras [2] e [3].

P1	P2	$r_s$	$P_{r_s}$	CI	N
$H_V - H_R$ [2]	$\Delta\beta$	<b>-0.7912</b>	$3.34 \times 10^{-19}$	(3 $\sigma$ )	84
	$H_V$	0.4204	$8.53 \times 10^{-1}$	(<1 $\sigma$ )	84
	$H_R$	-1.9999	$6.82 \times 10^{-2}$	(1 $\sigma$ )	84
	$D$	0.2058	$1.60 \times 10^{-1}$	(1 $\sigma$ )	47
	$p_V$	-0.5912	$9.63 \times 10^{-6}$	(3 $\sigma$ )	47
$\Delta\beta$ [2]	$H_V$	0.0710	0.5205	(< 1 $\sigma$ )	84
	$H_R$	0.2652	0.0147	(2 $\sigma$ )	84
	$D$	-0.3368	0.0192	(2 $\sigma$ )	47
	$p_V$	-0.3769	0.0082	(3 $\sigma$ )	47
$H_V$ [2]	$D$	<b>-0.9661</b>	$1.01 \times 10^{-28}$	(3 $\sigma$ )	47
	$p_V$	-0.4070	$4.09 \times 10^{-3}$	(3 $\sigma$ )	47
$H_R$ [2]	$D$	<b>-0.9467</b>	$2.81 \times 10^{-24}$	(3 $\sigma$ )	47
	$p_V$	-0.4807	$5.42 \times 10^{-4}$	(3 $\sigma$ )	47
$H_V - H_R$ [3]	$\Delta\beta$	<b>-0.8986</b>	$3.159 \times 10^{-08}$	(3 $\sigma$ )	21
	$H_V$	0.4204	0.0577	(1 $\sigma$ )	21
	$H_R$	-0.0045	0.9843	(< 1 $\sigma$ )	21
	$D$	-0.3872	0.1246	(1 $\sigma$ )	17
	$p_V$	-0.3243	0.2040	(1 $\sigma$ )	17
$\Delta\beta$ [3]	$H_V$	-0.4840	0.0261	(3 $\sigma$ )	21
	$H_R$	-0.0708	0.7603	(< 1 $\sigma$ )	21
	$D$	0.3725	0.1408	(1 $\sigma$ )	17
	$p_V$	0.3636	0.1513	(1 $\sigma$ )	17
$H_V$ [3]	$p_V$	<b>-0.8504</b>	$1.52 \times 10^{-5}$	(3 $\sigma$ )	17
	$D$	<b>-0.6412</b>	$5.53 \times 10^{-3}$	(3 $\sigma$ )	17
$H_R$ [3]	$p_V$	<b>-0.7401</b>	$6.79 \times 10^{-4}$	(3 $\sigma$ )	17
	$D$	<b>-0.7862</b>	$1.82 \times 10^{-4}$	(3 $\sigma$ )	17

parâmetros como se indica na Eq.3.12. Encontramos que entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  apresentam uma anticorrelação forte com valor  $r_s = -0.8117$  e com significância estatística de 100%. Embora não tenhamos encontrado correlações claras de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  com  $D$  e  $p_V$  considerando a amostra completa como é indicado na Tabela 5.5.

### 5.3.2 Correlação de $H_V - H_R$ e a $\Delta\beta$ .

A característica mais interessante que encontramos foi uma anticorrelação entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , a qual é válida para a amostra completa.

A correlação indica que os objetos mais vermelhos têm  $\Delta\beta$  com tendência a valores negativos, entanto que os objetos com  $\Delta\beta$  positivos são neutros e azuis. Nas curvas de fase isso significa que para superfícies mais vermelhas as curvas de fase no filtro  $R$  têm inclinações maiores do que as do filtro  $V$ , enquanto o contrário ocorre para objetos mais azuis. Por outro lado os objetos com as cores próximas a cor solar  $H_V - H_R \approx 0.36$  para o Sol ( $V - R = 0.36$ ), apresentam  $\Delta\beta \approx 0$  ou seja, TNOs com cores neutras apresentam curvas de fase com  $\beta_V \approx \beta_R$ . Este resultado sugere que as cores dos TNOs têm uma relação com a fase.

Como  $\beta_\lambda$  quantifica a mudança da magnitude  $H_\lambda$  por grau do  $\alpha$ , ele tem uma relação

direta com as propriedades de espalhamento da luz na superfície. Então  $\beta_\lambda$  é assumido como relativo ao albedo  $p_\lambda$  sempre que a superfície seja “moderadamente porosa e moderadamente rugosa” [Bowell & Lumme \(1979\)](#). Se a quantidade da luz refletida em cada  $\lambda$  depende, a princípio, do tamanho das partículas que refletem a luz (se  $D_{partícula} \gg \lambda$  luz é espalhada), as curvas de fase em cada filtro indicariam diferenças do albedo  $p_\lambda$ . Ou seja, diferentes comportamentos em diferentes filtros no mesmo intervalo de ângulos de fase indica diferentes espalhamentos de luz.

No entanto, a estrutura das partículas refletoras não pode ser caracterizada somente a partir do fluxo medido pois há fenômenos implícitos nos processos de espalhamento que não podem ser estudados unicamente com a intensidade, i.e. difração.

Então, com base em os comportamentos das curvas de fase em diferentes filtros, sugerimos que a correlação  $\Delta\beta$  e  $H_V - H_R$  indica propriedades dos diferentes dispersores que compom a superfície. Essa diferença aponta para as propriedades da porosidade e compactação da superfície. Além disso, a correlação é válida para TNOs de todas as regiões do cinturão trans-Netuniano, mesmo para os centauros o que indica que ela não tem relação com os parâmetros orbitais dos objetos.

### 5.3.3 Análise de grupos por tamanho

Estudos na literatura sobre a composição dos TNOs sugerem que as propriedades de superfície de objetos com  $D > 500$  km são diferentes dos objetos menores, principalmente pela capacidade de retenção de materiais voláteis ([Brown et al., 2005](#)). Com o objetivo de entender se há algum efeito relativo ao tamanho dos objetos, separamos a mostra de TNOs em "pequenos" e "grandes", indicadas como amostra [2] com  $H_V > 4.5$  e amostra [3] com  $H_V < 4.5$ , respectivamente. O primeiro ponto a destacar é que a correlação de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , mantem

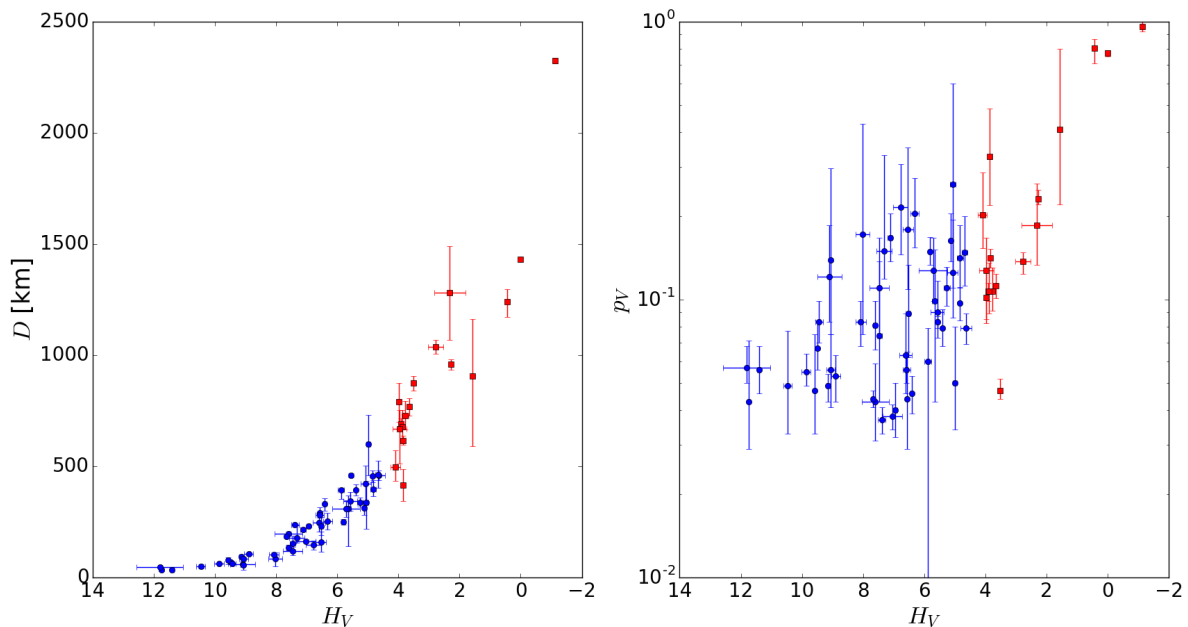


Figura 5.14 – TNOs  $H_V > 4,5$  mag em azul e  $H_V < 4,5$  mag no espaço de parâmetros  $H_V$  vs.  $D$  (esquerda) e  $H_V$  vs.  $p_V$  (direita).



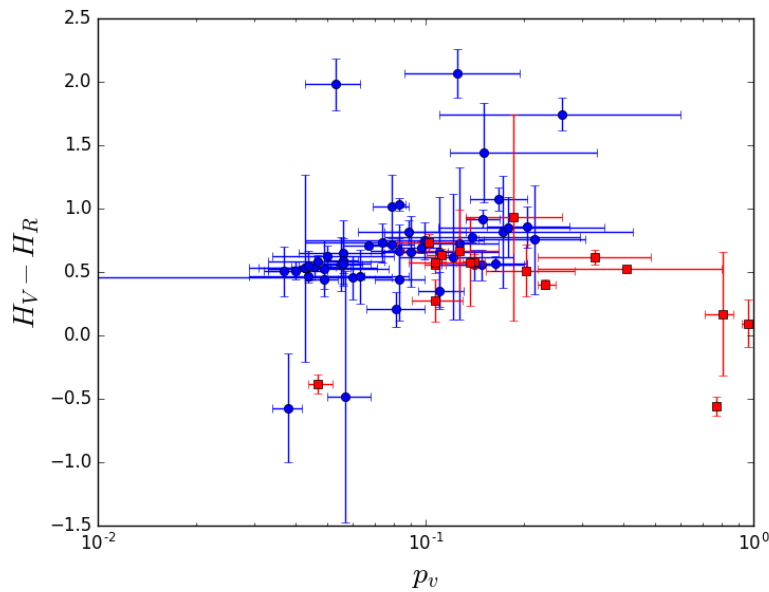


Figura 5.15 – TNOs  $H_V > 4,5\text{mag}$  em azul e  $H_V < 4,5\text{mag}$  em vermelho no espaço de fase  $H_V - H_R$  vs.  $p_V$ .

significância estatística em ambos grupos, como é mostrado na Tabela 5.6, o que sustenta nossa hipótese de que ela se refere a propriedades de reflexão da superfície.

Ambas amostras têm intervalos em  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  semelhantes, embora com valores mais extremos na amostra [2], o que pode ser relacionado ao fato dos dados dessa amostra ter menor S/R. A amostra [2] inclui 84 TNOs enquanto que a amostra [3], tem 21 TNOs. Cada amostra tem dados em ambos filtros e dados de  $D$  e  $p_V$  para 47 e 17 objetos, respectivamente. A amostra [2] tem, em média, albedos mais baixos que a amostra [3], o que é esperado devido à diferença de retenção de voláteis nos objetos maiores, isso é, TNOs com  $D > 500\text{km}$  têm maior capacidade de retenção de voláteis como mencionado na seção 2.3.2.

### 5.3.3.1 Correlação de $H_V - H_R$ e $p_V$ .

Encontramos que, para a amostra [2],  $H_V - H_R$  esta correlacionada com  $p_V$ , o que sugere que as superfícies de TNOs com alto  $p_V$  têm cores mais vermelhas, enquanto que para a amostra [3] somente se obtém uma tendência sem significância estatística.

Mesmo que a correlação entre  $H_V - H_R$  e  $p_V$  não tenha significância estatística para os dois grupos, é possível notar uma tendência de alomeração entre as amostras. Em geral, existe uma tendência à maiores magnitudes absolutas  $H_V(H_R)$  e  $p_V$ .

## 5.4 Cores e propriedades das superfícies dos TNOs

Com o objetivo de fazer uma análise exhaustiva das cores  $H_V - H_R$  e da sua correlação com  $\Delta\beta$  e parâmetros orbitais, a base de dados foi complementada com observações para 10 TNOs. A metodologia para a estimativa das magnitudes  $V(1, 1, \alpha)$  e  $H_\lambda$  foi a mesma descrita na seção 5.1, mas desta vez com uma variação no cálculo das curvas de fase sintéticas de forma a

evitar superestimar os erros. Mais dados da literatura também foram adicionados. A análise incluiu também um estudo comparativo da correlação entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  e curvas de fase geradas utilizando o modelo de Lumme & Bowell (1981). A ideia foi testar se os efeitos de espalhamento (quantificados pelo termo de dispersão múltipla  $Q$ ), poderiam estar afetando as dispersões em diferentes comprimentos de onda, e isso poderia fornecer informações sobre os meios de dispersão de partículas na superfície. O modelo faz uma aproximação da teoria de transferência radiativa na qual é suposto que as curvas de fase dos objetos podem ser geradas a partir de uma única função mediante a variação de um termo: o fator de espalhamento múltiplo  $Q$ . Seu comportamento fica dependente dos parâmetros rugosidade e porosidade, apresentando relações empíricas entre  $Q$ ,  $p_V$ ,  $\beta$  e  $H$ .

#### 5.4.1 Aumento da mostra de TNOs e correlações

Novos dados da literatura, apresentados na Tabela 5.7, foram incluídos na base de dados. Os dados incluem magnitudes nos filtros  $V$  e/ou  $R$ . Assim, a base de dados passa a contar com 340 TNOs para os quais temos mais de 2.400 dados. Os novos valores foram usados para calcular

Tabela 5.7 – Novos dados da literatura incluídos em nossa base de dados

Referência	Objetos
Luu & Jewitt (1996)	1993FW 1993RO 1993SC 1994ES2 1994EV3 1994JS 1994TB 1995DA2 1995DB2 1995DC2 1995QY9 1995WY2 2002GX32 Albion Chiron Hylonome Nessus Pholus
Lacerda & Luu (2006)	1996TO66 1996TS66 1998SN165 Chaos
Bagnulo et al. (2006)	2002VE95
Ortiz et al. (2007)	Makemake
Belskaya et al. (2008)	Eris
Tegler et al. (2016)	1996GQ21 1998VG44 2000GN171 2001KB77 2001QF298 2002AW197 2002KX14 2002KY14 2002MS4 2002PQ15 2002QX47 2002TC302 2002UX25 2002VE95 2002VR128 2002WC19 2002XV93 2003AZ84 2003FY128 2003UR292 2003UY117 2003UZ117 2003VS2 2003WL7 2004EW95 2004GV9 2005RO43 2005UJ438 2006SX368 2006XQ51 2007RG283 2007RH283 2007TJ422 2007TK422 2007UM126 2007VH305 2008FC76 2008QD4 2008SJ236 2008UZ6 2008YB3 2009YF7 2009YG19 2010BK118 2010NV1 2010RM64 2010TH 2010VZ98 2011ON45 2012UT68 2012VU852013UL10 2013XZ8 2014ON6 Amycus Echeclus Eris Makemake Orcus Rhiphonos Sedna Varda

$H_V$ ,  $H_R$ ,  $\beta_V$ , e  $\beta_R$ , para obter  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  para um total de 117 TNOs, aumentando em 17% a amostra anterior de 105 TNOs. O procedimento para calculá-las é o mesmo descrito na seção 5.1, com exceção de uma melhoria na atribuição de valores  $\Delta m$  dos objetos para os quais esta quantidade não era conhecida, como explicado a seguir.

Neste novo estudo procuramos aprofundar nosso conhecimento sobre as correlações entre os parâmetros calculados e outros parâmetros com maior precisão possível. O objetivo foi testar a correlação de maior interesse, entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , a partir de nossa hipótese do que ela seja relativa às propriedades de estrutura das superfícies. Para isso, devemos considerar que a maior precisão das cores é alcançada somente para aqueles objetos sobre os quais temos informações a respeito dos efeitos de rotação, ou seja, aqueles para os quais  $\Delta m$  é conhecida.

Geramos 100.000 soluções diferentes para a Eq.5.1.2, desta vez fazendo a seguinte substituição:

$$M_\lambda(1, 1, \alpha) \rightarrow M_\lambda(1, 1, \alpha) + rand_i \times \frac{\Delta m}{2}. \quad (5.5)$$

onde  $rand_i$  é extraído aleatoriamente de uma distribuição uniforme  $\in [-1, 1]$ . Utilizamos a semi-amplitude em lugar da amplitude total porque usar as amplitudes faz com que os erros

sejam superestimados, o que leva à obtenção de muitas soluções com pontos abaixo ou acima de seus valores mínimo e máximo. Vale ressaltar o fato de considerando a semi-amplitude não altera substancialmente os valores da média das soluções, lembrando que os valores de  $H_\lambda$  e  $\beta_\lambda$  finais para cada objeto são obtidos da média das 100.000 soluções. Assim, a mediana dos erros nos parâmetros calculados é  $\tilde{\sigma}_{H_V-H_R} = 0.09$ , e  $\tilde{\sigma}_{\Delta\beta} = 0.08$ .

#### 5.4.2 Melhora da estimativa de $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$ pela variação por rotação.

Como mencionado anteriormente o efeito da variação da magnitude por rotação deve ser levado em conta na estimativa da magnitude absoluta. Por isso, deve-se procurar uma maneira de simular a amplitude da curva de luz para todos os objetos que não tem essa estimativa. Em [Ayala-Loera et al. \(2018\)](#) para os objetos com  $\Delta m$  desconhecida foi atribuído um valor diferente de zero, mas percebemos que a variação rotacional é muito grande usando  $[-\Delta m, \Delta m]$ , o que implica a geração de soluções espúrias com pouca probabilidade de ocorrência. Com o objetivo de tratar esse problema foi feita uma estimativa que permite assumir um valor aproximado para os objetos considerando os efeitos de tamanho do TNO como é indicado a seguir.

1. Para objetos com  $\Delta m$  conhecida, fazemos o mesmo procedimento usado em [Ayala-Loera et al. \(2018\)](#).
2. Assumimos uma mediana da distribuição inteira dos 135 objetos com  $\Delta m$  conhecida. Usando esse valor são criadas 100 curvas sintéticas para os 38 TNOs que não têm estimativa de  $\Delta m$  e um primeiro valor para  $H'_V$  é calculado.
3. Dividimos a distribuição  $\Delta m$  vs.  $H_V$  dos objetos computados (como indicado em 1) em 13 intervalos, como é mostrado na [Fig.5.17](#).
4. Utilizando as aproximações do ponto 1, estimamos a  $\Delta m$  correspondente para cada objeto.

Deste modo, na geração das curvas sintéticas são considerados os efeitos por tamanho do objeto e se reduz a geração de soluções espúrias causadas por uma amplitude de rotação superestimada.

Os casos de TNOs com valores muito extremos dos parâmetros são descartados, utilizando o critério de  $|\beta_\lambda| > 1.5$  mag por grau. Assim, de 122 TNOs com magnitudes reduzidas nos dois filtros obtemos um total de 117 TNOs com estimações de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , os quais são utilizados para testar relações com parâmetros orbitais e físicos dos objetos.

#### 5.4.3 Correlações de $H_V - H_R$ com grupos dinâmicos

Os valores calculados  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , desses 117 TNOs foram usados para testar correlações  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  com os elementos orbitais<sup>5</sup>  $i$  e  $e$ , e classes dinâmicas<sup>6</sup> com objetivo de testar algumas correlações sugeridas na literatura por outros autores. Sendo que a nossa

<sup>5</sup> Dados tomados de <http://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>

<sup>6</sup> <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>

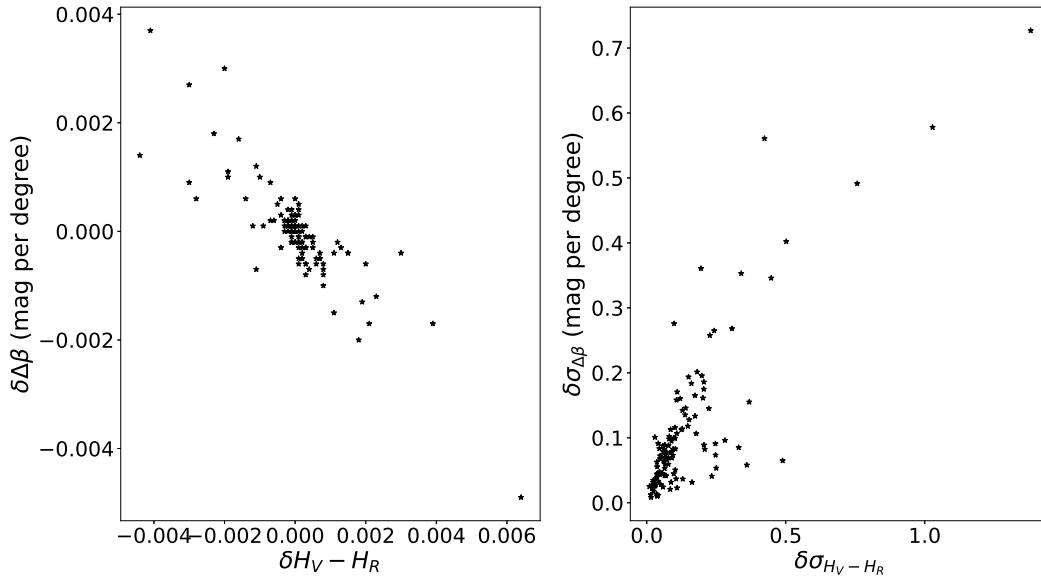


Figura 5.16 – Comparação considerando  $\Delta m$  vs.  $\Delta m/2$  em nosso processamento. Esquerda: Diferença entre os valores nominais de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , tudo dentro 0.6%. Direita: Diferença entre os valores dos erros, nos casos extremos temos diferenças na estimativa dos erros nas cores de 1 magnitude.

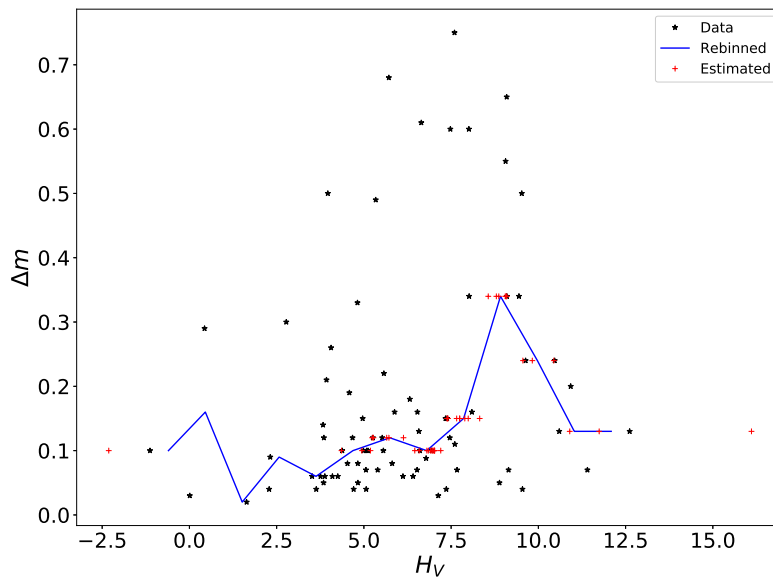


Figura 5.17 –  $H_V$  vs.  $\Delta m$ . Os asteriscos em preto indicam valores na literatura (ou seus limites superiores). A linha azul as medianas dos bins, e os símbolos vermelhos indicam os valores atribuídos para os 38 TNOs sem amplitude de curve reportada.

amostra é reduzida, não é possível representar estatisticamente todos os grupos dinâmicos de TNOs, por isso decidimos dividir nossa amostra em três grupos.

1. TNOs ressonantes, todos os objetos que se encontram em ressonâncias de movimento médio, inclui 32 TNOs, dos quais 25 são plutinos.
2. TNOs clássicos, 32 TNOs que inclui todos os Cubewanos, os classificados como TNOs "quentes" e os "frios", mais 7 TNOs do grupo de Haumea.

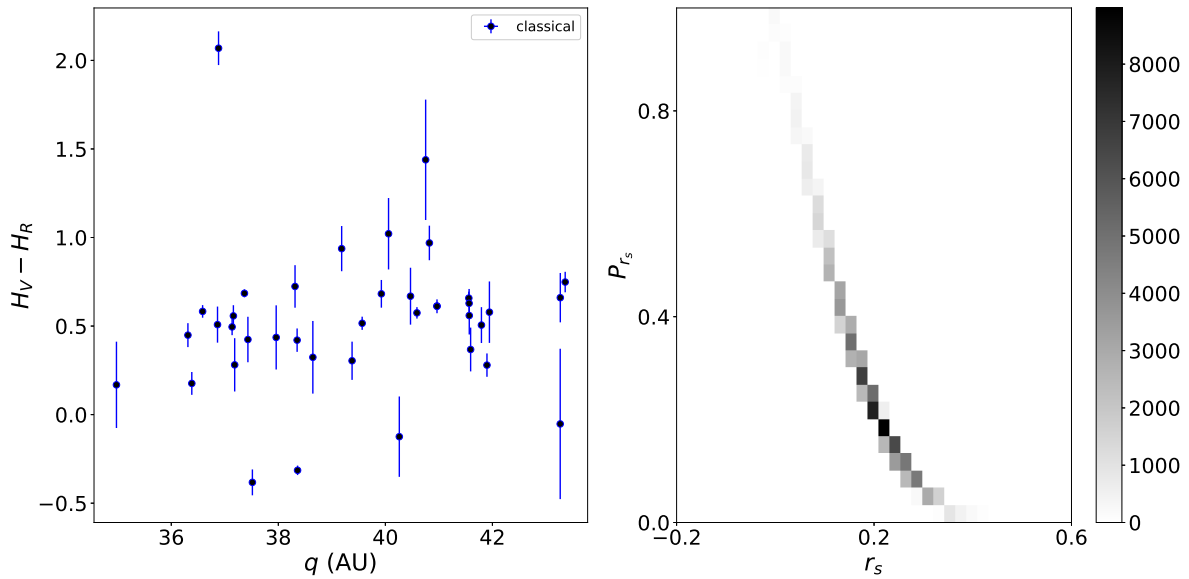


Figura 5.18 – Distância do periélio versus  $H_V - H_R$  dos objetos clássicos (acima esquerda) e o espaço de fase coberto pelo teste de correlação de Spearman ao considerar erros nos dados (acima direita).

3. TNOs CSD, que inclui 32 centauros, 8 TNOs do disco espalhado e 6 objetos dos TNOs destacados.

Como mencionado na seção 5.1, usamos o parâmetro de correlação de Spearman.

No que segue são apresentadas as análises estatísticas para as correlações da cor com elementos orbitais  $q$  e  $i$  sugeridas pela literatura.

#### 5.4.4 Um possível grupo baseado em $q$

Tegler & Romanishin (2000) sugeriram a existência de um grupo de TNOs muito vermelhos com órbitas de baixas inclinações e com periélio  $q > 40$  au. Os autores sugerem que tais cores vermelhas poderiam ser explicadas como uma característica de superfícies que têm sido altamente afetadas pela irradiação, o que indicaria elas serem superfícies mais antigas do que aquelas que apresentam cores neutras (ou azuis). Nossos dados não mostram evidências claras da detecção desse grupo.

Considerando a distribuição de cores vs.  $q$  para os objetos com periélio no intervalo  $32 < q < 44$  au,  $H_V - H_R$  parece aumentar com os semieixos até 41 au, conforme pode ser visto na Fig. 5.18, embora essa tendência não é válida ao considerar os erros devido ao amplo intervalo de soluções como indicado no gráfico da direita. Cabe ressaltar que o comportamento de  $H_V - H_R$  não é influenciado pelo grupo de Haumea, o qual tem propriedades superficiais específicas (ver seção 2.3.2), e distâncias do periélio próximas a 39 au.

#### 5.4.5 Possíveis grupos dependentes de $i$

Uma correlação entre cores visíveis e inclinação foi proposta por Doressoundiram et al. (2008), permitindo identificar uma aparente bimodalidade de TNOs na região do cinturão clássico

que seria explicada pelo processamento das superfícies como resultado do intemperismo espacial. Isso sugere que os TNOs clássicos de baixa inclinação são muito mais vermelhos que o resto das populações, pois objetos com órbitas de grandes  $i$  tiveram que ser afetados por processos de colisão, o que implica revestimento das suas superfícies e cores azuis. Os autores indicam que existe uma correlação de cores no visível e  $i$  na região de  $40 < a < 50$  au, e isso é sugerido por [Tegler & Romanishin \(2000\)](#) também.

Na Fig. 5.19 é possível ver a relação entre os parâmetros  $H_V - H_R$  vs.  $i$ . Os objetos em órbitas com inclinações baixas  $i < 10^\circ$  apresentam uma maior dispersão das cores, que vai desde o azul até o vermelho. De maneira diferente, os TNOs em órbitas com inclinações maiores apresentam cores azuis.

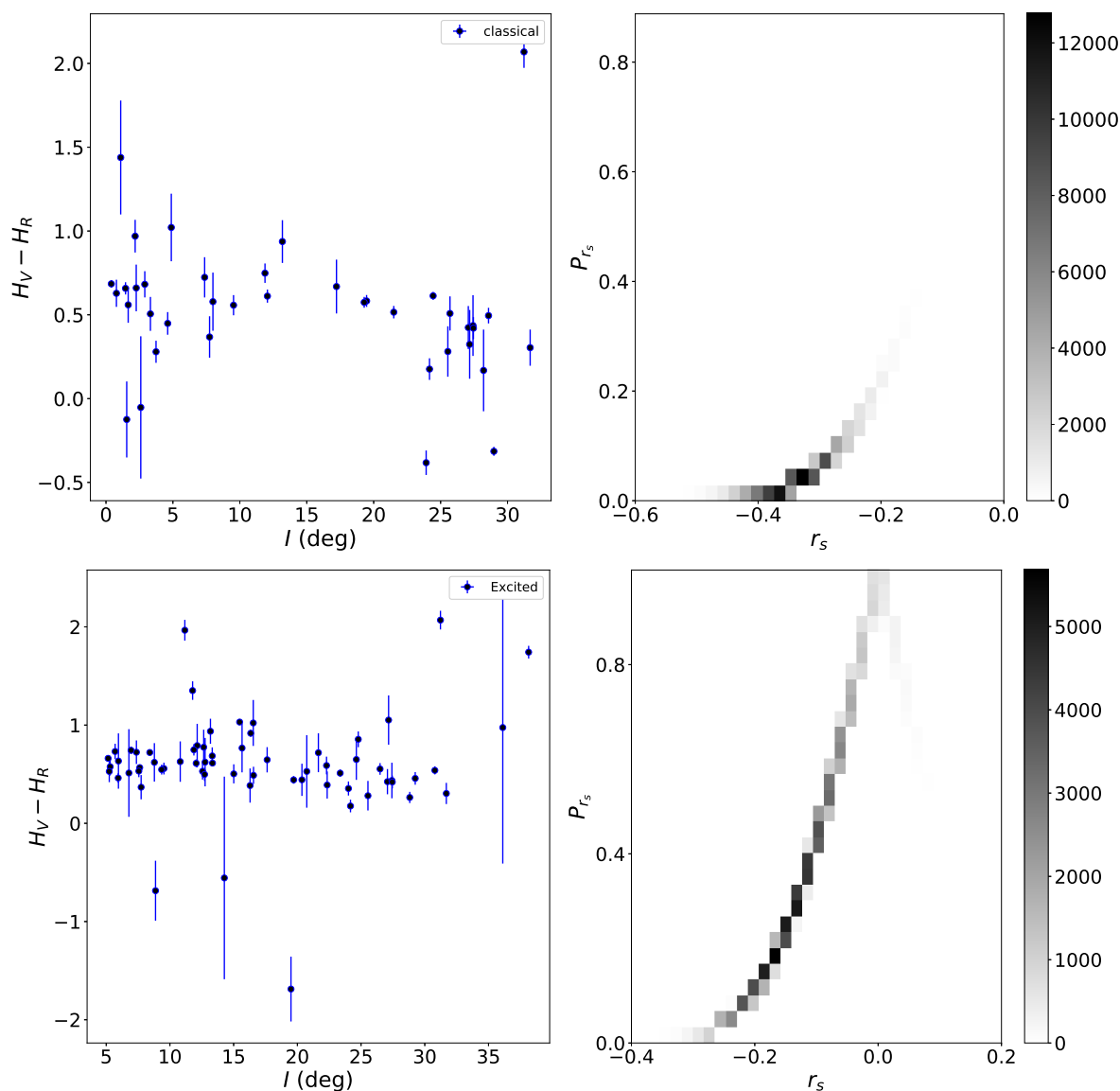


Figura 5.19 – Inclinação vs.  $H_V - H_R$  de objetos clássicos (acima direita). Inclinação vs.  $H_V - H_R$  dos TNOs excitados (abaixo esquerda). Na coluna direita são mostrados os espaços de fase cobertos pelo teste de correlação de Spearman ao considerar os erros nos dados para cada caso.

A dispersão das cores em baixas inclinações não corrobora a sugestão de [Peixinho](#)

et al. (2008) que propõe um grupo vermelho de objetos com órbitas de baixa inclinação e uma distribuição maior das cores em populações de alta inclinação. Essa diferença observacional tem sido amplamente utilizada como uma das restrições observacionais para separar as populações dos TNOs clássicos quentes e frios, tendo importantes implicações para estudos de evolução dinâmica do Sistema Solar já que os TNOs são a melhor evidência dos processos de migração que levaram aos planetas atingir sua arquitetura atual (Gomes, 2003; Nesvorný, 2015).

Outra correlação foi sugerida por Marsset et al. (2018) para uma população de TNOs dinamicamente excitados. Esses são todos os que não pertencem aos clássicos frios, com órbitas de baixa inclinação  $i \leq 5^\circ$ , o grupo Haumea, os TNOs em órbitas retrógradas ou os chamados cometas da família de Júpiter (TNOs com o parâmetro Tisserand em relação a Júpiter  $T < 3$ ) ou apresentam uma distribuição bimodal das cores. Os autores indicam quatro grupos dinâmicos: clássicos quentes, TNOs ressonantes, disco disperso e os disco destacado.

Para os TNOs de nossa amostra encontramos que 64 objetos que satisfazem esses critérios. Utilizando então a amostra de 64 TNOs excitados testamos  $H_V - H_R$  vs.  $i$ . Os nossos resultados indicam que, com exceção de alguns objetos com valores muito extremos, não é possível perceber um comportamento bimodal claro com respeito do valor de  $i \leq 5^\circ$  sugerido pelos autores.

Encontramos uma pequena diferença nos valores médios de  $H_V - H_R$  para objetos com órbitas acima e abaixo de  $i = 15^\circ$  como é mostrado na Fig.5.19 (abaixo direita). No entanto, essa diferença não é significativa porque para o grupo com inclinações menores  $H_V - H_{R(I \leq 15^\circ)} = 0.61 \pm 0.43$ , enquanto para o grupo com inclinações maiores temos  $H_V - H_{R(I \geq 15^\circ)} = 0.58 \pm 0.56$ . Assim, alguns objetos podem pertencer a ambos grupos. Alguns objetos apresentam valores muito extremos, o que pode criar um efeito visual de separação nos dados.

Na coluna direita da Figura 5.19 os mapas bidimensionais mostram os espaços de fase de  $r_S$  e  $P_{r_s}$  de cada correlação, a qual é testada para todas as soluções possíveis considerando os erros nas estimativas de cor. Assim, a correlação é testada a partir da geração de 100.000 distribuições de cor possíveis, cada distribuição é gerada dentro do intervalo de variação igual ao intervalo do erro de cor computado para cada TNO. Para cada distribuição se computa uma análise de correlação e  $r_S$  e  $P_{r_s}$ . Se os erros são suficientemente grandes para alterar a correlação, a dispersão do  $r_S$  e  $P_{r_s}$  será grande, de outro modo as soluções estarão concentradas.

#### 5.4.6 Análise da correlação $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$

Fizemos alguns testes visando entender se a qualidade de nossos resultados pode estar afetando a correlação  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ . Foram considerados unicamente os objetos que tinham mais de 4 pontos nas curvas de fase em ambos filtros, e descartamos objetos com  $\sigma_{H_\lambda} > 0.05$ . Os valores nominais obtidos a partir do teste de correlação de Spearman para a amostra completa são,  $r_s = -0.79$  e  $P_{r_s} = 10^{-25}$ .

A Fig. 5.20 mostra a distribuição de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  computada para 117 TNOs. Para essa amostra testamos se a correlação se mantém considerando os erros computados para cada TNO, da mesma maneira que fizemos para as correlações apresentadas anteriormente. Observamos que as 100.000 soluções do teste constituem um espaço de fase claramente estreito (direita), o que

indica que a correlação é forte. Encontramos que a correlação se mantém para todas os objetos e para todas as populações dinâmicas, mas com aumento no valor do  $P_{r_s}$ . Os valores nominais do testes de Spearman e os tamanhos dos grupos dinâmicos são dados na Tabela 5.8. Assim,

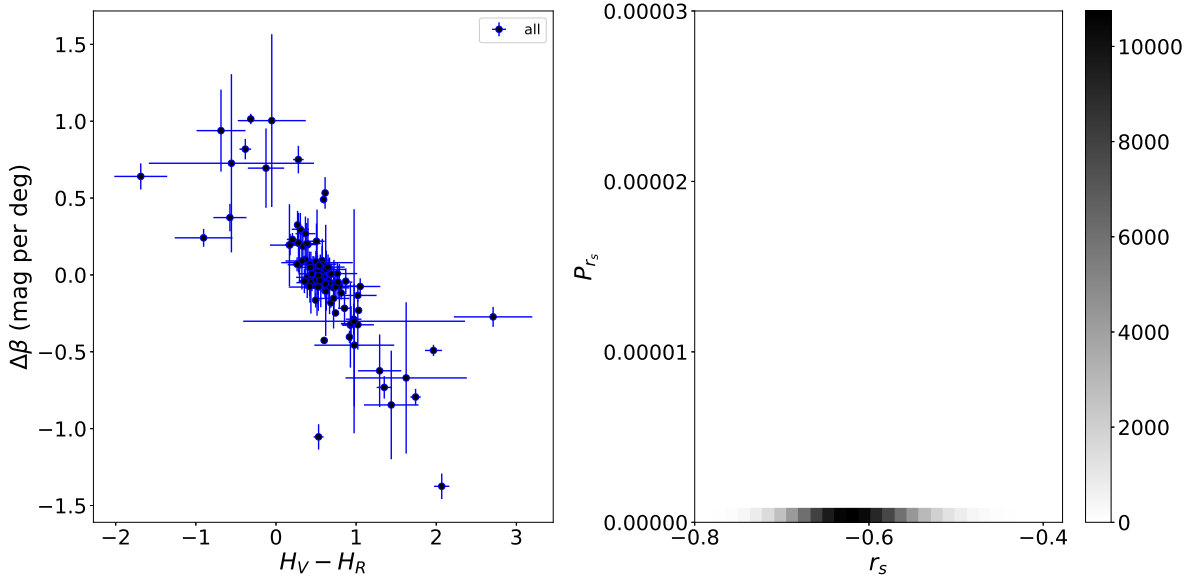


Figura 5.20 – Left:  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$  para toda a nossa amostra.

Tabela 5.8 –  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$ , correlações de Spearman para todas as amostras dinâmicas consideradas neste trabalho.

População	$r_s$	N	$P_{r_s}$
Todos	-0.78	117	$10^{-25}$
TNOs ressonantes	-0.76	32	$4 \times 10^{-7}$
TNOs clássicos	-0.83	39	$8 \times 10^{-11}$
TNOs CSD	-0.76	46	$7 \times 10^{-10}$

confirmamos que a correlação  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$  realmente descreve uma propriedade de toda a população dos objetos. Como a correlação se cumpre para todos os TNOs sem diferenças evidentes para cada grupo dinâmico, bem como do tamanho, composição e albedo, ela tem que indicar uma propriedade superficial. Então, se os parâmetros envolvidos tem a ver com o diferenças em fluxos em diferentes comprimento de onda, ela deve indicar propriedades microscópicas da superfície, o que aponta para alguma propriedade das partículas refletoras. A nossa hipótese é que ela tem relação com às propriedades de empacotamento das partículas dispersoras da superfície, isto pode ser porosidade e/ou compactação.

Com objetivo de obter evidências que corroborassem nossa interpretação da correlação procuramos por um modelo de espalhamento da luz em superfícies, isto visando informações sobre compactação ou porosidade e comparar com os nossos dados.

#### 5.4.7 Modelo HG e curvas de fase de TNOs

O modelo atualmente aceito pela IAU para determinação de magnitudes absolutas dos corpos menores é o modelo de três parâmetros HG1G2 de [Muinonen et al. \(2010\)](#). Entretanto, o



modelo usa parâmetros de entrada relativos a estrutura que dependem de funções base tabuladas que não podem ser adequadas de maneira arbitrária a nossos dados. Assim, utilizamos o modelo de Lumme & Bowell (1981), L&B-81, que se adapta as propriedades dos nossos dados fotométricos. O modelo foi desenvolvido para prever as propriedades de dispersão de superfícies planetárias. Sendo o modelo baseado na teoria de dispersão da luz, ele pode ser adotado para todos os tipos de superfícies no Sistema Solar, pois descreve como a dispersão múltipla se relaciona com a porosidade e a rugosidade de uma superfície planetária. Os autores mostraram que, para superfícies de asteroides, ambos efeitos podem ser bem separáveis já que cada um tem uma certa predominância por fase. Assim, as curvas de fase podem ser caracterizadas mediante um único parâmetro, o fator de dispersão múltipla  $Q$ , que se define como a razão da componente múltipla e o total de luz dispersada (a componente múltipla mais a componente única).

O modelo normaliza as funções que definem as componentes de dispersão múltipla  $L_m(\alpha)$  e único ou linear  $L_l(\alpha)$  do brilho total do objeto  $L_{obs}(\alpha)$  em  $\alpha = 0^\circ$ .

$$L_{obs}(\alpha) = L_l(\alpha) + L_m(\alpha). \quad (5.6)$$

De acordo com a Eq. 4 de L&B-81, a função que descreve a intensidade observada  $\Phi_{obs}(\alpha)$ , normalizada a  $\alpha = 0^\circ$ , em termos das componentes de dispersão é

$$\Phi_{obs}(\alpha) = (1 - Q)\Phi_l(\alpha) + Q\Phi_m(\alpha), \quad (5.7)$$

onde  $\Phi_l(\alpha)$  é definido a partir de três funções,

$$\Phi_l(\alpha) = \Phi_s(\alpha, D)\Phi_R(\alpha, \rho)\Phi_p(\alpha, g), \quad (5.8)$$

1. Função de fase devido a sombras,  $\Phi_s(\alpha, D)$ . Determina a probabilidade de que os pontos de incidência e refletância da luz estão vazios. Depende de dois parâmetros,  $xP_{diff}$ , que representa as partículas refletoras que são suficientemente pequenas para não ter contribuições ao efeito de sombreamento (ou seja partículas que refratam a luz, ou refratoras), e  $(1 - x)P_{part}$  que caracteriza a densidade volumétrica das partículas  $D$ . A fim de simplificar e generalizar o modelo, se assume que as partículas são esféricas.
2. Função de rugosidade,  $\Phi_R(\alpha, \rho)$ . Caracteriza as contribuições da rugosidade, composta pelas componentes de macro rugosidade e micro rugosidade. A primeira definida a partir dos buracos maiores na superfície (i.e. crateras de impactos de meteoritos) e a segunda como flutuações muito significativas de grupos de partículas da superfície. Ambas estão definidas a partir da probabilidade de observar a luz recorrer caminhos livres médios (horizontal e vertical) maiores do que as longitudes de onda observadas.
3. Função de refração,  $\Phi_p$ . Define o albedo da partícula, usando uma aproximação para o espalhamento múltiplo em ângulos de fase pequenos e assume que o ângulo de fase é aproximadamente igual ao ângulo de espalhamento (seção IV e Eq. 3 L&B-81). A função de fase depende do fator de assimetria  $g$ , que para o retroespalhamento total é -1 e para o espalhamento total para frente +1.

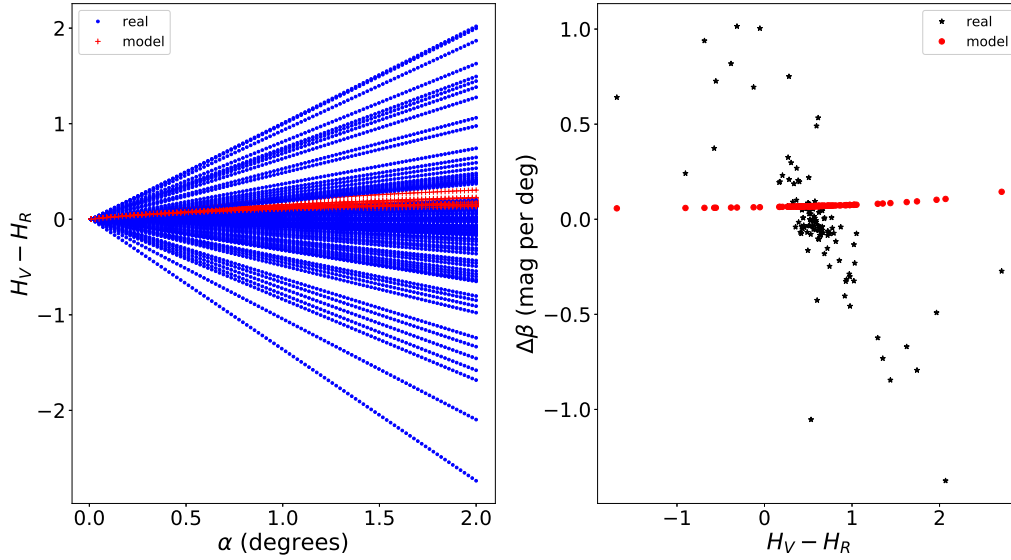


Figura 5.21 – Comparações entre os resultados observacionais e os resultados obtidos a partir do modelo fotométrico. Em azul, são mostradas as  $H_V - H_R$  de nossos objetos (normalizados para  $H_V - H_R = 0$ ) e em vermelho as mesmas curvas se seguissem o modelo L&B-81 (esquerda). As estrelas em preto indicam nossos dados (sem barra de erro), em vermelho os resultados do modelo(direita).

Usamos a aproximação,

$$D[km] \propto 10^{-H/5} \times p^{-0.5} \quad (5.9)$$

Associamos a proporção dos albedos nos filtros  $V$  e  $R$  com  $H_V - H_R$  de maneira que,

$$10^{(H_V - H_R)/5} \propto (p_V/p_R)^{0.5} \quad (5.10)$$

As curvas de fase são calculadas numericamente e comparadas com os valores observacionais. Os resultados para os objetos com curvas de fase nos dois filtros  $V$  e  $R$ , são dadas na Fig.5.21 onde o gráfico da esquerda mostra, em azul, os resultados de curvas de fase utilizando o ajuste linear e, em vermelho, aquelas utilizando o modelo L&B-81. Por outro lado, o gráfico da direita mostra a distribuição de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  calculadas com o ajuste linear (preto) e o modelo (vermelho). Conforme pode ser observado, as curvas obtidas com o modelo não concordam com os comportamentos das curvas geradas a partir das observações.

No modelo, conforme o ângulo de fase aumenta as cores ficam vermelhas, entretanto, os dados do ajuste linear indicam que essas cores vermelhas não são observadas para todos os objetos. De fato, mais do 15% dos objetos ficam azuis para maiores ângulos de fase.

#### 5.4.8 Comportamento das cores

A distribuição das cores, como se observa na Fig. 5.22 (direita) para os 117 TNOs, indica um pico bem marcado em  $H_V - H_R \approx 0.5$  e outro menos evidente em  $H_V - H_R \approx 0.9$ . Essas distribuições poderiam ser relativas à bimodalidade indicada por Tegler & Romanishin (2000), embora a existência de tais grupos é duvidosa já que que a distribuição muda quando são considerados os erros dos objetos. Na Fig. 5.22 (esquerda) se mostra uma análise que testa a variação dessas distribuições considerando os erros.

Para realizar o teste de variação nas distribuições foram criadas 100.000 distribuições sintéticas mediante a criação de cores a partir de uma distribuição normal com valor médio igual ao valor da cor  $H_V - H_R$  e uma desviação padrão igual ao erro  $\sigma_{H_V - H_R}$ . Então, calculamos os valores médios das cores em cada intervalo (indicados com a linha vermelha) e assim podemos observar que o segundo pico desaparece. No entanto, esse tipo de análise deve ser interpretada com cuidado porque o número de objetos em cada bin é diferente, o que pode resultar em traços espúrios como o pico que se observa em  $H_V - H_R = -0.5$ .

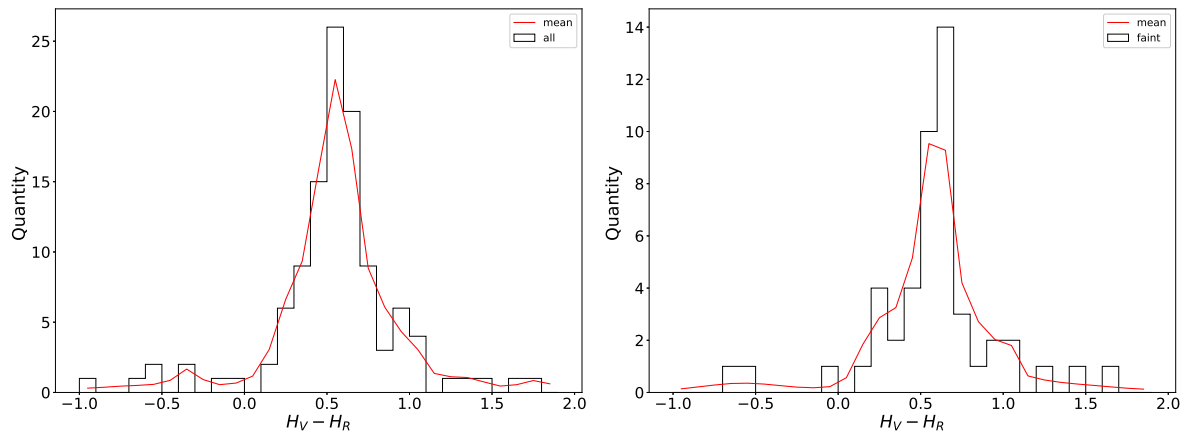


Figura 5.22 – Histograma mostrando  $H_V - H_R$  de 117 TNOs. A linha vermelha mostra o histograma considerando os erros nas cores (vide texto).

Como mencionado na seção 3.3.2.1, Peixinho et al. (2008) sugeriram que os objetos com magnitudes  $H_V \lesssim 7$  mostram uma distribuição de cor bi-modal, aparentemente relativa ao tamanho dos objetos. Testamos essa bimodalidade com 78 TNOs com  $H_V \lesssim 7$  usando o mesmo procedimento no cálculo do histograma como acima e encontramos que não há evidência de bimodalidade. Como pode ser observado na Fig. 5.22 (direita) o histograma sem correção e o histograma que considera os erros mostram um único pico em  $H_V \sim 0.6$ , mas é possível perceber que no segundo os TNOs apresentam uma distribuição muito grande de cores.

As curvas de fase dos objetos incluídos em nossa última publicação de dados pode ser consultada online.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> <http://extranet.on.br/alvarez/paper3/>  
<http://extranet.on.br/alvarez/TNOs-AbsMags/phase - curves.tar>

Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas

Object	$H_V$	$\beta_V$ [mag por grau]	$N_V$	$H_R$	$\beta_R$ [mag por grau]	$N_R$	$\Delta m$	Ref.
15760 1992 QB <sub>1</sub>	7.83 ± 0.05	-0.193 ± 0.05	3	6.87 ± 0.05	0.102 ± 0.05	3	0.04	All6
15788 1993 SB	7.99 ± 0.18	0.373 ± 0.13	5	7.70 ± 0.20	0.307 ± 0.17	4	0.14	All6
15789 1993 SC	7.39 ± 0.02	0.050 ± 0.01	8	6.71 ± 0.02	0.015 ± 0.02	6	0.04	All6
1994 EV <sub>33</sub>	8.18 ± 0.12	-0.801 ± 0.19	3	7.75 ± 0.11	-0.907 ± 0.18	3	0.14	All6
16684 1994 JQ <sub>1</sub>	7.03 ± 0.14	0.568 ± 0.18	5	6.75 ± 0.11	-0.181 ± 0.17	5	0.14	All6
1994 TB	8.01 ± 0.22	0.132 ± 0.15	9	7.19 ± 0.37	0.247 ± 0.23	7	0.34	All6
1994 VK8	7.83 ± 0.91	-0.174 ± 0.97	3	...	...	...	0.42	All6
1995 HM5	8.31 ± 0.08	0.037 ± 0.08	5	7.89 ± 0.17	-0.032 ± 0.12	4	0.14	All6
1995 QY <sub>9</sub>	8.13 ± 0.53	-0.110 ± 0.53	3	...	...	...	0.60	All6
24835 1995 SM <sub>55</sub>	4.58 ± 0.17	0.137 ± 0.19	7	4.15 ± 0.18	0.177 ± 0.20	7	0.19	All6
26181 1996 GQ <sub>21</sub>	5.07 ± 0.04	0.857 ± 0.12	6	4.46 ± 0.02	0.144 ± 0.05	9	0.14	All6, <b>Ay18</b>
1996 RQ <sub>20</sub>	6.97 ± 0.08	0.56 ± 0.10	4	6.67 ± 0.29	0.269 ± 0.26	4	0.14	All6
1996 RR <sub>20</sub>	6.98 ± 0.18	0.391 ± 0.19	3	6.40 ± 0.17	0.297 ± 0.18	3	0.14	All6
19299 1996 SZ <sub>4</sub>	8.56 ± 0.08	0.306 ± 0.07	4	8.04 ± 0.08	0.308 ± 0.07	3	0.14	All6
1996 TK <sub>66</sub>	7.02 ± 0.20	-0.278 ± 0.22	3	6.52 ± 0.20	-0.499 ± 0.22	3	0.14	All6
15874 1996 TL <sub>66</sub>	5.25 ± 0.09	0.375 ± 0.11	5	4.90 ± 0.10	0.414 ± 0.10	3	0.12	All6
19308 1996 TO <sub>66</sub>	4.81 ± 0.19	0.174 ± 0.23	10	4.31 ± 0.36	0.291 ± 0.38	8	0.14	JL01, Se02, All6, <b>Ay18</b>
15875 1996 TP <sub>66</sub>	7.46 ± 0.08	0.126 ± 0.07	5	6.73 ± 0.13	0.199 ± 0.09	3	0.14	All6
118228 1996 TQ <sub>66</sub>	8.00 ± 0.42	-0.414 ± 0.67	4	...	...	...	0.14	All6
1996 TS <sub>66</sub>	6.53 ± 0.16	0.084 ± 0.21	4	...	...	...	0.14	Da00, JL01, JL98, RT99
33001 1997 CU <sub>29</sub>	6.80 ± 0.07	0.075 ± 0.12	4	6.15 ± 0.07	0.133 ± 0.12	4	0.14	All6
1997 QH <sub>4</sub>	7.21 ± 0.25	0.450 ± 0.22	4	6.27 ± 0.25	0.766 ± 0.22	4	0.14	All6
24952 1997 QJ <sub>4</sub>	7.75 ± 0.11	0.290 ± 0.10	5	7.26 ± 0.11	0.357 ± 0.10	4	0.14	All6
33128 1998 BU <sub>48</sub>	5.71 ± 2.00	0.967 ± 1.12	4	6.26 ± 0.47	0.244 ± 0.26	12	0.68	All6, <b>Ay18</b>
91133 1998 HK <sub>151</sub>	7.33 ± 0.05	0.127 ± 0.08	5	6.87 ± 0.07	0.071 ± 0.10	5	0.14	All6
385194 1998 KG <sub>62</sub>	7.64 ± 0.10	-0.747 ± 0.13	3	7.01 ± 0.10	-0.803 ± 0.13	3	0.14	All6
85633 1998 KR <sub>65</sub>	...	...	...	-1.91 ± 1.43	7.187 ± 1.21	3	0.14	Bo02, TR03
26308 1998 SM <sub>165</sub>	5.93 ± 0.36	0.448 ± 0.37	3	...	...	...	0.14	All6
35671 1998 SN <sub>165</sub>	5.87 ± 0.10	-0.031 ± 0.11	6	5.42 ± 0.12	0.005 ± 0.12	5	0.14	All6
1998 UR <sub>43</sub>	9.04 ± 0.11	-0.763 ± 0.20	3	8.42 ± 0.11	-0.728 ± 0.21	3	0.14	All6
33340 1998 VG <sub>44</sub>	6.60 ± 0.20	0.226 ± 0.15	3	6.13 ± 0.05	0.145 ± 0.05	5	0.10	Se02, All6, <b>Ay18</b>
1999 CD <sub>158</sub>	5.28 ± 0.23	0.092 ± 0.30	3	5.00 ± 0.26	-0.114 ± 0.33	3	0.14	All6
26375 1999 DE <sub>9</sub>	5.11 ± 0.02	0.182 ± 0.03	36	4.55 ± 0.05	0.167 ± 0.04	11	0.10	Se02, All6, <b>Ay18</b>
1999 HS <sub>11</sub>	6.84 ± 0.86	0.227 ± 1.12	3	6.90 ± 0.81	-0.779 ± 1.10	3	0.14	All6
40314 1999 KR <sub>16</sub>	6.31 ± 0.13	-0.124 ± 0.18	4	5.46 ± 0.07	0.091 ± 0.07	15	0.18	All6, <b>Ay18</b>
44594 1999 OX <sub>3</sub>	7.60 ± 0.06	0.108 ± 0.04	14	7.40 ± 0.12	-0.122 ± 0.07	19	0.11	BA03, Th12, All6, <b>Ay18</b>
86047 1999 OY <sub>3</sub>	6.44 ± 0.13	0.272 ± 0.15	3	6.26 ± 0.12	0.075 ± 0.11	5	0.14	All6
1999 RY <sub>215</sub>	...	...	...	6.60 ± 0.10	0.429 ± 0.13	3	0.14	Bo02, Do01, Sn10
47171 1999 TC <sub>36</sub>	5.39 ± 0.02	0.110 ± 0.02	45	4.67 ± 0.03	0.195 ± 0.03	7	0.070	All6
29981 1999 TD <sub>10</sub>	9.09 ± 0.38	0.036 ± 0.11	27	8.45 ± 0.40	0.122 ± 0.15	16	0.650	Ro03, Mu04, All6
121725 1999 XX <sub>143</sub>	9.09 ± 0.27	0.066 ± 0.20	4	8.57 ± 0.24	-0.012 ± 0.19	4	0.14	BA03, All6, <b>Ay18</b>
47932 2000 GN <sub>171</sub>	6.77 ± 0.24	-0.100 ± 0.18	30	6.01 ± 0.35	0.035 ± 0.30	13	0.61	SJ02, Ca12, All6, <b>Ay18</b>
138537 2000 OK <sub>67</sub>	6.63 ± 0.86	0.087 ± 0.65	3	...	...	0	0.14	All6
82075 2000 YW <sub>134</sub>	4.38 ± 0.68	0.373 ± 0.55	3	3.40 ± 0.72	0.832 ± 0.58	3	0.10	All6
63252 2001 BL <sub>41</sub>	11.74 ± 0.12	0.027 ± 0.03	4	11.21 ± 0.13	0.033 ± 0.03	4	0.14	All6, <b>Ay18</b>
150642 2001 CZ <sub>31</sub>	...	...	...	5.54 ± 0.14	0.111 ± 0.16	3	0.21	SJ02
82158 2001 FP <sub>185</sub>	6.40 ± 0.06	0.140 ± 0.04	6	5.87 ± 0.05	0.078 ± 0.04	7	0.06	All6, <b>Ay18</b>
82155 2001 FZ <sub>173</sub>	6.12 ± 0.08	0.339 ± 0.08	4	5.62 ± 0.09	0.253 ± 0.10	6	0.06	SJ02, All6, <b>Ay18</b>
2001 KA <sub>77</sub>	5.64 ± 0.09	0.130 ± 0.11	3	4.89 ± 0.09	0.206 ± 0.16	3	0.14	All6
2001 KD <sub>77</sub>	6.52 ± 0.07	-0.005 ± 0.06	4	5.71 ± 0.06	0.111 ± 0.05	4	0.07	All6
2001 QC <sub>298</sub>	...	...	...	6.06 ± 0.10	0.331 ± 0.1	3	0.14	Sn10, SS09, <b>Ay18</b>
2001 QY <sub>297</sub>	...	...	...	5.50 ± 0.24	-0.295 ± 0.2	7	0.49	Th12, <b>Ay18</b>
42301 2001 UR <sub>163</sub>	4.52 ± 0.06	0.363 ± 0.11	3	3.65 ± 0.06	0.404 ± 0.11	3	0.08	All6
55565 2002 AW <sub>197</sub>	3.65 ± 0.02	0.077 ± 0.03	38	3.02 ± 0.04	0.151 ± 0.06	4	0.04	All6
2002 GH <sub>32</sub>	-2.35 ± 0.72	11.37 ± 0.94	4	1.44 ± 0.77	5.812 ± 1.00	4	0.14	All6
2002 GP <sub>32</sub>	7.13 ± 0.02	-0.134 ± 0.03	4	6.53 ± 0.02	0.292 ± 0.02	4	0.03	All6
95626 2002 GZ <sub>32</sub>	7.38 ± 0.12	0.072 ± 0.05	30	6.88 ± 0.15	0.106 ± 0.06	5	0.15	All6
2002 KW <sub>14</sub>	...	...	...	6.34 ± 0.40	-1.420 ± 0.37	5	0.25	Th12, <b>Ay18</b>
119951 2002 KX <sub>14</sub>	4.83 ± 0.03	0.277 ± 0.03	21	4.14 ± 0.04	0.468 ± 0.06	5	0.05	Re13 All6
250112 2002 KY <sub>14</sub>	11.80 ± 0.76	-0.273 ± 0.19	4	12.28 ± 0.62	-0.593 ± 0.16	4	0.13	All6
2002 PN <sub>34</sub>	8.61 ± 0.05	0.089 ± 0.02	57	...	...	...	0.18	All6

Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas

Object	$H_V$	$\beta_V$ [mag por grau]	$N_V$	$H_R$	$\beta_R$ [mag por grau]	$N_R$	$\Delta m$	Ref.
55637 2002 UX <sub>25</sub>	3.90 ± 0.04	0.104 ± 0.05	46	3.34 ± 0.05	0.176 ± 0.06	17	0.21	All6, <b>Ay18</b>
55638 2002 VE <sub>95</sub>	5.81 ± 0.03	0.088 ± 0.02	43	4.89 ± 0.06	0.487 ± 0.07	4	0.08	All6
127546 2002 XU <sub>93</sub>	7.03 ± 0.40	0.496 ± 0.17	5	7.60 ± 0.41	0.125 ± 0.17	5	0.14	All6
208996 2003 AZ <sub>84</sub>	3.77 ± 0.11	0.074 ± 0.11	5	3.49 ± 0.11	-0.151 ± 0.13	5	0.14	All6
120061 2003 CO <sub>1</sub>	9.14 ± 0.05	0.092 ± 0.01	5	8.70 ± 0.05	0.084 ± 0.01	5	0.07	All6
133067 2003 FB <sub>128</sub>	6.92 ± 0.60	0.422 ± 0.53	3	7.61 ± 0.60	-0.519 ± 0.52	3	0.14	All6
2003 FE <sub>128</sub>	7.38 ± 0.34	-0.348 ± 0.29	5	6.08 ± 0.36	0.274 ± 0.32	5	0.14	All6
120132 2003 FY <sub>128</sub>	4.63 ± 0.18	0.534 ± 0.14	7	3.61 ± 0.16	0.983 ± 0.11	6	0.15	All6
385437 2003 GH <sub>55</sub>	7.31 ± 0.44	-0.878 ± 0.46	3	5.88 ± 0.44	-0.034 ± 0.46	3	0.14	All6
120178 2003 OP <sub>32</sub>	4.05 ± 0.21	0.056 ± 0.19	10	3.73 ± 0.17	-0.033 ± 0.16	9	0.18	All6
2003 QW <sub>90</sub>	6.35 ± 0.45	-1.137 ± 0.51	3	...	...	...	0.14	All6
2003 UY <sub>117</sub>	...	...	...	5.60 ± 0.10	0.280 ± 0.11	3	0.14	All6
416400 2003 UZ <sub>117</sub>	5.23 ± 0.10	0.133 ± 0.10	5	4.81 ± 0.11	0.209 ± 0.09	4	0.14	All6
2003 UZ <sub>413</sub>	4.36 ± 0.17	0.143 ± 0.22	3	3.99 ± 0.16	0.044 ± 0.22	3	0.14	All6
136204 2003 WL <sub>7</sub>	8.89 ± 0.14	0.088 ± 0.04	4	6.91 ± 0.14	0.588 ± 0.04	3	0.05	All6
120216 2004 EW <sub>95</sub>	6.57 ± 0.13	0.080 ± 0.09	5	6.10 ± 0.13	0.135 ± 0.09	5	0.14	All6
90568 2004 GV <sub>9</sub>	3.41 ± 0.35	1.350 ± 0.54	4	1.84 ± 0.40	2.939 ± 0.58	4	0.160	Th12, Pe13, TW
2004 NT <sub>33</sub>	5.06 ± 0.17	-0.155 ± 0.14	3	2.99 ± 0.07	1.218 ± 0.07	6	0.040	All6
307982 2004 PG <sub>115</sub>	4.95 ± 0.45	0.445 ± 0.34	8	4.56 ± 0.17	0.243 ± 0.14	9	0.14	All6, <b>Ay18</b>
2004 PT <sub>107</sub>	...	...	...	6.33 ± 1.02	-0.347 ± 0.76	3	0.14	All6
2004 TY <sub>364</sub>	4.51 ± 0.13	0.145 ± 0.10	32	...	...	...	0.22	All6
144897 2004 UX <sub>10</sub>	4.82 ± 0.09	0.060 ± 0.10	8	4.26 ± 0.07	0.062 ± 0.07	8	0.08	All6
230965 2004 XA <sub>192</sub>	5.05 ± 0.08	-0.174 ± 0.07	5	3.31 ± 0.09	0.620 ± 0.07	6	0.07	All6, <b>Ay18</b>
2005 GE <sub>187</sub>	...	...	...	7.13 ± 0.18	0.065 ± 0.13	3	0.14	Ca12, <b>Ay18</b>
2005 QU <sub>182</sub>	3.85 ± 0.06	0.277 ± 0.10	5	3.23 ± 0.06	0.336 ± 0.10	5	0.12	All6
2005 RM <sub>43</sub>	4.70 ± 0.08	-0.027 ± 0.06	6	4.44 ± 0.08	-0.098 ± 0.06	5	0.04	All6
2005 RN <sub>43</sub>	3.88 ± 0.05	0.139 ± 0.04	11	3.30 ± 0.03	0.133 ± 0.03	10	0.06	Re13, All6, <b>Ay18</b>
2005 RR <sub>43</sub>	4.25 ± 0.06	-0.003 ± 0.06	5	3.75 ± 0.06	0.160 ± 0.06	4	0.06	Re13, All6
2005 TB <sub>190</sub>	4.67 ± 0.08	0.051 ± 0.10	8	4.12 ± 0.08	-0.001 ± 0.11	12	0.12	All6, <b>Ay18</b>
2005 UQ <sub>513</sub>	4.09 ± 0.14	-0.130 ± 0.14	3	3.58 ± 0.13	-0.174 ± 0.13	4	0.06	Sn10, All6*, <b>Ay18</b>
2007 OC <sub>10</sub>	5.70 ± 0.32	-0.115 ± 0.32	4	4.98 ± 0.32	0.042 ± 0.32	4	0.14	All6, <b>Ay18</b>
2007 OR <sub>10</sub>	2.31 ± 0.13	0.255 ± 0.34	7	1.38 ± 0.14	0.590 ± 0.43	4	0.09	All6
2008 FC <sub>76</sub>	9.48 ± 0.26	0.101 ± 0.05	3	8.77 ± 0.26	0.110 ± 0.05	4	0.14	All6
2008 OG <sub>19</sub>	...	...	...	6.46 ± 0.19	-1.787 ± 0.17	4	0.14	<b>Ay18</b>
2008 YB <sub>3</sub>	11.0 ± 0.70	-0.112 ± 0.09	4	8.22 ± 0.81	0.183 ± 0.10	4	0.200	All6, <b>Ay18</b>
2013 AZ <sub>60</sub>	10.4 ± 0.19	0.030 ± 0.03	3	9.43 ± 0.19	0.164 ± 0.03	3	0.14	All6
55576 Amycus	8.07 ± 0.16	0.127 ± 0.05	5	7.41 ± 0.13	0.113 ± 0.04	5	0.16	BA03, All6, <b>Ay18</b>
8405 Asbolus	9.06 ± 0.13	0.072 ± 0.03	43	8.41 ± 0.21	0.155 ± 0.06	6	0.55	BA03, All6, <b>Ay18</b>
54598 Bienor	7.59 ± 0.45	0.188 ± 0.19	59	7.06 ± 0.58	0.267 ± 0.24	5	0.75	BA03, All6, <b>Ay18</b>
Borasisi	6.03 ± 0.03	0.23 ± 0.06	3	...	...	...	0.05	BA03, All6, <b>Ay18</b>
65489 Ceto	6.57 ± 0.12	0.195 ± 0.09	9	5.98 ± 0.12	0.209 ± 0.09	10	0.13	All6, <b>Ay18</b>
19521 Chaos	4.98 ± 0.06	0.102 ± 0.07	6	4.36 ± 0.04	0.254 ± 0.06	7	0.10	SJ02, All6, <b>Ay18</b>
10199 Chariklo	6.94 ± 0.05	0.049 ± 0.01	21	6.42 ± 0.04	0.021 ± 0.01	35	0.10	Ga16, BA03, All6, <b>Ay18</b>
2060 Chiron	7.11 ± 0.08	-0.410 ± 0.03	8	6.04 ± 0.02	0.080 ± 0.00	54	0.09	Ga16, BA03, All6, <b>Ay18</b>
83982 Crantor	9.09 ± 0.40	0.109 ± 0.14	6	8.47 ± 0.28	0.074 ± 0.10	5	0.34	BA03, All6, <b>Ay18</b>
52975 Cyllarus	9.06 ± 0.10	0.171 ± 0.06	6	8.29 ± 0.10	0.218 ± 0.06	6	0.14	BA03, All6, <b>Ay18</b>
60558 Echeclus	9.86 ± 0.14	0.056 ± 0.05	11	9.30 ± 0.14	0.076 ± 0.05	13	0.24	BA03, Ro05, <b>Ay18</b>
31824 Elatus	10.46 ± 0.14	0.088 ± 0.02	13	9.93 ± 0.16	0.059 ± 0.03	16	0.24	BA02, All6, <b>Ay18</b>
136199 Eris	-1.12 ± 0.02	0.135 ± 0.05	76	-1.22 ± 0.18	-0.516 ± 0.36	9	0.10	DM09, Ra07, Ca06, All6, <b>Ay18</b>
136108 Haumea	0.43 ± 0.07	0.101 ± 0.09	90	0.26 ± 0.48	-0.095 ± 0.52	5	0.29	Ra06, All6
38628 Huya	5.55 ± 0.04	-0.152 ± 0.03	45	4.52 ± 0.02	0.078 ± 0.01	104	0.10	BA03, Bo04, Ga16, SJ02, All6
10370 Hylonome	9.57 ± 0.02	0.079 ± 0.01	6	8.98 ± 0.04	0.173 ± 0.02	5	0.04	RT99, BA03
28978 Ixion	3.84 ± 0.03	0.138 ± 0.03	41	3.25 ± 0.04	0.144 ± 0.04	3	0.05	Bo04, All6
58534 Logos	7.41 ± 0.10	0.055 ± 0.08	5	6.72 ± 0.10	0.052 ± 0.09	4	0.14	All6
136472 Makemake	0.00 ± 0.01	0.206 ± 0.01	53	0.56 ± 0.07	-1.155 ± 0.09	6	0.03	All6
52872 Okyrhoe	11.40 ± 0.05	-0.013 ± 0.01	7	10.83 ± 0.05	0.020 ± 0.01	12	0.07	BA03, All6, <b>Ay18</b>
90482 Orcus	2.27 ± 0.02	0.159 ± 0.02	30	1.87 ± 0.03	0.216 ± 0.04	4	0.04	All6
49036 Pelion	10.89 ± 0.08	-0.064 ± 0.04	5	10.35 ± 0.07	-0.029 ± 0.04	6	0.14	BA03, All6
5145 Pholus	7.46 ± 0.31	0.152 ± 0.15	10	6.80 ± 0.29	0.111 ± 0.13	16	0.60	BA03, All6, <b>Ay18</b>

Tabela 5.9 – Magnitudes absolutas

Object	$H_V$	$\beta_V$ [mag por grau]	$N_V$	$H_R$	$\beta_R$ [mag por grau]	$N_R$	$\Delta m$	Ref.
50000 Quaoar	$2.77 \pm 0.25$	$0.116 \pm 0.22$	45	$2.19 \pm 0.23$	$0.047 \pm 0.24$	8	0.30	Ba06,Al16
120347 Salacia	$3.51 \pm 0.06$	$0.665 \pm 0.04$	9	$3.89 \pm 0.03$	$-0.153 \pm 0.04$	10	0.03	Al16, <b>Ay18</b>
90377 Sedna	$1.56 \pm 0.01$	$0.640 \pm 0.04$	9	$1.04 \pm 0.00$	$0.166 \pm 0.00$	157	0.02	Ra07,Pe10,Al16
79360 Sila-Nunam	$5.57 \pm 0.22$	$0.095 \pm 0.20$	6	$4.91 \pm 0.16$	$0.132 \pm 0.20$	5	0.22	SJ02,Al16
32532 Thereus	$9.44 \pm 0.12$	$0.063 \pm 0.02$	69	$9.00 \pm 0.30$	$0.055 \pm 0.05$	17	0.34	Je15,BA03,Al16
42355 Typhon	$7.66 \pm 0.02$	$0.128 \pm 0.01$	22	$7.12 \pm 0.11$	$0.138 \pm 0.04$	5	0.07	Al16
174567 Varda	$3.97 \pm 0.04$	$-0.441 \pm 0.06$	10	$3.24 \pm 0.04$	$-0.024 \pm 0.06$	10	0.06	Al16, <b>Ay18</b>
20000 Varuna	$3.96 \pm 0.23$	$0.103 \pm 0.24$	30	$3.29 \pm 0.21$	$0.171 \pm 0.27$	20	0.50	Hi05,Be06, Al16

Tabela 5.10 – TW = This work, Al16 = Alvarez-Candal et al. (2016), Ba00 = Barucci et al. (2000), Bo01 = Boehnhardt et al. (2001), Bo02 = Boehnhardt et al. (2002), Bo04 = Boehnhardt et al. (2004), Ca06 = Carry et al. (2012), Ca12 = Carry et al. (2012), DM09 = Carraro et al. (2006), Do01 = Delsanti et al. (2001), Ga16 = Galiazzo et al. (2016), GH01 = Gil-Hutton et al. (2001), Hi05 = Hicks et al. (2005), Je15 = Jewitt et al. (2015), JL01 = Jewitt et al. (2001), Mu04 = Mueller et al. (2004), Px04 = Peixinho et al. (2004), Pe13 = Perna et al. (2013), Ra07 = Rabinowitz et al. (2007), Ro05 = Rousselot et al. (2005), Se02 = Sekiguchi et al. (2002), SJ02 = Sheppard et al. (2002), Sn10 = Snodgrass et al. (2010), SS09 = Santos-Sanz et al. (2009), Th12 = Thirouin et al. (2012), TR03 = Tegler & Romanishin (2003).

Tabela 5.11 – Nas colunas se indica: nome dos TNOs [1], cores absolutas  $H_V - H_R$  [2], coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta$  [3], erros com otimização em precisão entre parênteses, número de pontos de dados usados  $V$  [4] e  $R$  [5], o valor  $\Delta m$  usado [6]. As bandeiras 1 e 0 [7] indicam se o valor é uma mediana calculada por nós ou um valor tomado da literatura, respectivamente.

Objetos	$H_V - H_R$ (erro)	$\Delta\beta$ (erro) [mag por deg]	$N_V$	$N_R$	$\Delta m$	bandeira	Objetos	$H_V - H_R$	$\Delta\beta$ [mag por grau]	$N_V$	$N_R$	$\Delta m$	bandeira
1993 FW	0.368 (0.124)	0.269 (0.111)	4	5	0.10	1	2003 GH <sub>55</sub>	1.439 (0.340)	-0.846 (0.353)	3	3	0.15	1
1993 RO	0.399 (0.110)	0.197 (0.172)	5	6	0.34	1	2003 OP <sub>32</sub>	0.324 (0.205)	0.091 (0.186)	10	11	0.26	0
1993 SB	0.294 (0.148)	0.066 (0.118)	5	4	0.15	1	2003 UY <sub>117</sub>	0.532 (0.062)	-1.054 (0.082)	3	3	0.12	1
1993 SC	0.661 (0.015)	0.045 (0.012)	9	7	0.04	0	2003 UZ <sub>117</sub>	0.421 (0.066)	-0.075 (0.060)	6	4	0.12	1
1994 EV <sub>3</sub>	0.559 (0.107)	-0.052 (0.158)	4	5	0.15	1	2003 UZ <sub>413</sub>	0.365 (0.086)	0.100 (0.112)	3	3	0.10	1
1994 JQ <sub>1</sub>	0.280 (0.066)	0.751 (0.089)	5	5	0.10	1	2003 WL <sub>7</sub>	1.966 (0.106)	-0.491 (0.037)	5	3	0.05	0
1994 TB	0.791 (0.222)	-0.073 (0.144)	10	8	0.34	0	2004 EW <sub>95</sub>	0.457 (0.064)	-0.043 (0.042)	7	7	0.10	1
1995 HM <sub>5</sub>	0.418 (0.103)	0.069 (0.083)	5	4	0.15	1	2004 NT <sub>33</sub>	2.069 (0.095)	-1.375 (0.083)	3	6	0.04	0
1995 QY <sub>9</sub>	1.625 (0.757)	-0.670 (0.492)	4	3	0.60	0	2004 PG <sub>115</sub>	0.385 (0.174)	0.204 (0.133)	8	8	0.10	1
1995 SM <sub>55</sub>	0.424 (0.128)	-0.038 (0.142)	8	7	0.19	0	2004 UX <sub>10</sub>	0.557 (0.060)	-0.002 (0.064)	8	8	0.08	0
1996 GQ <sub>21</sub>	0.613 (0.030)	0.534 (0.103)	7	9	0.10	0	2004 XA <sub>192</sub>	1.742 (0.065)	-0.794 (0.053)	5	6	0.07	0
1996 RQ <sub>20</sub>	0.304 (0.108)	0.297 (0.106)	4	4	0.10	1	2005 QU <sub>182</sub>	0.616 (0.048)	-0.059 (0.073)	5	5	0.12	0
1996 RR <sub>20</sub>	0.576 (0.089)	0.094 (0.095)	3	3	0.10	1	2005 RM <sub>43</sub>	0.263 (0.057)	0.069 (0.045)	6	5	0.04	0
1996 SZ <sub>4</sub>	0.518 (0.153)	-0.001 (0.128)	4	3	0.34	1	2005 RN <sub>43</sub>	0.575 (0.032)	0.006 (0.027)	11	10	0.06	0
1996 TK <sub>66</sub>	0.505 (0.101)	0.219 (0.115)	3	3	0.10	1	2005 RR <sub>43</sub>	0.495 (0.047)	-0.164 (0.048)	5	4	0.06	0
1996 TL <sub>66</sub>	0.355 (0.072)	-0.041 (0.078)	5	3	0.12	0	2005 TB <sub>190</sub>	0.553 (0.059)	0.054 (0.079)	8	12	0.12	0
1996 TO <sub>66</sub>	0.436 (0.181)	-0.050 (0.202)	10	9	0.33	0	2005 UJ <sub>438</sub>	-0.903 (0.360)	0.241 (0.058)	5	5	0.13	0
1996 TP <sub>66</sub>	0.732 (0.078)	-0.073 (0.060)	5	3	0.12	0	2005 UQ <sub>513</sub>	0.508 (0.102)	0.045 (0.099)	3	4	0.06	0
1996 TS <sub>66</sub>	0.724 (0.120)	-0.062 (0.160)	4	5	0.16	0	2007 OC <sub>10</sub>	0.719 (0.198)	-0.153 (0.196)	4	4	0.12	1
1997 CU <sub>29</sub>	0.658 (0.036)	-0.058 (0.063)	4	4	0.10	1	2007 OR <sub>10</sub>	0.929 (0.099)	-0.327 (0.276)	7	4	0.09	0
1997 QH <sub>4</sub>	0.937 (0.128)	-0.316 (0.114)	4	4	0.10	1	2007 RW <sub>10</sub>	0.975 (1.385)	-0.301 (0.729)	3	3	0.34	1
1997 QJ <sub>4</sub>	0.489 (0.087)	-0.069 (0.077)	5	4	0.15	1	2008 FC <sub>76</sub>	1.051 (0.251)	-0.075 (0.053)	4	4	0.24	1
1998 BU <sub>48</sub>	-0.556 (1.031)	0.726 (0.580)	4	12	0.68	0	2008 YB <sub>3</sub>	2.710 (0.489)	-0.273 (0.065)	5	4	0.20	0
1998 HK <sub>151</sub>	0.462 (0.048)	0.055 (0.068)	5	5	0.15	0	2013 AZ <sub>60</sub>	1.022 (0.234)	-0.134 (0.041)	3	3	0.24	1
1998 KG <sub>62</sub>	0.628 (0.081)	0.056 (0.102)	3	3	0.15	1	Albion	0.969 (0.098)	-0.288 (0.100)	4	7	0.15	1
1998 SN <sub>165</sub>	0.449 (0.068)	-0.032 (0.074)	6	7	0.16	0	Amycus	0.686 (0.087)	0.007 (0.031)	6	5	0.16	0
1998 UR <sub>43</sub>	0.621 (0.196)	-0.036 (0.362)	3	3	0.34	1	Aphidas	0.512 (0.446)	0.080 (0.345)	4	4	0.34	1
1998 VG <sub>44</sub>	0.474 (0.049)	0.076 (0.044)	4	5	0.10	0	Asbolus	0.647 (0.129)	-0.083 (0.037)	43	6	0.55	0
1999 CD <sub>158</sub>	0.281 (0.151)	0.209 (0.194)	3	3	0.12	1	Bienor	0.528 (0.369)	-0.079 (0.155)	59	5	0.75	0
1999 DE <sub>9</sub>	0.567 (0.029)	0.015 (0.026)	36	11	0.10	0	Ceto	0.588 (0.090)	-0.014 (0.069)	9	10	0.13	0
1999 HS <sub>11</sub>	-0.053 (0.424)	1.004 (0.562)	3	3	0.10	1	Chaos	0.612 (0.039)	-0.103 (0.045)	6	9	0.10	0
1999 KR <sub>16</sub>	0.855 (0.080)	-0.217 (0.098)	4	15	0.18	0	Chariklo	0.511 (0.036)	0.028 (0.013)	21	35	0.10	0
1999 OX <sub>3</sub>	0.206 (0.070)	0.231 (0.042)	14	19	0.11	0	Chiron	0.743 (0.037)	-0.247 (0.011)	11	58	0.088	0
1999 OY <sub>3</sub>	0.176 (0.064)	0.197 (0.070)	3	4	0.10	1	Crantor	0.623 (0.246)	0.036 (0.091)	6	5	0.34	0
1999 TD <sub>10</sub>	0.634 (0.282)	-0.084 (0.097)	27	16	0.65	0	Cyllarus	0.775 (0.178)	-0.047 (0.107)	6	6	0.34	1
2000 GN <sub>171</sub>	0.628 (0.206)	-0.057 (0.176)	31	13	0.61	0	Echeclus	0.428 (0.103)	0.049 (0.050)	13	15	0.24	0
2000 OK <sub>67</sub>	1.021 (0.202)	-0.324 (0.161)	4	3	0.10	1	Elatos	0.528 (0.109)	0.029 (0.023)	13	16	0.24	0
2000 YW <sub>134</sub>	0.978 (0.499)	-0.457 (0.400)	3	3	0.10	0	Eris	0.270 (0.042)	0.325 (0.091)	78	12	0.10	0
2001 BL <sub>41</sub>	0.530 (0.085)	-0.006 (0.021)	4	4	0.13	1	Haumea	0.168 (0.244)	0.194 (0.266)	90	5	0.29	0
2001 FP <sub>185</sub>	0.539 (0.041)	0.063 (0.033)	6	7	0.06	0	Huya	1.031 (0.025)	-0.231 (0.018)	45	104	0.10	0
2001 FZ <sub>173</sub>	0.498 (0.067)	0.086 (0.070)	4	6	0.06	0	Hylonomes	0.622 (0.016)	-0.106 (0.008)	7	6	0.04	0
2001 KA <sub>77</sub>	0.748 (0.058)	-0.076 (0.088)	3	3	0.12	1	Ixion	0.587 (0.028)	-0.006 (0.029)	41	3	0.05	0
2001 KD <sub>77</sub>	0.814 (0.048)	-0.117 (0.043)	4	4	0.07	0	Lempo	0.721 (0.024)	-0.084 (0.022)	45	7	0.07	0
2001 QF <sub>298</sub>	0.390 (0.138)	-0.016 (0.135)	4	4	0.12	0	Logos	0.682 (0.078)	0.003 (0.069)	5	4	0.15	1
2001 QY <sub>297</sub>	-0.125 (0.227)	0.695 (0.258)	3	8	0.49	0	Makemake	-0.315 (0.027)	1.014 (0.034)	54	7	0.03	0
2001 UR <sub>163</sub>	0.871 (0.045)	-0.041 (0.083)	3	3	0.08	0	Nessus	0.766 (0.247)	0.009 (0.073)	5	5	0.50	0
2002 AW <sub>197</sub>	0.613 (0.023)	-0.033 (0.034)	39	4	0.04	0	Okyrhoe	0.568 (0.040)	-0.034 (0.012)	7	12	0.07	0
2002 GP <sub>32</sub>	0.601 (0.019)	-0.426 (0.023)	4	4	0.03	0	Orcus	0.410 (0.020)	-0.068 (0.027)	31	4	0.04	0
2002 GZ <sub>32</sub>	0.504 (0.097)	-0.034 (0.045)	30	5	0.15	0	Pelion	0.547 (0.050)	-0.036 (0.028)	5	6	0.13	1
2002 KX <sub>14</sub>	0.685 (0.022)	-0.181 (0.032)	23	7	0.05	0	Pholus	0.650 (0.207)	0.051 (0.082)	11	18	0.60	0
2002 KY <sub>14</sub>	-1.687 (0.330)	0.641 (0.085)	5	4	0.13	0	Quaoar	0.579 (0.173)	0.070 (0.165)	45	8	0.30	0
2002 UX <sub>25</sub>	0.583 (0.036)	-0.055 (0.044)	47	17	0.21	0	Salacia	-0.383 (0.073)	0.818 (0.066)	9	10	0.06	0
2002 VE <sub>95</sub>	0.917 (0.036)	-0.404 (0.039)	45	4	0.08	0	Sedna	0.595 (0.009)	0.490 (0.025)	10	170	0.02	0
2002 XU <sub>93</sub>	-0.575 (0.207)	0.373 (0.089)	5	5	0.10	1	Sila-Numam	0.660 (0.139)	-0.039 (0.145)	6	5	0.22	0
2003 AZ <sub>84</sub>	0.336 (0.079)	0.187 (0.088)	6	5	0.14	0	Thereus	0.443 (0.164)	0.008 (0.032)	69	17	0.34	0
2003 CO <sub>1</sub>	0.442 (0.039)	0.007 (0.010)	5	5	0.07	0	Typhon	0.549 (0.058)	-0.010 (0.024)	22	5	0.07	0
2003 FB <sub>12</sub>	-0.686 (0.305)	0.939 (0.267)	3	3	0.10	1	Varda	0.516 (0.037)	-0.035 (0.055)	11	10	0.06	0
2003 FE <sub>12</sub>	1.294 (0.270)	-0.623 (0.236)	5	5	0.15	1	Varuna	0.669 (0.161)	-0.071 (0.184)	30	20	0.50	0
2003 FY <sub>12</sub>	1.351 (0.094)	-0.732 (0.073)	8	6	0.15	0							





## 6 Discussão e conclusões

Neste trabalho apresentamos estudos fotométricos de TNOs realizados a partir dos dados obtidos por um levantamento iniciado em 2012 e complementado com mais observações e dados da literatura. A base de dados contém mais de 2400 dados de magnitudes  $M(r, \Delta, \alpha)$  nos filtros  $V$  e  $R$  de TNOs, além das informações sobre as condições de observação como: distância heliocêntrica  $r$ , distância geocêntrica  $\Delta$  e ângulo de fase  $\alpha$ . Essas informações foram usadas para calcular magnitudes reduzidas  $M(1, 1, \alpha)$  que por sua vez foram utilizadas para criar curvas de fase e calcular magnitudes absolutas  $H_\lambda$  e coeficientes de fase  $\beta_\lambda$ . Nossos cálculos são livres de qualquer efeito relativo a fase, como é descrito em [Alvarez-Candal et al. \(2016, paper1\)](#) onde foram apresentados os primeiros resultados para magnitudes absolutas no filtro  $V$ .

Nesta tese apresentamos 45 novas magnitudes reduzidas  $M(1, 1, \alpha)$ , nos filtros  $V$  e  $R$ , que conjuntamente com o resto de dados foram usadas para criar curvas de fase e calcular  $H_V$  e  $H_R$  e  $\beta_V$  e  $\beta_R$  usando o mesmo procedimento apresentado no paper1. Calculamos  $H_V - H_R$  e o que definimos como coeficientes de fase relativos  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$  para mais de 100 TNOs. Procuramos por correlações dos parâmetros calculados e os parâmetros orbitais e físicos reportados em bases de dados públicas de “astorb” e “TNOs are cool” respectivamente.

### 6.1 Análise da correlação $H_V - H_R$ e $\Delta\beta$

Apresentamos uma análise de  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$ , de um grupo de 114 objetos que inclui centauros e TNOs. Encontramos que estes parâmetros estão correlacionados. A correlação indica que os TNOs com cores azuis apresentam  $\Delta\beta$  com valores positivos e os TNOs com cores vermelhas apresentam valores negativos. A correlação indica também que para os TNOs com cores  $H_V - H_R \approx 0.36$  o  $\Delta\beta$  tende a valores negativos.

A correlação tem significância estatística para todos os grupos dinâmicos, para todos os tamanhos e composições. Por outro lado, a temperatura da superfície não parece ser um fator determinante. Sugerimos que a correlação depende da porosidade e compactação da superfície porque o fluxo emitido de um objeto depende da sua propagação através da superfície planetária. Isto é, a quantidade de radiação incidente que é espalhada e/ou emitida pela superfície depende diretamente das propriedades dos dispersores (tamanho, estrutura e distribuição). Nos observamos que as curvas de fase tem comportamentos diferentes para diferentes comprimentos de onda no mesmo intervalo de ângulos de fase. Assim, o  $\Delta\beta$  indica variações entre as componentes da luz espalhada a diferentes comprimentos de onda tendo informações implícitas sobre a microestrutura.

Com objetivo de confirmar a suposição acima, usamos o modelo apresentado por [Lumme & Bowell \(1981\)](#) que descreve as curvas de fase a partir do parâmetro  $Q$ , o qual depende da textura superficial do objeto. Usamos a aproximação apresentada pelo modelo para comparação da teoria com as observações e estimamos albedos geométricos  $p_V$  e  $p_R$  a partir da relação de cores absolutas e o albedo geométrico de maneira que  $10^{(H_V - H_R)/5} \propto (p_V/p_R)^{0.5}$ . As magnitudes de

nossa amostra são usados para estimar os albedos geométricos que, por sua vez, são usados para reproduzir as curvas de fase com o modelo, visando verificar se o fator de espalhamento relativo as curvas calculadas com o modelo teórico mostra alguma indicação do efeito de sombreamento entre os filtros. Encontramos que a maioria dos nossos resultados observacionais não são reproduzidos pelo modelo. As curvas de fase observacionais atingem intervalos de ângulos de fase dentro do que é considerado como a região do efeito de oposição que, como mencionado no capítulo 3, é explicado pelos fenômenos de ocultação de sombras e retrodispersão coerente da luz. Ambos efeitos contribuem para o aumento da magnitude em oposição e para cada um correspondem diferentes larguras angulares e diferentes dependências de comprimento de onda (vide sect 8.H. em [Hapke \(1993\)](#)).

De acordo com a teoria de transferência radiativa para superfícies de objetos sem atmosfera de [Hapke \(1993\)](#) a largura do OE tem uma dependência com o comprimento de onda: quanto maior o comprimento de onda, maior é a largura do OE. A correlação  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$  indica que os objetos mais vermelhos tem curvas de fase mais íngremes no filtro  $R$  do que no filtro  $V$ . Assumindo que as inclinações das curvas de fase são relativas à largura do OE, por isso inclinações mais prominentes implicam larguras mais estreitas. Vale ressaltar de que OE é mais largo no filtro  $V$  do que no filtro  $R$  para os objetos vermelhos. comportamento oposto ao esperado para dispersão múltipla. Isso implica que o CBL não seria o fenômeno dominante na dispersão dos TNOs. Isto coincide com o resultado indicado na Fig. 5.21 (capítulo 5), onde é possível observar que o fator de dispersão múltipla não cobre todo o espaço fase dos resultados obtidos a partir de nossas observações.

[Bagnulo et al. \(2008\)](#) mostrou que os TNOs apresentam dois comportamentos polarimétricos diferentes, o que esta em desacordo com o cenário do CBL. O OE também poderia estar relacionado com à paridade do campo elétrico dentro dos das partículas refletoras que apresentam um efeito similar ao OE produzido pelo espalhamento múltiplo ([Muinonen et al., 2007](#)).

Ao respeito da compactação das superfícies [Hapke \(1963\)](#) indicou que superfícies menos compactas têm curvas de fase mais abruptas. Assim, os objetos mais vermelhos mostram compactações diferentes em comprimentos de onda diferentes: são mais compactos no filtro  $V$  do que no filtro  $R$ . Para objetos mais neutros a compactação é similar. Portanto, a correlação entre  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  aponta para grandes espaçamentos entre os difusores na superfície, o qual pode ser válido para TNOs como foi sugerido para o caso do objeto Eris por [Belskaya et al. \(2008\)](#).

Desde que exista uma relação entre a distância dos difusores  $d$ , e o ângulo de fase onde ocorre o mínimo da curva de polarização ( $\alpha_{min}$ ), é possível inferir o valor de  $d$  como mostrado por [Gil-Hutton & García-Migani \(2017\)](#). Uma possível continuação deste estudo consistiria em combinar os dados fotométricos com dados polarimétricos. Entretanto, o trabalho mencionado acima foi realizado com asteroides do cinturão principal, que são mais brilhantes e atingem intervalos de ângulos de fase maiores do que os TNOs. O principal inconveniente é que o método de curvas de fase polarimétricas precisa de observações a ângulos maiores do que  $5^\circ$ . Uma possibilidade seria estudar objetos que são mais brilhantes e que estão relacionados à população dos TNOs como os cometas da família de Júpiter, troianos e centauros.

### 6.1.1 Os coeficientes de fase

Os coeficientes de fase  $\beta_\lambda$  apresentam distribuições unimodais em ambos os filtros com uma grande concentração ao redor da média. Por outro lado, os coeficientes cobrem um intervalo muito amplo de valores pelo qual sugerimos extremo cuidado no caso de adotar um valor médio. Observamos objetos que apresentam curvas de fase negativas em um ou ambos filtros, o que pode ser atribuído a a subestimação da amplitude de rotação  $\Delta m$ , como mencionamos na secção 5.1 já que não temos estimações desse parâmetro para todos os TNOs da nossa amostra.

Inicialmente nós atribuímos um valor médio a partir dos valores que encontramos na literatura. Em uma segunda análise melhoramos a precisão de  $\Delta m$  para os TNOs sem curvas de luz. Foram estimados valores médios a partir de intervalos da ordem de 1,0 mag e alocamos um valor de acordo ao que corresponde para  $H$  inicialmente calculada do cada TNO.

Uma curva de luz com baixa amplitude é dominada pelo albedo, enquanto que as grandes amplitudes  $\Delta m \lesssim 0.12$  são dominadas pela forma [Duffard et al. \(2014\)](#); [Thirouin et al. \(2014\)](#). A maioria dos objetos apresentam  $\Delta m < 0.12$  pelo qual podemos sugerir que para nossa amostra de TNOs as variações das curvas de luz se devem principalmente à variações do albedo. Sendo que em cada intervalo (bin) existe uma grande variação em  $\Delta m$ , escolhemos a mediana por ser menos sensível a valores extremos. O objeto apresentar uma forma ou estruturas que fazem ele refletir de maneira anisotrópica, como é o caso da presença de anéis de material ao redor do TNO, ou variações esporádicas da magnitude devidas à processos endógenos.

Mostramos que as distribuições de  $\beta_\lambda$  são unimodais e melhoramos a estimação dos erros mediante a adoção de um valor médio, conforme mencionado acima, o que nos permitiu atingir maior precisão. No entanto para adotar um valor médio do  $\Delta m$  é necessário considerar o efeito do número de objetos na amostra e as diferenças na ordem das  $\Delta m$  de cada bin. Isto implica que precisamos incrementar o número de objetos com  $\Delta m$  conhecida.

### 6.1.2 Análise de $\Delta m$ de grupos por diâmetro

Com objetivo de procurar por fenômenos físicos que expliquem a correlação  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$  realizamos testes, desta vez separando a amostra em subgrupos de objetos com base em seu diâmetro. Foi sugerido que a capacidade dos TNOs de manter materiais voláteis tem uma relação com o diâmetro e é observado que TNOs com  $D < 500$  km perderam a maioria dos materiais voláteis da sua superfície ([Schaller & Brown, 2007](#); [Brown, 2012](#)). Assumindo que a diferença de voláteis entre os objetos seja determinada pela sua capacidade de retenção dos materiais, conforme sugerido por [Schaller & Brown \(2007\)](#), eles deveriam apresentar diferentes estruturas internas. Os objetos diferenciados (com núcleo, manto e crosta) apresentando maior densidade, ou seja, maior compactação, enquanto os objetos não diferenciados (formados por uma única estrutura e possivelmente de um mesmo material) apresentam uma maior porosidade, considerando diferenças nas estruturas superficiais também [Lykawka & Mukai \(2005\)](#). Assim, separamos os nossos objetos em TNOs pequenos, com  $H_V > 4,5 \sim D < 500$  km e TNOs grandes com  $H_V < 4,5 \sim D > 500$  km.

A correlação  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  se mantêm para ambos grupos, sendo que não encontramos

correlações claras com respeito dos parâmetros orbitais. Porém, encontramos que os TNOs pequenos seguem uma correlação  $r_s = 0.5912$  entre  $H_V - H_R$  e  $p_V$  com significância estatística de  $3\sigma$ .

De acordo com essa correlação os TNOs mais vermelhos têm albedos geométricos maiores. Então, assumindo que pelos modelos propostos de evolução do Sistema Solar os TNOs foram objetos com grandes quantidades de gelo primitivo, eles possuiriam inicialmente superfícies não processadas e deveriam apresentar cores neutras. Se essas superfícies forem expostas à irradiação, então elas irão diminuir o seu albedo no visível mais rápido do que no vermelho. Por outro lado, se elas foram submetidas a grandes quantidades de radiação, o processamento das moléculas como  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  resultaria em uma superfície escura coberta de material carbonáceo, e seu albedo diminuirá no vermelho dando lugar a um espectro de baixa inclinação (Strazzulla & Johnson, 1991). Um mecanismo oposto é o recobrimento da superfície a partir de possíveis mecanismos exógenos próprios de alguns objetos ou por causa de colisões (i.e. superfícies que tem sofrido impactos) (Fernández, 2006; Gil-Hutton, 2002).

Portanto, os objetos maiores desse grupo, com maiores albedos e uma cor vermelha, provavelmente têm superfícies bem processadas mas ainda não estão nos últimos estágios de irradiação. Por outro lado, os objetos menores, azuis e com baixos albedos, poderiam ser objetos muito processados. Isso é interessante pois, conforme observado, os objetos pequenos são mais numerosos do que os grandes tendo, portanto, uma maior probabilidade de serem impactados

Por outro lado, os TNOs grandes seguem uma tendência inversa para a mesma relação com  $r_s = -0.3243$ , embora sem atingir a significância estatística  $1\sigma$ , o que poderia ser consequência de uma amostra pequena, insuficiente para descrever a correlação. Observamos também uma possível separação quando se considera  $H_V - H_R$  vs.  $D$  e que indicaria dois diferentes grupos.

O grupo dos TNOs grandes não apresenta TNOs muito vermelhos o que indica que a composição das superfícies desse grupo seja, portanto, diferente dos TNOs pequenos. Como mostrado pela Fig. 5.14 as distribuições dos albedos também mostram diferenças sendo mais variada para o caso dos TNOs pequenos.

Então, devido a que a correlação  $H_V - H_R$  vs.  $\Delta\beta$  não indica relação clara com o tamanho dos TNOs, nem sua distribuição orbital e pela falta de evidencia de uma relação com a composição ou albedo geométrico, propomos que ela seja devida à microestrutura da superfície, possivelmente compactação e/ou granulometria, isso é a distribuição das dimensões dos grãos refletoras, as dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas percentagens de ocorrência (Harris & Young, 1989; Hapke, 1990). Utilizamos o modelo de Lumme & Bowell (1981) procurando evidências para o efeito de sombreamento entre os filtros e nossos resultados apontam para espaçamentos grandes entre os dispersores.

### 6.1.3 Análise de grupos com respeito das cores observadas

Como indicado no capítulo 5 procuramos por relações entre os parâmetros calculados e os parâmetros orbitais e físicos dos TNOs com objetivo de testar algumas correlações propostas na literatura. Encontramos que em um dos grupos se observa uma correlação entre  $H_V - H_R$

e  $p_V$ . Outras correlações de  $H_V - H_R$  com parâmetros orbitais da literatura foram testadas e nossos dados não indicam relações claras com nenhum dos parâmetros como indicado pelos autores.

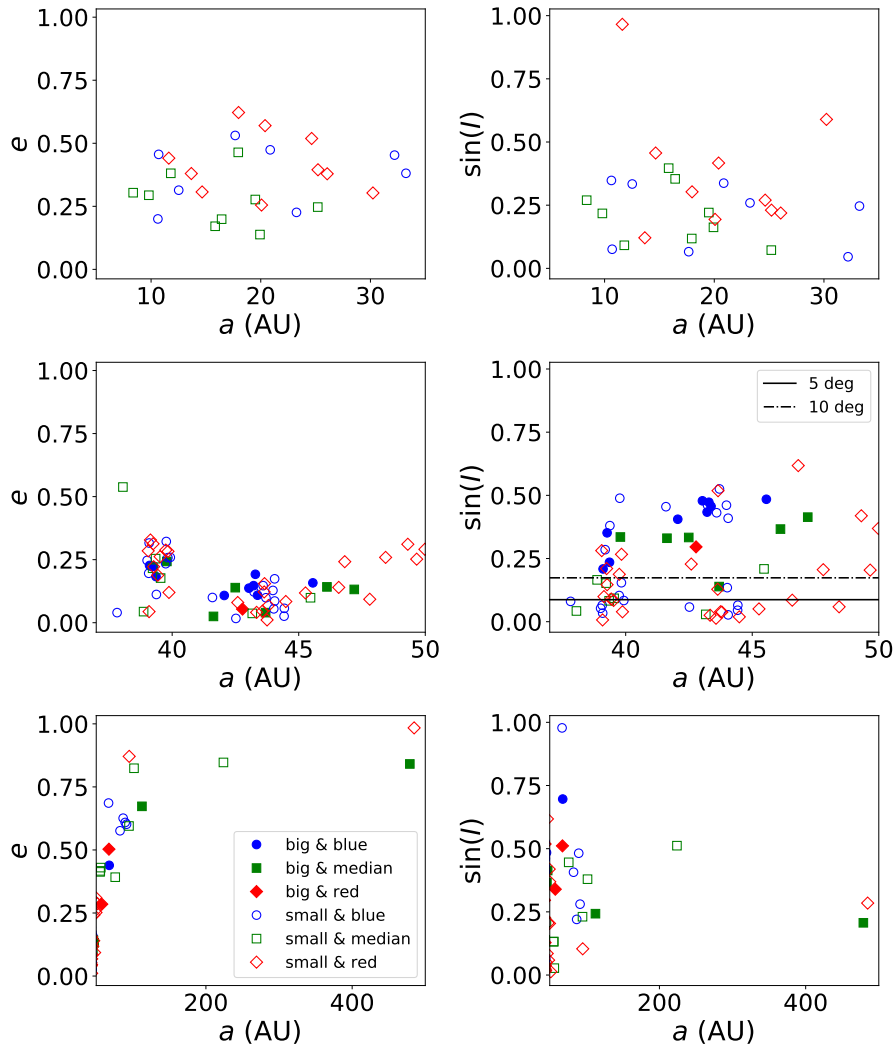


Figura 6.23 – Distribuição orbital dos objetos observados. Símbolos abertos indicam objetos mais fracos que  $H_V = 4.5$  (pequenos), enquanto os símbolos preenchidos indicam objetos mais brilhantes que  $H_V = 4.5$ . Os círculos azuis indicam objetos  $H_V - H_R < 0,9 \times$  a cor mediana, quadrados verdes indicam cores dentro de 10% da mediana, enquanto diamantes vermelhos indicam objetos mais vermelhos que  $1,1 \times$  a cor mediana.

O resultado mais importante que obtivemos da nossa análise é uma correlação de  $H_V - H_R$  com o  $\Delta\beta$  a qual indica que para os objetos mais vermelhos correspondem curvas de fase mais íngremes no filtro  $R$  enquanto que para os mais azuis correspondem curvas de fase mais íngremes no filtro  $V$ .

Realizamos uma análise dos parâmetros orbitais com respeito à média observada  $H_V - H_R = 0.567$ . Na Fig. 6.23 são mostrados em verde os objetos que tem cores dentro de 10% da mediana, em azul os que têm menos do que 10%, e em vermelho, os com mais de 10% da mediana são mostrados em vermelho. Os símbolos sólidos correspondem a TNOs com  $H_V < 4.5$ , e os abertos para TNOs com  $H_V > 4.5$ . São indicados, o grupo dos centauros entre 10 e 30 au

(topo), as diferentes regiões do cinturão transNeptuniano que contém aos plutinos e o cinturão clássico, entre 34 e 50 au (meio) e os objetos do disco espalhado e destacados a distância maiores do que 50 au (abaixo). Como é facilmente visto, não ha nenhuma aglomeração de objetos com  $H_V - H_R$  semelhantes para nenhuma das distribuições orbitais, nem nos casos para os quais que é sugerido que os objetos poderiam-se separar pela sua composição (TNOs com diâmetros maiores ou menores do que 500 km).

Observamos uma tendência de domínio de objetos vermelhos em baixas inclinações  $i < 15^\circ$  na região entre 34 e 50 au (meio, direita) mas se observam também alguns objetos azuis e objetos vermelhos na mesma região com inclinações maiores. Como podemos observar nas Fig. 5.18 e 5.19 existem aparentes estruturas como sugerido na literatura, embora sem relevância estatística.

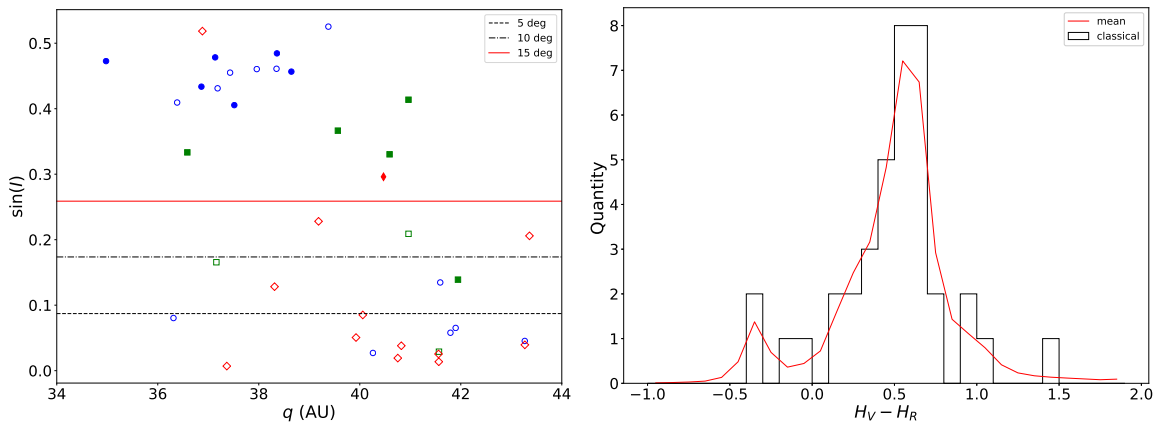


Figura 6.24 – Espaço fase de periélio ( $q$ ) vs. Seno da inclinação ( $\sin i$ ) para o nosso grupo clássico definido. As linhas horizontais mostram limites para inclinações  $I = 5^\circ$  (linha tracejada preta),  $I = 10^\circ$  (linha ponto-tracejada preta) e  $I = 15^\circ$  (linha solida vermelha). O esquema de  $H_V - H_R$  e símbolos é igual do que a Fig.6.23 (direita). Histograma de distribuição de  $H_V - H_R$  para o mesmo grupo.

Com respeito à bimodalidade nas cores para objetos do cinturão clássico, sugerida na literatura como evidencia de separação dos objetos clássicos frios e quentes, nossos resultados indicam que os objetos nessa região mostram uma variedade de cores para diferentes inclinações, como pode ser observado na Fig. 6.24. Além disso pode-se perceber uma predominância das cores vermelhas para inclinações baixas, mas existe uma distribuição das cores ao longo de todo o espaço de inclinações. Os dados mostram uma grande variedade e mistura de cores, pode-se identificar uma população clássica mais fria com predominância de objetos mais vermelhos e mais fracos com baixas inclinações. O histograma (direita) do grupo clássico não mostra nenhuma evidência de uma distribuição bimodal.

Uma possibilidade é de que a bimodalidade exista mas os nossos dados sejam tendenciosos para os objetos nessa região. Pode ser observado que ha uma falta de objetos clássicos com  $I$  altas e  $q$  grandes na nossa amostra. Não percebemos nenhuma falta de objetos semelhante em outras agrupamentos.

Recentemente, os resultados de Wong & Brown (2017) indicam que a distribuição bimodal das cores dos TNOs se deve à evolução química do  $H_2S$  em diferentes locais do Sistema Solar

antes da grande instabilidade que reorganizou a arquitetura do Sistema Solar (Nesvorný & Morbidelli, 2012). A evolução química do  $H_2S$  produz um resíduo muito vermelho devido à irradiação nas superfícies. Esse fenômeno tem sido sugerido como uma possível explicação para a distribuição bi-modal das cores dos asteroides Troianos (Wong & Brown, 2016), embora ainda com incertezas para a sua modelagem em TNOs (Jewitt, 2018).

A bimodalidade assim como as correlações de cores sugeridas na literatura utilizam dados em comprimentos de onda maiores do que o coberto pelas cores  $V$  e  $R$  apresentadas neste trabalho. Por exemplo, nos trabalhos de Tegler & Romanishin (1998), Peixinho et al. (2015) e Tegler et al. (2016) eles usam o filtro  $B$ ; os resultados de Wong & Brown (2017) apresentam cores  $g - i$ , e no trabalho de Perna et al. (2010) os autores utilizam uma variedade de cores. Entre os primeiros resultados a sugerir a bimodalidade de cores Peixinho et al. (2003) apresentam cores  $BVR$  e indicam que a evidência bi-modal é mais forte nos dados quando se usam os filtros  $V - R$ . A literatura indica que a maioria dos espectros dos TNOs seguem um comportamento muito linear no intervalo do visível Alvarez-Candal et al. (2008); Fornasier et al. (2009), por isso, se a bimodalidade fosse real, então nossos dados deveriam mostrar alguma evidência.

Um ponto importante para ressaltar é que nas cores  $H_V - H_R$  apresentadas neste trabalho são considerados os efeitos de fase na estimativa das  $H_\lambda$ . Isto porque nossas curvas de fase são feitas a partir de observações obtidas em diferentes épocas, cobrindo diferentes  $\alpha$ . As observações em noites consecutivas cobrem intervalos de tempo muito curto entre uma observação e outra, com valores de  $\alpha$  muito próximos, o que pode levar a imprecisões nas estimativas de cores.

#### 6.1.4 Conclusões

Apresentamos os resultados de uma quantidade robusta de estimativas de magnitudes absolutas, coeficientes de fase e  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  para TNOs. Com objetivo de criar um banco de dados com boa precisão, usamos técnicas homogêneas e estimamos com especial cuidado as grandes incertezas introduzidas pelas propriedades de rotação que para muitos de nossos objetos ainda são desconhecidas.

Realizamos uma análise exaustiva das relações entre os parâmetros calculados e os parâmetros físicos e orbitais dos TNOs. Os resultados destes trabalhos podem ser resumidos como:

- Em Alvarez-Candal et al. (2016), o principal resultado foi os TNOs mostrarem uma grande dispersão de coeficientes de fase,  $\beta_{lambda}$  (a dispersão observada nos resultados apresentados foi de  $\beta_V = -0.88$  e até  $\beta_V = 1.35$  mag per grau) e, portanto, deve-se ter cuidado ao assumir um valor médio.
- Em Ayala-Loera et al. (2018) mostramos que  $H_V - H_R$  se correlacionam fortemente com  $\Delta\beta$ . A correlação é independente da composição, tamanho e localização da superfície no Sistema Solar. Sugerimos que ela seja relativa à propriedades da porosidade e compactação das superfícies.

- Em Alvarez-Candal et al. 2019 foi realizada uma análise da correlação  $H_V - H_R$  e  $\Delta\beta$  com objetivo de procurar por interpretações dos fenômenos físicos que puderem explicá-la e usamos o modelo Lumme & Bowell (1981) para calcular curvas de fase numéricas que posteriormente foram comparadas com nossos resultados. Observamos que o modelo não atinge o intervalo dos resultados observacionais. Assim, sugerimos que o processo de espalhamento em essas superfícies é dominada por espalhamento unico, em lugar de espalhamento múltiplo.
- Reproduzimos as as principais correlações discutidas na literatura que foram apresentadas por Tegler & Romanishin (2000) e Peixinho et al. (2008). Encontramos que tais correlações não são observadas em nossos resultados utilizando  $H_V - H_R$ . Então indicamos que, a coloração pela fase e os erros de observação desempenham um papel importante na compreensão dessas relações.

Os nossos resultados indicam:

- Obtivemos cores absolutas  $H_V - H_R$  e coeficientes de fase  $\Delta\beta$  para 117 objetos.
- A forte correlação entre essas grandezas aparece no banco de dados completo e também quando são consideradas diferentes classes dinâmicas. Sugerimos que ela aponta a micro propriedades das superfícies.
- Nossos resultados indicam que não é válido supor que a cor de um objeto observado em qualquer ângulo de fase seja representativa da cor em oposição pois grandes mudanças podem acontecer.
- De maneira contraria a bi-modalidade das cores apresentada por outros autores nossos resultados apontam para um continuum.

As magnitudes absolutas e os coeficientes de fase foram obtidos a partir de fontes heterogêneas, com uma variedade ampla de precisões obtidas a partir de uma ampla distribuição de telescópios, instrumentos e filtros, no entanto para qualquer objeto os dados são consistentes, o que sustenta a validade dos nossos resultados. Os resultados e análises desta tese foram apresentados em duas publicações no MNRAS.



## 6.2 Trabalho futuro

Os resultados apresentados nesta tese foram obtidos a partir de observações em dois filtros, as cores  $H_V - H_R$  obtidas a partir de curvas de fase. Estas cores mostram uma forte correlação com as diferenças entre os coeficientes de fase das mesmas definido aqui como  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$ . A interpretação dos comportamentos dos objetos através da correlação indica que nos TNOs o espalhamento múltiplo não é dominante. No entanto o resultado precisa de ser melhor explorado. Para isso sugerimos o seguinte:

- Aumentar a amostra
- Usar novos levantamentos como fonte de dados
- Aplicar a técnica a objetos diferentes (satélites gelados e/ou asteroides)

Entre os resultados obtidos temos identificado objetos com comportamentos interessantes. Os objetos com valores muito extremos nas cores e os coeficientes de fase e também objetos que indicam diminuições da magnitude em configurações perto da oposição para curvas em ambos filtros (1994EV3, 1996TK66, 1998KG62, 198UR43 e 202KY14), para esses objetos (curvas de fase indicadas nos resultados desta tese) sugerimos estudos mais aprofundados.



# 7 Publicações

## Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: $H_V - H_R$ and relative phase coefficients

C. Ayala-Loera,<sup>1\*</sup> A. Alvarez-Candal,<sup>1</sup> J. L. Ortiz,<sup>2</sup> R. Duffard,<sup>2</sup>  
E. Fernández-Valenzuela,<sup>2,3</sup> P. Santos-Sanz<sup>2</sup> and N. Morales<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Observatório Nacional / MCTIC, Rua General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ, 20921-400, Brazil

<sup>2</sup>Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Apt 3004, E-18080 Granada, Spain

<sup>3</sup>Florida Space Institute (FSI) at University of Central Florida, 02354 Research Parkway, Suite 284, Orlando, FL 32826, USA

Accepted 2018 August 24. Received 2018 August 24; in original form 2018 April 10

### ABSTRACT

The trans-Neptunian objects (TNOs) are small Solar System bodies at large distances from the Sun. As such, their physical properties are difficult to measure. Accurate determination of their physical parameters is essential to model and theorize the actual composition and distribution of the population, and to improve our understanding of the formation and evolution of the Solar System. The objective of this work is to construct phase curves in two filters,  $V$  and  $R$ , of a large TNO sample obtaining absolute magnitudes ( $H$ ) and phase coefficients ( $\beta$ ), and study possible relations between them and other physical parameters (orbital elements, sizes, and albedos). We used our own data, together with data from the literature, to create the phase curves assuming an overall linear trend. We obtained new magnitudes for 28 TNOs, 28 in the  $V$  filter and 36 in the  $R$  filter. These magnitudes, together with data from the literature, allowed us to obtain absolute magnitudes, 114 in the  $V$  filter and 113 in the  $R$  filter, of which 106 have both. From the search for correlations, we found a strong anticorrelation between  $H_V - H_R$  and  $\Delta\beta = \beta_V - \beta_R$ , which is probably more related to surface structure than to composition or size of the objects.

**Key words:** methods: observational – technique: photometric – Kuiper belt objects: general.

### 1 INTRODUCTION

The trans-Neptunian objects, TNOs, are distant object leftovers of the protoplanetary disc where the planets are formed. The understanding of their physical properties sets important constraints to improve the evolution models of the Solar System (Mueller et al. 2010).

Nowadays, the Minor Planet Center<sup>1</sup> lists around 2,300 TNOs. Unfortunately, just a few hundreds of them that have high-quality physical studies, due to their orbital and size distributions, produce few objects brighter than  $V_{mag} \sim 17$ . Among the techniques used to study TNOs, photometry is the less expensive one (in terms of observing time). Photometric studies allow to obtain information of a good number of TNOs via apparent magnitudes and colours. The first are measurements of the integral reflected light by the TNO surface, subjected to the geometry of the observation and physical properties, such as diameter ( $D$ ) and albedo ( $p$ ), while the latter is a measure of the slope of the spectral reflectance of the object. Apparent magnitudes can be used to obtain absolute magnitudes

( $H$ ) if the observational circumstances are known. The absolute magnitude is the mean apparent magnitude, over a rotation cycle of the object, observed at zero phase angle, and both at 1 AU from the Sun and the Earth. In practice,  $H$  should be computed using phase curves and the formalism of Muinonen et al. (2010). A phase curve shows the change of the apparent magnitude, normalized to unit distance from the Earth and the Sun, with the phase angle ( $\alpha$ ). Nonetheless, due to the large distances where the TNOs reside,  $\alpha$  (the arc that subtends the distance Sun–Earth as seen from the object) can only reach values as large as  $\sim 3^\circ$ , while the centaurs (representatives of the TNO population orbiting closer to the Sun) can be observed up to phase angles  $\sim 7^\circ$ . In these small ranges, the phase curves can be approximated by a linear function (see, for instance, Alvarez-Candal et al. 2016) with due caution for possible opposition surges at phase angles close to zero.

The absolute magnitude is of interest because it can be used as a proxy for size through

$$D[km] = C \times 10^{-H/5} p^{-1/2}, \quad (1)$$

where  $C$  is a constant.

On the other hand, colours are the difference of two magnitudes measured using two filters with different effective wavelengths,  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , and, as mentioned, are related to the reflectance spectrum

\* E-mail: madekarmen@on.br

<sup>1</sup> <http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

# Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: Correlations and Populations

Alvaro Alvarez-Candal,<sup>1\*</sup> Carmen Ayala-Loera,<sup>1</sup> Ricardo Gil-Hutton,<sup>2</sup>  
 José Luis Ortiz,<sup>3</sup> Pablo Santos-Sanz,<sup>3</sup> and René Duffard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Observatório Nacional / MCTIC, Rua General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ, 20921-400, Brazil*

<sup>2</sup>*Departamento de Geofísica y Astronomía, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan - CONICET, Av. José I. de la Roza 590 (O), San Juan, J5402DCS, Argentina*

<sup>3</sup>*Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Apt 3004, E-18080 Granada, Spain*

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

## ABSTRACT

The study of the visible colours of the trans-Neptunian objects opened a discussion almost 20 years ago which, in spite of the increase in amount of data, seems far from subside. Visible colours impose a series of constraints to the current theories of the early dynamical evolution of the Solar System such as the environment of formation, initial surface composition, and how (if) they were scattered to regions closer to the inner planets. In this paper we present and updated version of our database of absolute colours  $H_V - H_R$  and relative phase coefficients  $\Delta\beta$  for 117 objects. These were obtained joining our own observations plus data from the literature. The methodology has been introduced in a previous work and here we expand in some interesting results, in particular the strong anti-correlation found between  $H_V - H_R$  and  $\Delta\beta$ , which means that redder objects have steeper phase curves in the R filter, while bluer objects have steeper phase curves in the V filter. We analyse a series of results published in the literature in view of our database, which is free from phase effects, and show that, with little exceptions, most could be explained by a combination of phase-colouring and observational errors.

**Key words:** methods: observational – technique: photometric – Kuiper belt objects: general

## 1 INTRODUCTION

The trans-Neptunian population conforms, possibly, the least altered population of minor bodies in the Solar System and the clues of its dynamical and physical-chemical evolution lie among the objects that compose it. Nowadays, nearly 3,000 TNOs (trans-Neptunian objects) are known, including related populations, like the centaurs, their representatives in inner parts of the outer Solar System. In this work we will use the term TNO to refer to all these objects.

Early ideas of the trans-Neptunian belt regarded it as dynamically cold and with similar physical properties (e.g. Fernandez 1980). Nevertheless, with the increase of the available observational data, it became clear that the belt showed a large degree of heterogeneity: visible colours ranging from nearly solar to extremely red (e.g. Luu & Jewitt 1996; Doressoundiram et al. 2008; Peixinho et al. 2015; Tegler et al. 2016, and references therein), and surface composition that

varies from displaying absorption bands (methane, molecular nitrogen, or water ices, and a few other traces) to being almost featureless within the signal-to-noise ratio (Barucci et al. 2011; Brown 2012). The large dispersion of properties is interpreted in terms of the TNOs dynamical evolution since the Solar System formation (e.g. Nesvorný 2018), the chemical evolution of the surfaces (e.g. Strazzulla & Johnson 1991; Hudson et al. 2008), and loss of volatile off the surfaces (Schaller & Brown 2007).

Most of the available data on TNOs comes from photometric studies, which is the fastest and easiest observational way to characterise a large population of minor bodies through large data-sets. Early studies pointed towards a possible bi-modal distribution of their visible colors (Tegler & Romanishin 1998), although not all works coincided with this view (for instance Luu & Jewitt 1996). The former work pointed towards an issue with the observational errors reported. The so-called “colours controversy” is still ongoing, while Peixinho et al. (2015) point to an apparent bi-modal distribution only for Centaurs and TNOs fainter than  $H_V = 7$ , Tegler et al. (2016) find it as a property of

\* E-mail: varobes@gmail.com (AAC)

# Referências

- Alvarez-Candal, A., Fornasier, S., Barucci, M. A., de Bergh, C., & Merlin, F. 2008, *A&A*, 487, 741, doi: [10.1051/0004-6361:200809705](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809705)
- Alvarez-Candal, A., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J. L., et al. 2016, *A&A*, 586, A155, doi: [10.1051/0004-6361/201527161](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527161)
- Ayala-Loera, C., Alvarez-Candal, A., Ortiz, J. L., et al. 2018, *MNRAS*, 481, 1848, doi: [10.1093/mnras/sty2363](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2363)
- Bagnulo, S., Belskaya, I., Muinonen, K., et al. 2008, *A&A*, 491, L33, doi: [10.1051/0004-6361:200810938](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810938)
- Bagnulo, S., Boehnhardt, H., Muinonen, K., et al. 2006, *A&A*, 450, 1239, doi: [10.1051/0004-6361:20054518](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054518)
- Barucci, M. A. 2008, *The solar system beyond Neptune* (University of Arizona Press)
- Barucci, M. A., Doressoundiram, A., & Cruikshank, D. P. 2004, Surface characteristics of transneptunian objects and centaurs from photometry and spectroscopy, ed. M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver, 647
- Barucci, M. A., Romon, J., Doressoundiram, A., & Tholen, D. J. 2000, *AJ*, 120, 496, doi: [10.1086/301416](https://doi.org/10.1086/301416)
- Belskaya, I. N., Levasseur-Regourd, A.-C., Shkuratov, Y. G., & Muinonen, K. 2008, Surface Properties of Kuiper Belt Objects and Centaurs from Photometry and Polarimetry, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 115–127
- Belskaya, I. N., Ortiz, J. L., Rousselot, P., et al. 2006, *Icarus*, 184, 277, doi: [10.1016/j.icarus.2006.04.015](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.04.015)
- Benecci, S. D., & Sheppard, S. S. 2013, *AJ*, 145, 124, doi: [10.1088/0004-6256/145/5/124](https://doi.org/10.1088/0004-6256/145/5/124)
- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., et al. 1989, in *Asteroids II*, ed. R. P. Binzel, T. Gehrels, & M. S. Matthews, 524–556
- Bowell, E., & Lumme, K. 1979, Colorimetry and magnitudes of asteroids, ed. T. Gehrels & M. S. Matthews, 132–169
- Brown, M., Barkume, K., Blake, G., et al. 2006, *The Astronomical Journal*, 133, 284
- Brown, M. E. 2012, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 467, doi: [10.1146/annurev-earth-042711-105352](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105352)
- Brown, M. E., Trujillo, C. A., & Rabinowitz, D. L. 2005, *ApJ*, 635, L97, doi: [10.1086/499336](https://doi.org/10.1086/499336)
- Carry, B. 2012, *Planetary and Space Science*, 73, 98
- Clem, J. L., & Landolt, A. U. 2013, *AJ*, 146, 88, doi: [10.1088/0004-6256/146/4/88](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/4/88)
- Cruikshank, D. P., Barucci, M. A., Emery, J. P., et al. 2007, *Protostars and Planets V*, 879
- Davis, D. R., Durda, D. D., Marzari, F., Campo Bagatin, A., & Gil-Hutton, R. 2002, Collisional Evolution of Small-Body Populations, ed. W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel, 545–558
- Delsanti, A., Hainaut, O., Jourdeuil, E., et al. 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 417, 1145
- Doressoundiram, A., Boehnhardt, H., Tegler, S. C., & Trujillo, C. 2008, Color Properties and Trends of the Transneptunian Objects, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 91–104
- Doressoundiram, A., Peixinho, N., de Bergh, C., et al. 2002, *AJ*, 124, 2279, doi: [10.1086/342447](https://doi.org/10.1086/342447)
- Duffard, R., Ortiz, J., Thirouin, A., Santos-Sanz, P., & Morales, N. 2009, *Astronomy & Astrophysics*, 505, 1283
- Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J. L., et al. 2014, *A&A*, 568, A79, doi: [10.1051/0004-6361/201424208](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424208)
- Durda, D. D., & Stern, S. A. 2000, *Icarus*, 145, 220
- Edgeworth, K. E. 1943, *Journal of the British Astronomical Association*, 53, 181
- Farinella, P., & Davis, D. R. 1996, *Science*, 273, 938, doi: [10.1126/science.273.5277.938](https://doi.org/10.1126/science.273.5277.938)
- Fernandez, J. A. 1980, *MNRAS*, 192, 481, doi: [10.1093/mnras/192.3.481](https://doi.org/10.1093/mnras/192.3.481)
- Fernández, J. A. 2006, *Comets: Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmogonical Relevance*, Vol. 328 (Springer Science & Business Media)

- Fernandez, J. A., & Ip, W.-H. 1984, *Icarus*, 58, 109, doi: [10.1016/0019-1035\(84\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(84)90101-5)
- Fernandez-Valenzuela, E., Ortiz, J. L., Duffard, R., Santos-Sanz, P., & Morales, N. 2016, *MNRAS*, 456, 2354, doi: [10.1093/mnras/stv2739](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2739)
- Fornasier, S., Barucci, M. A., de Bergh, C., et al. 2009, *A&A*, 508, 457, doi: [10.1051/0004-6361/200912582](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912582)
- Gehrels, T. 1956, *ApJ*, 123, 331, doi: [10.1086/146166](https://doi.org/10.1086/146166)
- Gehrels, T., Coffeen, T., & Owings, D. 1964, *AJ*, 69, doi: [10.1086/109359](https://doi.org/10.1086/109359)
- Gehrels, T., & Teska, T. M. 1963, *Appl. Opt.*, 2, 67, doi: [10.1364/AO.2.000067](https://doi.org/10.1364/AO.2.000067)
- Gil-Hutton, R. 2002, *Planetary and Space Science*, 50, 57
- Gil-Hutton, R., & García-Migani, E. 2017, *A&A*, 607, A103, doi: [10.1051/0004-6361/201731388](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731388)
- Gladman, B., Marsden, B. G., & Vanlaerhoven, C. 2008, *Nomenclature in the Outer Solar System*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 43–57
- Gomes, R., Nesvorný, D., Morbidelli, A., Deienno, R., & Nogueira, E. 2018, *Icarus*, 306, 319, doi: [10.1016/j.icarus.2017.10.018](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.10.018)
- Gomes, R. S. 2003, *Icarus*, 161, 404, doi: [10.1016/S0019-1035\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0019-1035(02)00056-8)
- Gomes, R. S., Fernández, J. A., Gallardo, T., & Brunini, A. 2008, *The Scattered Disk: Origins, Dynamics, and End States*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 259–273
- Grundy, W., Binzel, R., Buratti, B., et al. 2016, *Science*, 351, aad9189
- Grundy, W. M., Noll, K., & Stephens, D. 2005, *Icarus*, 176, 184
- Hainaut, O., & Delsanti, A. 2003, *Minor Planet Circulars*, 49389, 28
- Hainaut, O. R., Boehnhardt, H., & Protopapa, S. 2012, *A&A*, 546, A115, doi: [10.1051/0004-6361/201219566](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219566)
- Hainaut, O. R., & Delsanti, A. C. 2002, *A&A*, 389, 641, doi: [10.1051/0004-6361:20020431](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020431)
- Hapke, B. 1981, *Journal of Geophysical Research*, 86, 4571
- Hapke, B. 1990, *Icarus*, 88, 407, doi: [10.1016/0019-1035\(90\)90091-M](https://doi.org/10.1016/0019-1035(90)90091-M)
- Hapke, B. 1993, *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*
- Hapke, B. 2008, *Icarus*, 195, 918, doi: [10.1016/j.icarus.2008.01.003](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.01.003)
- Hapke, B., Nelson, R., & Smythe, W. 1998, *Icarus*, 133, 89, doi: [10.1006/icar.1998.5907](https://doi.org/10.1006/icar.1998.5907)
- Hapke, B. W. 1963, *J. Geophys. Res.*, 68, 4571, doi: [10.1029/JZ068i015p04571](https://doi.org/10.1029/JZ068i015p04571)
- Harris, A. W., & Young, J. W. 1989, *Icarus*, 81, 314, doi: [10.1016/0019-1035\(89\)90056-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(89)90056-0)
- Hussmann, H., Sohl, F., & Spohn, T. 2006, *Icarus*, 185, 258
- Hussmann, H., Sohl, F., & Spohn, T. 2006, *Icarus*, 185, 258, doi: [10.1016/j.icarus.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.06.005)
- Jewitt, D. 2018, *AJ*, 155, 56, doi: [10.3847/1538-3881/aaa1a4](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa1a4)
- Jewitt, D., Chizmadia, L., Grimm, R., & Prrialnik, D. 2007, *Protostars and Planets V*, 863
- Jewitt, D., & Luu, J. 1993, *Nature*, 362, 730, doi: [10.1038/362730a0](https://doi.org/10.1038/362730a0)
- Jewitt, D., Luu, J., & Trujillo, C. 1998, *AJ*, 115, 2125, doi: [10.1086/300335](https://doi.org/10.1086/300335)
- Kavelaars, J., Jones, L., Gladman, B., Parker, J. W., & Petit, J. M. 2008, *The Orbital and Spatial Distribution of the Kuiper Belt*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 59
- Kovalenko, I., Doressoundiram, A., Lellouch, E., et al. 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 608, A19
- Kowal, C., Liller, W., & Marsden, B. 1979, in *Symposium-International Astronomical Union*, Vol. 81, Cambridge University Press, 245–250
- Kuiper, G. P. 1951, *Proceedings of the National Academy of Science*, 37, 1, doi: [10.1073/pnas.37.1.1](https://doi.org/10.1073/pnas.37.1.1)
- Lacerda, P., Jewitt, D., & Peixinho, N. 2008, *AJ*, 135, 1749, doi: [10.1088/0004-6256/135/5/1749](https://doi.org/10.1088/0004-6256/135/5/1749)
- Lacerda, P., & Luu, J. 2006, *AJ*, 131, 2314, doi: [10.1086/501047](https://doi.org/10.1086/501047)

- Lacerda, P., Fornasier, S., Lellouch, E., et al. 2014, *ApJ*, 793, L2, doi: [10.1088/2041-8213/305/793/1/L2](https://doi.org/10.1088/2041-8213/305/793/1/L2)
- Landolt, A. U. 2009, *The Astronomical Journal*, 137, 4186
- Lebofsky, L. A., & Spencer, J. R. 1989, in *Asteroids II*, 128–147
- Lellouch, E., Santos-Sanz, P., Lacerda, P., et al. 2013, *A&A*, 557, A60, doi: [10.1051/0004-6361/201322047](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322047)
- Levison, H. F., & Duncan, M. J. 1997, *Icarus*, 127, 13, doi: [10.1006/icar.1996.5637](https://doi.org/10.1006/icar.1996.5637)
- Lumme, K., & Bowell, E. 1981, *AJ*, 86, 1694, doi: [10.1086/113054](https://doi.org/10.1086/113054)
- Lupo, M. J., & Lewis, J. S. 1979, *Icarus*, 40, 157, doi: [10.1016/0019-1035\(79\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90061-7)
- Luu, J., & Jewitt, D. 1996, *AJ*, 112, 2310, doi: [10.1086/118184](https://doi.org/10.1086/118184)
- Luu, J. X., & Jewitt, D. C. 2002, *ARA&A*, 40, 63, doi: [10.1146/annurev.astro.40.060401.093818](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093818)
- Lykawka, P. S., & Mukai, T. 2005, *Planetary and Space Science*, 53, 1319
- Malhotra, R. 1996, *AJ*, 111, 504, doi: [10.1086/117802](https://doi.org/10.1086/117802)
- Marsset, M., Fraser, W. C., Pike, R. E., et al. 2018, arXiv e-prints. <https://arxiv.org/abs/1812.02190>
- McKinnon, W. B., Prialnik, D., Stern, S. A., & Coradini, A. 2008, *Structure and Evolution of Kuiper Belt Objects and Dwarf Planets*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 213–241
- Morbidelli, A., Levison, H. F., & Gomes, R. 2008, *The Dynamical Structure of the Kuiper Belt and Its Primordial Origin*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 275–292
- Morrison, D., & Lebofsky, L. 1979, *Radiometry of asteroids*, ed. T. Gehrels & M. S. Matthews, 184–205
- Muñonen, K. 1989, *Appl. Opt.*, 28, 3044, doi: [10.1364/AO.28.003044](https://doi.org/10.1364/AO.28.003044)
- Muñonen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., et al. 2010, *Icarus*, 209, 542, doi: [10.1016/j.icarus.2010.04.003](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.04.003)
- Muñonen, K., Bowell, E., & Lumme, K. 1995, *Astronomy and Astrophysics*, 293, 948
- Muñonen, K., Zubko, E., Tyynelä, J., Shkuratov, Y. G., & Videen, G. 2007, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 106, 360
- Nesvorný, D. 2015, *The Astronomical Journal*, 150, 68
- Nesvorný, D. 2015, *AJ*, 150, 68, doi: [10.1088/0004-6256/150/3/68](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/3/68)
- Nesvorný, D., & Morbidelli, A. 2012, *AJ*, 144, 117, doi: [10.1088/0004-6256/144/4/117](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/4/117)
- Ortiz, J. L., Santos Sanz, P., Gutiérrez, P. J., Duffard, R., & Aceituno, F. J. 2007, *A&A*, 468, L13, doi: [10.1051/0004-6361:20077355](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077355)
- Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., et al. 2017, *Nature*, 550, 219, doi: [10.1038/nature24051](https://doi.org/10.1038/nature24051)
- Pál, A., Kiss, C., Horner, J., et al. 2015, *A&A*, 583, A93, doi: [10.1051/0004-6361/201526249](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526249)
- Peixinho, N., Boehnhardt, H., Belskaya, I., et al. 2004, *Icarus*, 170, 153
- Peixinho, N., Delsanti, A., & Doressoundiram, A. 2015, *A&A*, 577, A35, doi: [10.1051/0004-6361/201425436](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425436)
- Peixinho, N., Delsanti, A., Guilbert-Lepoutre, A., Gafeira, R., & Lacerda, P. 2012, *A&A*, 546, A86, doi: [10.1051/0004-6361/201219057](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219057)
- Peixinho, N., Doressoundiram, A., Delsanti, A., et al. 2003, *A&A*, 410, L29, doi: [10.1051/0004-6361:20031420](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031420)
- Peixinho, N., Lacerda, P., & Jewitt, D. 2008, *AJ*, 136, 1837, doi: [10.1088/0004-6256/136/5/1837](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/5/1837)
- Perna, D., Barucci, M. A., Fornasier, S., et al. 2010, *A&A*, 510, A53, doi: [10.1051/0004-6361/200913654](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913654)
- Pitjeva, E. V., & Pitjev, N. P. 2018, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 130, 57, doi: [10.1007/s10569-018-9853-5](https://doi.org/10.1007/s10569-018-9853-5)
- Rambaux, N., Baguet, D., Chambat, F., & Castillo-Rogez, J. 2017, *The Astrophysical journal letters*, 850, L9
- Russell, H. N. 1916, *ApJ*, 43, 173, doi: [10.1086/142244](https://doi.org/10.1086/142244)
- Schaller, E. L., & Brown, M. E. 2007, *ApJ*, 659, L61, doi: [10.1086/516709](https://doi.org/10.1086/516709)

- Schwamb, M. E., Fraser, W. C., Pike, R. E., et al. 2018, in American Astronomical Society Meeting Abstracts, Vol. 231, American Astronomical Society Meeting Abstracts #231, 115.03
- Sheppard, S. S., & Jewitt, D. C. 2002, *AJ*, 124, 1757, doi: [10.1086/341954](https://doi.org/10.1086/341954)
- Shkuratov, Y., Ovcharenko, A., Zubko, E., et al. 2002, *Icarus*, 159, 396, doi: [10.1006/icar.2002.6923](https://doi.org/10.1006/icar.2002.6923)
- Strazzulla, G., & Johnson, R. E. 1991, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 167, IAU Colloq. 116: Comets in the post-Halley era, ed. R. L. Newburn, Jr., M. Neugebauer, & J. Rahe, 243–275
- Tegler, S. C., & Romanishin, W. 1998, *Nature*, 392, 49, doi: [10.1038/32108](https://doi.org/10.1038/32108)
- Tegler, S. C., & Romanishin, W. 2000, *Nature*, 407, 979, doi: [10.1038/35039572](https://doi.org/10.1038/35039572)
- Tegler, S. C., Romanishin, W., Consolmagno, G. J., & J., S. 2016, *AJ*, 152, 210, doi: [10.3847/0004-6256/152/6/210](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/210)
- Thirouin, A., Noll, K. S., Ortiz, J. L., & Morales, N. 2014, *A&A*, 569, A3, doi: [10.1051/0004-6361/201423567](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423567)
- Thirouin, A., Ortiz, J. L., Campo Bagatin, A., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 3156, doi: [10.1111/j.1365-2966.2012.21477.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21477.x)
- Thirouin, A., Ortiz, J. L., Duffard, R., et al. 2010, *A&A*, 522, A93, doi: [10.1051/0004-6361/200912340](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912340)
- Tiscareno, M. S., & Malhotra, R. 2003, *AJ*, 126, 3122, doi: [10.1086/379554](https://doi.org/10.1086/379554)
- Trujillo, C. A., & Brown, M. E. 2002, *ApJ*, 566, L125, doi: [10.1086/339437](https://doi.org/10.1086/339437)
- Vilenius, E., Müller, T., Pal, A., et al. 2011, in EPSC-DPS Joint Meeting 2011, Vol. 2011, 1299
- Vilenius, E., Kiss, C., Müller, T., et al. 2014, *A&A*, 564, A35, doi: [10.1051/0004-6361/201322416](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322416)
- Wong, I., & Brown, M. E. 2016, *AJ*, 152, 90, doi: [10.3847/0004-6256/152/4/90](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/90)
- Wong, I., & Brown, M. E. 2017, *AJ*, 153, 145, doi: [10.3847/1538-3881/aa60c3](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa60c3)