

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE PRELIMINAR DA CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DE PEQUENOS  
CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DE DADOS DA CAMPANHA  
FOTOMÉTRICA J-PLUS

por

Cílio Marques Santos

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

Orientador: Dr. Jorge Marcio Ferreira  
Carvano

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
de 2024

M837

Marques Santos, Cílio

Análise preliminar da classificação taxonômica de pequenos corpos do Sistema Solar a partir de dados da campanha fotométrica J-PLUS [Rio de Janeiro] 2024.

xxii, 85 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2024.

1. asteroides. 2. variação. 3. cor. 4. fotometria. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“ANÁLISE PRELIMINAR DA CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DE PEQUENOS  
CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DE DADOS DA CAMPANHA  
FOTOMÉTRICA J-PLUS”

CÍLIO MARQUES SANTOS

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

Aprovada por:

---

Dr. Jorge Marcio Ferreira Carvano – Observatório  
Nacional  
(Orientador)

---

Dr. Mário Nascimento De Prá – Observatório Nacional

---

Dr. Pedro Henrique Hasselmann – INAF –  
Osservatorio Astronomico di Roma

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

0 DE DE 2024



*À minha mãe.*



# Agradecimentos

à minha família, por tudo.

à minha mãe, Irene, por acreditar, quando eu duvido.

ao meu irmão, que encontrou livros no lixo.

Ao Jorge, pelo apoio e orientação.

aos meus amigos da Pós, sempre solícitos.

à CAPES pela bolsa.







Cílio Marques Santos

ANÁLISE PRELIMINAR DA CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DE PEQUENOS  
CORPOS DO SISTEMA SOLAR A PARTIR DE DADOS DA CAMPANHA  
FOTOMÉTRICA J-PLUS

**RESUMO**

Realizamos a classificação de 170 asteroides a partir das reflectâncias obtidas na campanha fotométrica J-PLUS. Os dados utilizados foram corrigidos a partir de um algoritmo genético que visou a redução de ruídos devido à rotação. Utilizamos como método de classificação a Análise de Componentes Principais e a análise de agrupamento K-MEANS. Nossa classificação resultou em doze grupos, com cinco espectralmente próximos à classe S, com banda em  $1.0\mu m$  associada à possível presença de silicatos; três à classe C, sem característica de absorção, duas às classes V e Q banda muito acentuada à direita de  $0.77\mu m$ , um à classe K ou L e um à classe Ch, com acentuada banda em  $0.7\mu m$ , associada à hidratação. Como a definição de nomenclatura se baseou na inspeção visual comparativa às classes de Bus, optamos por definir um esquema que indique as duas classes mais prováveis. Em termos da distribuição heliocêntrica, não encontramos resultados que se distanciem de trabalhos anteriores.



PRELIMINARY ANALYSIS OF THE TAXONOMIC CLASSIFICATION OF BODIES  
IN THE SOLAR SYSTEM USING DATA FROM PHOTOMETRIC CAMPAIGN  
J-PLUS

**ABSTRACT**

We classified 170 asteroids based on reflectances obtained in the J-PLUS photometric campaign. The data used were corrected using a genetic algorithm that aimed to correct noise due to rotation. We used Principal Component Analysis and K-MEANS cluster analysis as classification methods. Our classification resulted in twelve groups, with five spectrally close to class S, with a band at  $1.0\mu m$  associated with the possible presence of silicates; three to class C, with no absorption characteristics; two to classes V and Q with a very pronounced band to the right of  $0.77\mu m$ ; one to class K or L; and one to class Ch, with a pronounced band at  $0.7\mu m$ , associated with hydration. Since the definition of nomenclature was based on visual inspection comparing the Bus classes, we chose to define a scheme that indicates the two most likely classes. In terms of the heliocentric distribution, we did not find results that differ from previous works.



# Lista de Figuras

2.1	Distribuição das classes da taxonomia de Tholen em relação às duas primeiras componentes principais. Fonte: THOLEN (1984). . . . .	8
2.2	Chave contendo o espectro médio das 26 classes de Bus. Fonte: BUS e BINZEL (2002). . . . .	11
2.3	Tabela mostrando a evolução das classes a partir das taxonomias de Tholen e Bus-DeMeo até a classificação de MAHLKE <i>et al.</i> (2022), que aparece na terceira coluna " <i>This work</i> ". As setas indicam a evolução das classes. Fonte: MAHLKE <i>et al.</i> (2022) . . . . .	16
3.1	Curva de transmissão dos filtros da campanha J-PLUS, convoluídas com a eficiência quântica do detector . . . . .	20
3.2	Resultados do método de reconstrução para curvas de luz sintéticas para o filtro $r_{SDSS}$ (ver texto) . . . . .	23
3.3	Espectros dos asteroides com a melhor reconstrução ( $\sigma_{ref} < 10$ ). Quando disponível plotamos o espectro SDSS (vermelho) ou o espectro SMASS2 (verde). Se nenhum desses espectros for disponíveis, plotamos o espectro ECAS (cinza), se existir ou S3OS2 (azul). Os espectros estão em ordem do número de identificação dos asteroides. . . . .	24
3.4	(continuação) . . . . .	25
3.5	(continuação) . . . . .	26
3.6	(continuação) . . . . .	27
3.7	(continuação) . . . . .	28
3.8	(continuação) . . . . .	29
3.9	(continuação) . . . . .	30
3.10	(continuação) . . . . .	31
3.11	(continuação) . . . . .	32
3.12	(continuação) . . . . .	33
3.13	Gráfico da primeira versus segunda componente principal para os 170 asteroides com os melhores espectros reconstruídos. . . . .	36
3.14	Gráfico da segunda versus terceira componentes principais para os 170 asteroides com os melhores espectros reconstruídos. . . . .	37

3.15	Gráfico função inércia versus número de clusters. . . . .	40
3.16	Gráfico coeficiente de silhueta versus número de agrupamentos k. O valor máximo ocorre para k=12. . . . .	42
3.17	Resultado de classificação com k-means para 12 agrupamentos. As cores para os diferentes pontos caracterizam os doze diferentes grupos. . . . .	43
4.1	Classificação para os 170 espectros melhor reconstruídos. Os números indicam o número atribuído ao grupo e suas posições indicam as posições dos seus centróides. . . . .	46
4.2	Distribuição das classes para os asteroides analisados em relação as duas primeiras componentes principais para objetos com classificação prévia. As cores representam classes na taxonomia de Bus-Demeo e Tholen, os pontos em preto representam objetos sem classificação prévia (U). . . . .	47
4.3	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 3 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 3 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto) (inferior). . . . .	49
4.4	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 9 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 9 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	50
4.5	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 5 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 5 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	51
4.6	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 8 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 8 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	53
4.7	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 0 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 0 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	54
4.8	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 6 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 6 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	55

4.9	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 4 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 4 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	57
4.10	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 7 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 7 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	58
4.11	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 11 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 11 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	59
4.12	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 1 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 1 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	61
4.13	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 10 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 10 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	62
4.14	Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 2 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 2 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior). . . . .	63
4.15	gráfico Inclinação versus semieixo maior, para os asteroides dos grupos 10, 6, 11 0 e 1 (semelhantes à classe S) (azul) e para os asteroides dos grupos 3,9 e 5 (vermelho) (semelhantes à classe C). As linhas verticais verdes dividem o gráfico em três regiões, 2.0-2.5 UA (interior do cinturão), 2.5-2.8 UA (região central) e superior a 2.8 UA região exterior. . . . .	65
4.16	histograma da distribuição de asteroides em relação ao semieixo maior. Distribuição dos grupos 0, 1, 6, 10 e 11 ( esquerda laranja) (espectralmente semelhantes à classe S). Distribuição dos grupos 3, 5 e 9 ( direita rosa) (espectralmente semelhantes à classe C). . . . .	66
4.17	Gráfico inclinação versus semieixo maior para os 12 grupos da classificação obtida. . . . .	74
4.18	Espectros médios dos grupos 3 (rosa), 9 (amarelo) e 5 (preto) . . . . .	75
4.19	Espectros médios dos grupos dos grupos 6 (cinza), 0 (vermelho), 1 (azul). . . . .	76
4.20	Espectros médios dos grupos 10 ( marrom) e 11 ( laranja) . . . . .	77
4.21	Espectros médios dos grupos 4 (verde) e 7 (magenta) . . . . .	78



# Lista de Tabelas

2.1	Tabela dos intervalos parâmetros ópticos que definem as classes composicionais C e S de <b>Chapman et al. (1975)</b> . . . . .	6
3.1	Sequência de observação, tempos de exposição medianos e comprimentos de onda centrais da campanha J-PLUS. . . . .	20
3.2	variâncias percentuais para as onze componentes principais. . . . .	36
4.1	classificação para os 170 asteroides . . . . .	69
4.2	continuação . . . . .	70
4.3	Continuação . . . . .	71
4.4	Continuação . . . . .	72
4.5	Distribuição dos grupos em relação às classificações anteriores. Não foram consideradas classificações de subgrupos, ou seja, como exemplo, um objeto Ch é assinalado na tabela como C. . . . .	73
4.6	Resumo das características dos espectros dos diferentes grupos. Na terceira coluna da esquerda para a direita são atribuídas classificações baseando-se em tais características. . . . .	73



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Sobre O Conteúdo Apresentado . . . . .	2
<b>2 Sobre A Taxonomia De Asteroides</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução . . . . .	3
2.2 As observações de padrões . . . . .	3
2.3 As classificações taxonômicas . . . . .	4
2.3.1 Chapman et al. 1975 . . . . .	4
2.3.2 Zellner e Gradie 1976 . . . . .	5
2.3.3 Zellner e Bowell 1977 . . . . .	5
2.3.4 Bowell et al. 1978 . . . . .	6
2.3.5 Gradie E Tedesco 1982 . . . . .	6
2.3.6 Tholen 1984 . . . . .	7
2.3.7 Barucci et al. 1987 . . . . .	9
2.3.8 Bus e Binzel 2002 . . . . .	9
2.3.9 Roig e Gil-Hutton 2006 . . . . .	10
2.3.10 Demeo et al. 2009 . . . . .	11
2.3.11 Carvano et al. 2010 . . . . .	13
2.3.12 Carry et al. 2016 . . . . .	14
2.3.13 Mahlke et al. 2022 . . . . .	14
2.4 Classificações taxonômicas: Atualidades tecnológicas . . . . .	15
<b>3 Dados e Metodologia</b>	<b>19</b>
3.1 A campanha fotométrica J-PLUS . . . . .	19
3.2 Método de reconstrução do espectro de reflectância . . . . .	21
3.3 A Análise De Componentes Prinipais . . . . .	34
3.4 Análise De Agrupamento . . . . .	37

3.4.1	K-means . . . . .	38
3.4.2	A classificação . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
4.1	A Distribuição de Classificações Anteriores em Relação às Componentes Principais . . . . .	45
4.2	Características Espectrais Dos Grupos . . . . .	46
4.2.1	Sobre a comparação com as classes Bus-Demeo . . . . .	46
4.2.2	Grupo 3- B . . . . .	48
4.2.3	Grupo 9- C . . . . .	48
4.2.4	Grupo 5- X . . . . .	48
4.2.5	Grupo 8- K . . . . .	52
4.2.6	Grupo 0- S2 . . . . .	52
4.2.7	Grupo 6- S1 . . . . .	52
4.2.8	Grupo 4- VQ . . . . .	56
4.2.9	Grupo 7- V . . . . .	56
4.2.10	Grupo 11- Sv . . . . .	56
4.2.11	Grupo 1- S3 . . . . .	60
4.2.12	Grupo 10- SA . . . . .	60
4.2.13	Grupo 2- Ch . . . . .	60
4.3	A Distribuição Dos Grupos Em Relação às propriedades dinâmicas . . . . .	64
4.4	Conclusão Sobre A Classificação . . . . .	65
4.4.1	Definindo uma nomenclatura . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Conclusões e planos para o futuro</b>	<b>79</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>81</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O Estudo dos pequenos corpos ganha robustez na medida em que mais objetos são descobertos, proporcionando o fortalecimento das bases teóricas que descrevem a evolução do sistema solar. Inserida em tal contextualização, a pesquisa sobre asteroides é extremamente valiosa nas informações acerca do passado e evolução do sistema solar.

Os asteroides podem ser divididos em populações dinâmicas, a maior dessas populações de asteroides está localizada na região entre Marte e Júpiter, denominada de cinturão principal, posição potencialmente relevante, por dentre vários aspectos, a sua posição entre as órbitas dos planetas telúricos e gasosos, o que pode ajudar no entendimento da condição termodinâmica dessas duas classes de planetas ([GRADIE e TEDESCO \(1982\)](#)). Outra população é formada pelos troianos de Júpiter, agrupados em pontos Lagrangeanos da órbita deste planeta. Além dessas populações dinamicamente estáveis, temos aquelas caracterizadas por cruzarem órbitas de planetas, como NEAs (*Near Earth Asteroid*, Asteróides Próximos à Terra) e os Centauros. O aumento de informação sobre tais populações proporciona elementos para modelos de formação do Sistema Solar.

A construção de um mapa composicional dos asteroides se deu a partir de um acúmulo de dados oriundos de técnicas diversas, como a polarimetria, fotometria, espectrometria e etc. A partir de distribuições notáveis de tais dados como a observada em [HAPKE \(1971\)](#) em relação às cores UBV, teve origem um conjunto de trabalhos orientados a organizar e separar os asteroides em classes, segundo parâmetros estabelecidos. Assim, se originou a taxonomia de asteroides, que analogamente à original, das ciências biológicas, busca sistematizar o seu objeto de estudo.

Ao longo do tempo as técnicas de taxonomia variaram, com o surgimento de novas classes. Embora a taxonomia não necessariamente reflita a mineralogia ([BUS e BINZEL \(2002\)](#)), as novas classes representam uma expansão do nosso conhecimento sobre esses objetos, sendo uma abordagem possível, sobre os dados disponíveis.

Inicialmente, grande parte das taxonomias de asteroides foram criadas a partir de dados obtidos a partir de campanhas específicas dedicadas à observação desses corpos. A informação disponível para a classificação de asteroides se expandiu a partir da recuperação de observações de asteroides feitas por grandes campanhas fotométricas em um número restrito de filtros de banda larga ou intermediária, como a campanha SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). No entanto, esse aumento no número de observações tem como preço uma resolução espectral consideravelmente menor que a que vinha sendo utilizada para definir classes taxonômicas. Neste contexto, as campanhas fotométricas J-PLUS e S-PLUS tem o potencial de oferecer um compromisso entre resolução espectral e número de observações, já que são campanhas fotométricas que utilizam uma mistura de 12 filtros de banda intermediária e estreita na faixa visível do espectro. O objetivo deste trabalho é testar até que ponto os dados dessa campanha podem ser usados na definição de taxonomias de asteroides, usando como método a análise de componentes principais e o algoritmo de aglomeração K-means. Deste modo, objetivamos ao fim desse trabalho, obter grupos de asteroides com características espectrais que possam ser de interesse em análises futuras, obtendo uma separação em grupos que correspondam às diferentes características dos espectros.

## 1.2 Sobre O Conteúdo Apresentado

No presente trabalho, buscamos em última instância, a classificação dos dados de asteroides disponíveis, organizando-os em grupos segundo suas semelhanças. Para tal, entendemos ser útil a apresentação de uma discussão relativa à história da taxonomia de asteroides, que apresentamos, com a síntese de alguns trabalhos destacados dentro da área, no **capítulo 2**.

A apresentação mais pormenorizada dos dados utilizados é apresentada no **capítulo 3**, em conjunto com as metodologias aplicadas, visando atingir o resultado desejado. Discutimos também, de maneira breve, algumas abordagens alternativas, descartadas ao longo do processo.

No **capítulo 4**, apresentamos os mais proeminentes resultados obtidos e discutimos acerca da coerência de tais resultados, o que se baseia nas características espectrais dos grupos formados. A partir de tal discussão tentamos atribuir aos grupos obtidos pela classificação uma identificação com grupos obtidos em trabalhos anteriores.

Por fim, o **capítulo 5** se constitui de um texto simples, onde discutimos de forma conclusiva sobre os resultados obtidos.

# Capítulo 2

## Sobre A Taxonomia De Asteroides

### 2.1 Introdução

A taxonomia de asteroides tem seu início demarcado em momentos diversos a depender do autor, como exemplo, [THOLEN \(1984\)](#) que considera que a primeira taxonomia de asteroides foi realizada por [CHAPMAN \*et al.\* \(1975\)](#), para outros como [DEMEO \*et al.\* \(2009\)](#) a taxonomia se inicia em trabalhos anteriores, como o de [WOOD e KUIPER \(1963\)](#). Neste trabalho, adotamos uma interpretação semelhante a de [THOLEN \(1984\)](#), sobretudo pela primazia na classificação de [CHAPMAN \*et al.\* \(1975\)](#) em estabelecer um sistema de nomenclatura com letras, com uma maior sistematização. Apesar de divergências de sobre o que seria taxonomia ou não, a classificação dos dados de asteroides tem sua importância incontestável, sendo a principal fonte de informações composicionais sobre o cinturão principal ([CARVANO \*et al.\* \(2010\)](#)), oferecendo indicações sobre as idades e diferenciação dos asteroides [DEMEO \*et al.\* \(2009\)](#). Com isso, a aplicação de técnicas de classificação aos dados de asteroides disponíveis se justificam como práticas de interesse científico.

Com o objetivo de compreender o progresso estabelecido e a evolução que constituiu a taxonomia de asteroides, neste capítulo, são apresentados resumos de alguns trabalhos relevantes e influentes ao campo, dispostos em ordem cronológica de suas publicações. Claro, dadas as limitações de espaço, tempo e subjetividade da escolha, pode ser, que, a amostra aqui apresentada omita algum trabalho relevante, contudo, buscou-se representar as abordagens metodológicas que construíram a classificação taxonômica de asteroides, fornecendo um panorama sobre a área.

### 2.2 As observações de padrões

A primeira obtenção de cores de asteroides realizou-se por [BOBROVNIKOFF \(1929\)](#), dando início à era das medidas fotográficas, contudo sem a precisão para carac-

terizar os asteroides (BUS e BINZEL (2002)). Na medição fotoelétrica, iniciada nos anos 50, destacam-se a medição feita por KITAMURA (1959), e a medição de cores UBV por KUIPER *et al.* (1958).

A partir da obtenção progressiva de dados de asteroides, estudos possibilitaram a percepção de padrões de distribuição desses objetos em relação a tais dados. Assim, temos a produção de trabalhos que apontam tais padrões de distribuição e precedem aqueles que estabeleceram a taxonomia de asteróides como abordagem dentro da área de estudo de pequenos corpos.

O estudo de propriedades ópticas de asteroides, realizado por HAPKE (1971) apresenta o que podemos considerar uma possível precursoria no que diz respeito à classificação de asteróides, pois, neste, fica evidenciada a separação em três ou quatro grupos de asteroides, em relação aos índices de cores U-B e B-V. Aqui, foram feitas comparações das propriedades ópticas de asteróides com as de meteoritos e da Lua. As propriedades consideradas foram o albedo, os índices de cores UBV, a curva brilho-fase e a curva polarização fase.

Embora, objetivamente, não seja possível denominar essa classificação como uma "taxonomia de asteroides", conforme a interpretação atual, neste estudo, fica evidenciada a separação dos dados por dois parâmetros, onde os quatro grupos receberam uma denominação numérica de um a quatro. Também foi apontada uma correlação da posição no plano U-B V-B, com a presença de ferro metálico, para os meteoritos, o que poderia indicar, considerando-se as objeções inerentes, uma possível informação sobre a constituição superficial de asteróides de acordo com a posição no plano de cores UBV.

No ano de 1973, Chapman e colaboradores efetuaram a medição e classificação de curvas de refletividade de asteróides CHAPMAN *et al.* (1973). A classificação considerou um conjunto de 32 asteróides, com a definição de três tipos de curvas, as do tipo R( *reddish*), avermelhadas; Do tipo M(medium) com o *slope* (inclinação) médio; F(flat) com curvas com baixo *slope*. Também foram examinadas correlações das cores com parâmetros físicos e orbitais dos objetos. Como destaque dessa análise, temos uma possível dependência do *slope* com os valores extremos de diâmetros dos asteróides, já que, os três maiores ( Ceres, Vesta e Palas) apresentam curvas de refletividade planas, enquanto os dez menores apresentam curvas mais avermelhadas.

## 2.3 As classificações taxonômicas

### 2.3.1 Chapman et al. 1975

Com a observação de padrões de distribuição dos pequenos corpos em grupos, em relação aos dados observacionais, a classificação sistemática de asteróides fortaleceu-se com uma sucessão de técnicas com diferentes métodos de classificação.

Em 1975, temos aquela que é entendida como a primeira classificação sistemática de asteróides. Na classificação realizada por [CHAPMAN \*et al.\* \(1975\)](#), realizou-se a divisão em duas classes composicionais C e S, denominados assim, em analogia aos carbonáceos condritos e os *stony irons*. Os parâmetros considerados foram *DEPTH* ( a profundidade de banda, definida como a reflectância na parte inferior da banda dividida pela maior reflectância em comprimentos de ondas inferiores ao da banda);  $p_{min}$  ( o mínimo da curva de polarização versus ângulo de fase); R/B ( a reflectância em  $0.4\mu m$  dividida pela reflectância em  $0.7\mu m$ ); O índice de cor B-V, o albedo  $p_v$ , os limites são resumidos na **tabela 2.1**. Foram considerados dados de um total de 110 asteróides, destes 10 não puderam ser identificados com os dois grandes grupos receberam a denominação U (*unclassified*), não classificado. Uma importante conclusão a partir desta análise advém da observação acerca da distribuição de asteróides em relação ao semieixo maior, onde, percebe-se uma concentração maior de objetos do tipo C na região exterior do cinturão principal. Para tal fato, são propostas diferentes possibilidades que as expliquem, desde uma inhomogeneidade da distribuição de matéria da nebulosa solar, propiciando uma formação de carbonáceos no exterior do cinturão, até razões colisionais específicas desta região.

### 2.3.2 Zellner e Gradie 1976

No ano de 1976, temos a classificação efetuada por [ZELLNER e GRADIE \(1976\)](#), a partir da polarimetria para 94 asteroides. Da análise 48 objetos foram classificados como S, 34 como C, 5 como M e 2 como E e cinco pertencendo à classes não determinadas. Além disso, os autores analisaram a distribuição dos objetos relativamente a outros parâmetros ( além de  $p_{min}$ , mínimo da curva polarização-fase), como o índice de cor B-V o albedo e o parâmetro espectrofotométrico **BEND**(medida da curvatura do espectro entre  $0.40$  e  $0.73\mu m$ ).

### 2.3.3 Zellner e Bowell 1977

No ano de 1977, [ZELLNER e BOWELL \(1977\)](#) realizaram uma classificação taxonômica baseada em um conjunto de cores, dados de espectrofotometria, radiometria e polarimetria. A amostra continha dados relativos a 359 asteroides que foram divididos em 6 classes: C, S, M, O, E e T. Além disso, há os não identificados em qualquer classe, nomeados U.

Uma análise apresentada neste trabalho, concerne à distribuição em relação ao diâmetro para as diferentes classes, os resultados mostraram que asteroides maiores (superiores a 50 km), em sua maioria pertencem à classe C (75 por cento), com uma proporção menor sendo das classes S (5 por cento) e M ( 3 por cento). Uma análise de distribuição também foi realizada relativamente à distribuição em relação à distância solar, que demonstrou a mesma tendência apontada por [CHAPMAN \*et al.\* \(1975\)](#) de objetos do tipo

Tabela 2.1: Tabela dos intervalos parâmetros ópticos que definem as classes composicionais C e S de **Chapman et al. (1975)**.

Parâmetros	C	S
DEPTH	sem informação	$0.79 > DEPTH \leq 0.95$
$P_{min}$	$P_{min} > 1.1$	$0.4 < P_{min} < 1.0$
R/B	$R/B \leq 1.35$	$1.35 \geq R/B < 2.3$
B-V	$B-V \leq 0.77$	$B-V \geq 0.77$
$p_v$	$p_v \leq 0.09$	$p_v \geq 0.9$

S se concentrarem predominantemente nas regiões centrais e interior do cinturão, do tipo C na região central e exterior, com outros tipos se distribuindo predominantemente na região central.

### 2.3.4 **Bowell et al. 1978**

A classificação taxonômica realizada por **BOWELL et al. (1978)**, se realizou a partir da separação dos asteróides em grupos, com base em limites de valores obtidos para sete parâmetros observacionais. Os parâmetros utilizados na classificação foram as cores B-V e U-B, o índice polarimétrico  $P_{min}$ , a proporção de cores R/B, os parâmetros espectrofotométricos Bend e Depth, e o albedo geométrico  $p_v$ . Devido à ausência de dados relativos a alguns parâmetros para determinados asteróides, há a possibilidade de indefinição na classificação de alguns destes objetos .

Neste trabalho, foram definidas cinco classes taxonômicas C, S, M, E e R. A última tratando-se de uma adição em relação à classificações precedentes, como uma tentativa de contemplação de objetos com cores UBV mais avermelhadas. Além destas, há uma sexta designação U, para objetos que não se enquadrem em nenhuma das cinco classes.

Analisando um total de 523 objetos, os autores obtiveram a classificação de 190 como do tipo C, 141 como do tipo S, 13 como do tipo M, 3 como do tipo E e 55 como do tipo U. Além destes, 118 tiveram classificação ambígua, devido à insuficiência de dados.

Outra abordagem realizada, neste trabalho, concerne à comparação com dois diferentes esquemas de taxonomia, precedentes. A comparação realizada foi em relação às classificações de **CHAPMAN et al. (1975)** e **GAFFEY e MCCORD (1977)**, com resultados, que, na visão dos autores, valida o esquema de classificação CSM, dada a congruência das maiorias dos objetos em grupos semelhantes das três classificações.

### 2.3.5 **Gradie E Tedesco 1982**

**GRADIE e TEDESCO (1982)** utilizaram dados oriundos de espectrofotometria de oito filtros em um intervalo de comprimento de onda de  $0.30\mu m$  a  $1.1\mu m$  e albedos obtidos a partir de radiometria em  $10.0\mu m$  e  $20.0\mu m$ . A pesquisa teve foco, sobretudo,

na análise da distribuição das composições em relação ao semieixo maior e se utilizou de uma amostra de 1373 asteroides.

Os tipos classificados pela pesquisa são C, S, M, F, P, D, R, E, U. Os tipos são segmentados por faixas em relação aos valores de albedo e reflectância: C possui baixo albedo e espectro plano, em alguns casos com leve característica em  $0.4\mu m$ ; S possui albedo moderado e avermelhamento com uma banda de absorção típica em 0.9 a  $1.0\mu m$ ; M possui albedo moderado, com espectro sem característica e avermelhado; F possui baixo albedo e espectro plano; P apresenta baixo albedo e espectro similar ao do tipo M; D tem baixo albedo; R tem albedo muito alto com espectro muito avermelhado, possui bandas mais profundas que da classe S; E apresenta albedo muito alto e um espectro plano ou inclinado no vermelho; U possui albedo muito alto sem característica plano ou avermelhado, constitui o grupo dos asteroides não classificados.

Em termos da análise de distribuição em relação ao semieixo maior, os resultados obtidos foram usuais, com a concentração dos asteroides do tipo S na região interior do cinturão principal e do tipo C na região exterior, o esperado por modelos de composição do sistema solar.

### 2.3.6 Tholen 1984

A tese de doutorado de THOLEN (1984) apresenta a classificação de 405 espectros de asteroides do ECAS (*eight color asteroid survey*, sendo amplamente influente na taxonomia de asteroides, sobretudo, pela inserção de conceitos metodológicos inéditos ao campo.

A classificação de Tholen, sob o contexto da utilização de 8 filtros, utilizou como principal parâmetro, sete cores dos 405 asteroides. Dada a natureza dos dados, possuindo alta correlação para alguns pares de variáveis, o trabalho apresenta uma técnica de redução de dimensionalidade com sua primeira aplicação à ciência de asteroides, A **Análise de componentes principais (ACP)**. A técnica permite a obtenção de novas variáveis, as componentes principais, possibilitando a redução do escopo da análise a apenas duas variáveis, a primeira e a segunda componentes principais, sem perda significativa de informação. Posteriormente à técnica de redução, Tholen aplicou uma técnica de análise de agrupamento, separando os dados relativos aos asteroides em diferentes grupos, constituindo assim, as diferentes classes taxonômicas.

O método de agrupamento utilizado, neste trabalho, *minimal-tree method* (método da árvore mínima, em uma tradução literal) se baseia em ligar objetos, em relação ao plano de componentes principais, de modo que as distância entre os objetos ligados seja mínima e que as linhas que os ligam não se cruzem **figura 2.1**. Posteriormente, as maiores linhas são cortadas, determinando os grupos formados.

A classificação de Tholen dividiu os asteroides em 14 classes: A, B, C, D, E, F,

G, M, P, Q, R, S, T, e V. Para alguns espectros degenerados, ou seja, espectros muito semelhantes para asteroides diferentes, utilizou-se como diferenciador de classe o albedo, quando tal parâmetro estava disponível.

Na discussão concernente aos espectros, as 14 classes podem ser divididas em quatro grupos com espectros médios semelhantes, os de espectros sem características de absorção formados pelas classes C, B, F e G; os mais avermelhados das classes D, T e EMP, com os últimos constituindo três classes de espectro degenerados, distinguíveis somente pelo albedo, com a classificação X sendo usada quando o albedo não é conhecido.; os espectros das classes S e A, que se caracterizam pela inclinação elevada até a proximidade de  $0.70\mu m$  com queda acentuada posterior a este ponto; por fim, temos o grupo formado pelos espectros mais peculiares, constituído pelas classes V, Q, e R, cada uma dessas formada por um asteroide cada, Vesta, Dembowska e Apolo, respectivamente. Os espectros desses objetos se caracterizam pelas mais profundas bandas centradas em  $1.0\mu m$ .

A abordagem de Tholen sobre os dados repercutiu sobre as futuras taxonomias de asteroides, tanto pela metodologia de classificação, como pela procura de manutenção de correspondência com as classes obtidas neste trabalho.

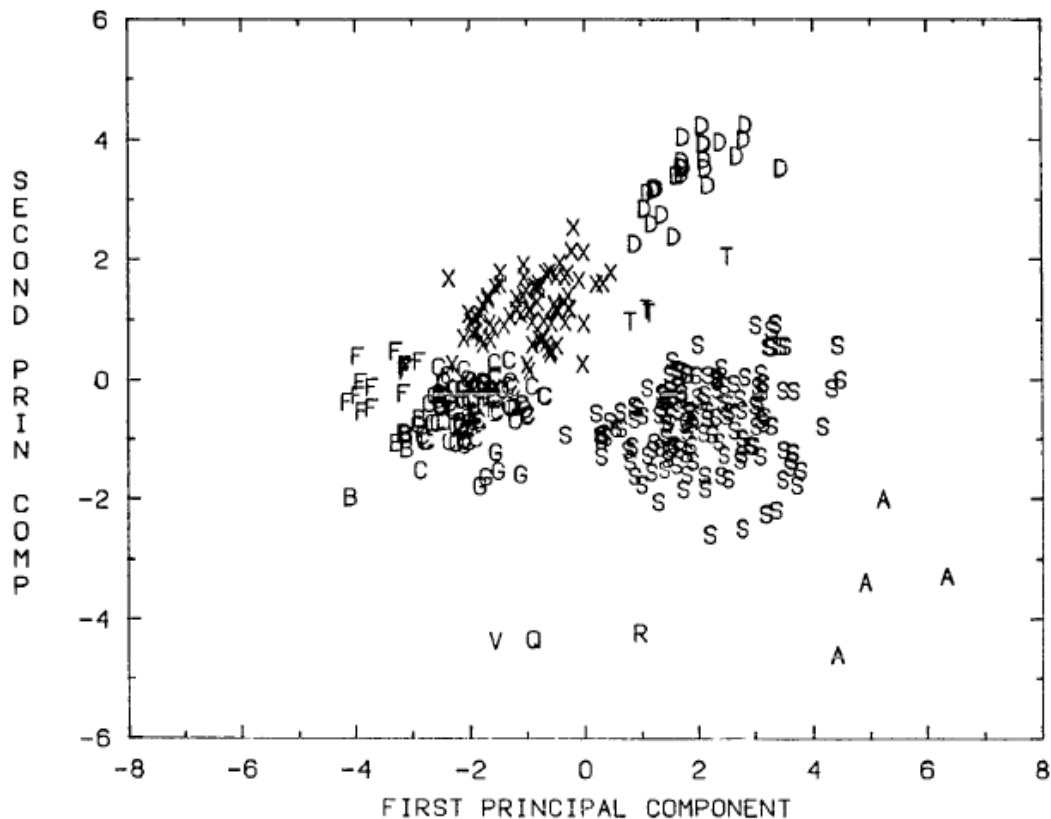


Figura 2.1: Distribuição das classes da taxonomia de Tholen em relação às duas primeiras componentes principais. Fonte: [THOLEN \(1984\)](#).

### 2.3.7 Barucci et al. 1987

A análise promovida por [BARUCCI et al. \(1987\)](#) pode ser interpretada como uma nova abordagem do trabalho de Tholen, pois utiliza a mesma base de dados de 8 cores, com albedos fornecidos pelo IRAS ( *Asteroid and Comet Survey* ). Nessa classificação, os dados cobriram 487 asteroides que foram divididos em 9 classes: A0, B0, C0, D0, E0, G0, M0, S0, V0. Três classes possuem gradações relativas ao valor de albedo, B0-B3, S0-S3, D0-D3.

No que concerne à metodologia, Barucci se utiliza de uma técnica estatística chamada *G-mode*, que, a partir de sucessivas transformações, torna os dados multivariados em dados univariados e com uma distribuição quase gaussiana; os grupos são obtidos a partir de teste de ajuste a uma distribuição normal. Para detalhes matemáticos mais aprofundados sobre a técnica vide [CORADINI et al. \(1977\)](#). Como resultado da aplicação desta técnica, os grupos se dividiram em 22 na classe 4 A, B, 180 C, 33 D, 4 E, 4 G, 146 S e 3 V.

No referente às características espectrais de cada grupo, temos as mesmas que são representativas na classificação de Tholen.

Como conclusão da classificação, chegou-se à uma congruência quase completa entre às classes de Barucci e de Tholen, com as subdivisões dessas classes.

### 2.3.8 Bus e Binzel 2002

A taxonomia de [BUS e BINZEL \(2002\)](#) mantém correspondências com a realizada por [THOLEN \(1984\)](#), contudo, possui especificidades que visam compreender a natureza dos dados obtidos pelo SMASSII (*Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey*), com isso, novas classes foram estabelecidas, totalizando um conjunto de 26.

Em termos de nomenclatura, a classificação de Bus e Binzel tem 12 classes com nomenclatura idênticas as de Tholen, sendo: A, B, C, D, K, O, Q, R, S, T, V. Como adição, há uma nova classe denominada L, para contemplar um conjunto de objetos cujos espectros apresentam alto *slope* próximo a  $0.75\mu m$  e são planos para valores maiores de comprimento de onda. Além dessas classes, representadas por uma única letra, temos aquelas que apresentam características espectrais intermediárias, possuindo uma segunda letra: Cb, Cg, Cgh, Ch, Ld, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr, Xc, Xe, e Xk.

A técnica de classificação Bus-Binzel se utiliza de três parâmetros, chamados de componentes espectrais, sendo a primeira o *slope* espectral, definido como a inclinação da reta de ajuste aos pontos de reflectância, forçada a ter o valor de 1 em  $0.55\mu m$ , a segunda e a terceira definidas a partir de valores de componentes principais (*scores*, definidos a partir da análise de componentes principais, pc2 e pc3, respectivamente (PCA)). A segunda componente (pc2) é sensível à banda  $1.0\mu m$ , característica da presença de Olivina/Piroxênio. Já a terceira componente espectral (pc3) seria mais útil na separação de

objetos com bandas acentuadas em  $0.7\mu m$  relacionada à presença de minerais hidratados, responsável por caracterizar as classes Ch e Chg.

A classificação apresenta três grandes grupos com características espectrais mais proeminentes, possuindo subdivisões resultantes de características mais específicas, ou intermediárias entre os diferentes grupos. Esses grupos, chamados de complexos, são os complexos S, C e X. Os espectros dos asteroídes do complexo S apresentam *slope* de moderado a alto próximo a  $0.7\mu m$ , com alguns espectros se mantendo planos, após esta região, ou apresentando queda, geralmente associada a banda  $1.0\mu m$ . Já o complexo C se caracteriza por um espectro predominantemente plano após  $0.4\mu m$ , englobando asteroides das classes C, B, G e F de Tholen. Os espectros dos objetos do complexo X se caracterizam por se apresentarem predominantemente sem característica de absorção, mas geralmente, mais avermelhados em relação aos espectros do complexo C. Além disso, os espectros mostram uma não uniformidade, com alguns asteroides apresentando maior ou menor curvatura em algumas regiões dos espectros.

Além dos espectros que definem os três complexos, o trabalho apresenta um conjunto de classes cujas características são diversas dos grupos C, X e S. Essas classes, chamadas de periféricas, se constituem das classes T, D, Ld, O, e V. A classe V é a classe caracterizada por espectros similares ao do asteróide Vesta que apresenta forte banda centrada em  $1.0\mu m$ . Os asteroides do tipo T e D apresentam alto *slope* próximo a  $0.75\mu m$  e se tornam menos íngremes em direção ao infravermelho. Os espectros do tipo O apresentam banda característica acentuada em  $1.0\mu m$ , com uma curva menos inclinada, anteriormente ao início da queda da reflectância em  $0.70\mu m$ . As formas dos espectros das classes estão resumidas na **figura 2.2**.

Como resultado geral, a classificação Bus-Binzel resultou na associação de 1443 objetos do SMASSII às diferentes classes, sendo a mais ampla taxonomia de asteroides, quando de sua realização. Em consequência, esta classificação tornou-se basilar para trabalhos que a sucederam, na taxonomia de asteroides.

### 2.3.9 Roig e Gil-Hutton 2006

O trabalho de ROIG e GIL-HUTTON (2006) apresentou a classificação de dados do SDSS com objetivo de identificar potenciais objetos do tipo V. O *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* é um levantamento dedicado a observar galáxias e quasares de 1998 a 2009, cobriu 14,500 graus quadrados do céu, com cinco filtros  $u'$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$ ,  $z'$  centrados em 355.1, 468.6, 616.5, 748.1 e 893.1 nm). A partir deste levantamento produziu-se o catálogo MOC ( *Mooving Object Catalog*) onde são reunidos dados relativos a objetos com movimento, potenciais asteroides.

Foram considerados dados de 43424 asteroides, no caso as reflectâncias e albedos. A

metodologia se baseou na aplicação de ACP ( Análise de Componentes Principais) para, analisando o espaço das componentes principais, identificar a localização de diferentes tipos e a partir de restrições encontrar os asteroides do tipo V.

Como resultado, foram encontrados 499 do tipo V, muitos deles (263) em regiões fora da localização relativa à família dinâmica de Vesta. A partir dos objetos apontados se entende que são necessárias observações espectroscópicas para a identificação definitiva.

### 2.3.10 Demeo et al. 2009

A taxonomia realizada por [DEMEO et al. \(2009\)](#) se utiliza de uma metodologia semelhante à implementada por [BUS e BINZEL \(2002\)](#), porém, com uma classificação de dados compreendidos em outro intervalo de comprimento de onda, de 0.45 a 2.45 $\mu\text{m}$ , enquanto, na classificação de Bus os dados foram obtidos no intervalo de 0.435 a 0.925 $\mu\text{m}$ . Deste modo, a classificação de Demeo constitui-se, em certa medida, de uma extensão da metodologia de Bus para o infravermelho próximo, com a inclusão de uma proposta de metodologia adequada a dados em que apenas dados nesse intervalo de comprimento de onda (0.85 a 2.45 $\mu\text{m}$ ) estejam disponíveis.

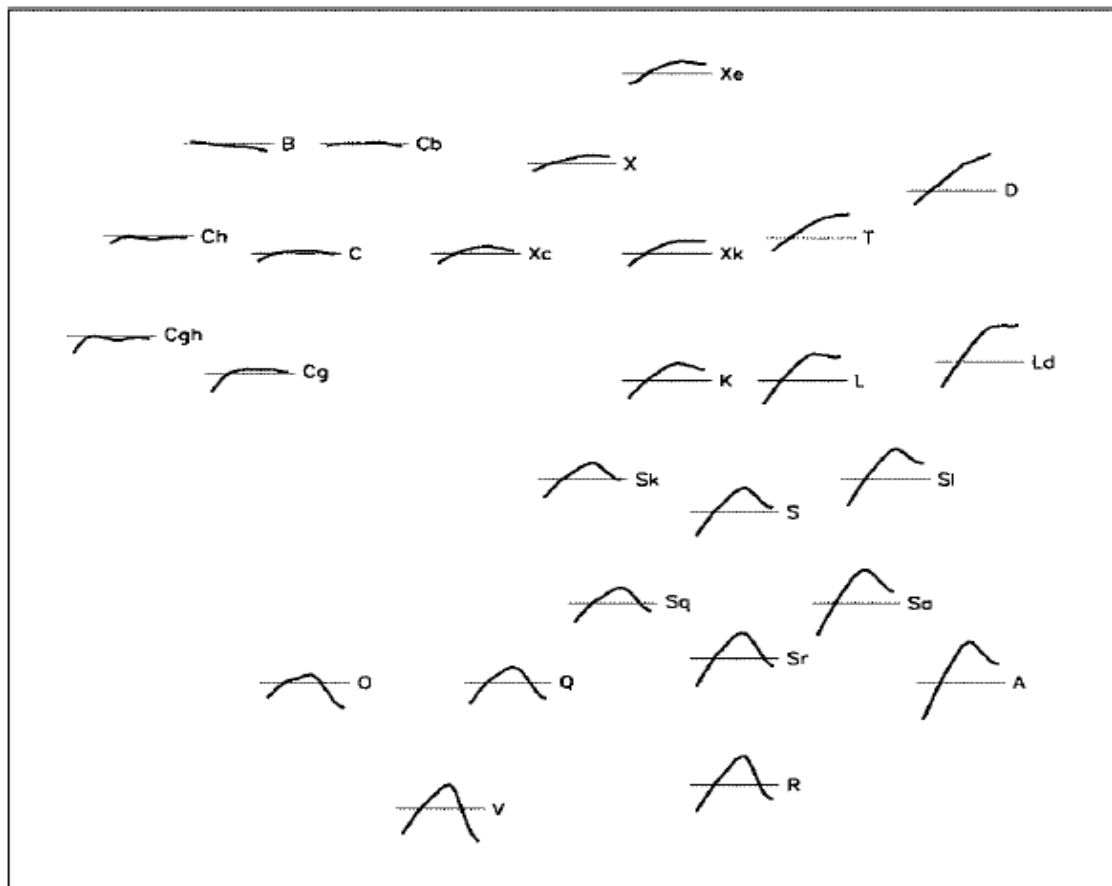


Figura 2.2: Chave contendo o espectro médio das 26 classes de Bus. Fonte: [BUS e BINZEL \(2002\)](#).

Os dados de analisados são espectros de reflectância da SMASSII, em conjunto com espectros provenientes do IRTF (*Infrared Telescope Facility*), um telescópio da Nasa otimizado para o infravermelho. Como dito, pela continuidade da abordagem em relação à taxonomia de Bus, a taxonomia Bus-Demeo também se baseia na análise de componentes principais. Contudo, nesta metodologia, houve a remoção do slope, antes da aplicação da análise de componentes principais sobre os dados, tendo uma atenção orientada para outras características; método justificado, no entanto, pela correlação acentuada entre o slope e a primeira componente principal.

Relativamente à nomenclatura, essa nova taxonomia mantém quase todas classes estabelecidas na taxonomia de Bus, mas com número de classes sendo alterado de 26 para 24, a partir da eliminação de 3 classes (Sl, Sks, Ld) e da adição de uma nova (Sv).

No que tange às características espectrais dos grupos, temos uma reprodução das características dos grupos de Bus, ao menos no intervalo considerado pela taxonomia anterior. Nesta classificação, os grupos podem ser divididos em quatro conjuntos onde os espectros médios apresentam característica semelhantes. Inicialmente, temos os "membros finais" formados pelas classes O, Q, R, e V, que apresentam forte banda em  $1.0\mu m$ . As quatro classes também apresentam característica de absorção em  $2.0\mu m$ , contudo, com algumas diferenças. Enquanto a classe V apresenta uma característica de absorção em  $2.0\mu m$  mais profunda, a classe Q tem a característica de absorção menos acentuada, nesta região. A classe O apresenta característica de absorção mais larga em  $2.0\mu m$ , já a classe R se destaca pelo avermelhamento.

As classes S, Sa, Sq, Sr e Sv formam o complexo S, que se caracteriza pela absorção em  $1.0\mu m$ . As classes desse complexo se diferenciam, sobretudo, pela profundidade e largura da de absorção em  $1.0\mu m$ , com Sq apresentando a banda mais larga, enquanto Sv apresenta a banda mais profunda.

Os objetos dos complexos C e X, podem ser compreendidos em conjunto pela ausência de característica de absorção ao longo de todo espectro, contudo, a característica que os distingue é o slope, sendo positivo e maior para o grupo X, após  $1.1\mu m$  e menor para outros grupos e chegando a ser negativo para o grupo B.

As outras classes que apresentam características muito peculiares em seus espectros, são as classes D, K, L e T. A classe D apresenta espectros com mais alto *slope*, sem apresentar banda de absorção. A classe T apresenta um espectro sem banda, com um slope mais moderado. As classes L e K têm espectros que se assemelham em certas características ao complexo S, na classe L temos ausência de bandas características, enquanto, na classe K temos uma larga banda de absorção em  $1.0\mu m$ .

Um importante tema tratado no trabalho de Demeo, consiste na proposição de um método de classificação taxonômica, quando, somente os dados de infravermelho próximo estejam disponíveis. Para tal, no trabalho, realizou-se uma classificação utilizando os mesmos dados da classificação original, no intervalo para comprimentos de onda maiores

que  $0.85\mu m$ . No entanto, a análise sobre tal intervalo fornece, somente, um indicativo das classes, já que, algumas características definidoras estão presentes somente no visível.

### 2.3.11 Carvano et al. 2010

No ano de 2010, temos um esquema de classificação orientado para dados oriundos do SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) CARVANO *et al.* (2010). O SDSS oferece cores obtidas por fotometria em larga escala, diferentemente dos dados da espectroscopia do SMASSII, utilizados na taxonomia de BUS e BINZEL (2002). Dadas as peculiaridades das observações, consideradas sensíveis às incertezas nas magnitudes, foi formulado um esquema de classificação que levasse em conta tal fato. Assim, tal classificação estabelece limites para o gradiente de cor de reflectância (parâmetro derivado dos valores de reflectância em diferentes filtros), a partir de objetos previamente classificados, determinando a classe. Cada objeto é associado a uma classe a partir da probabilidade de que sua medida de gradiente de cor de reflectância esteja dentro do intervalo da classe. A distribuição de probabilidades para cada gradiente de cor de reflectância foi calculada como uma distribuição normal, assim, a probabilidade de que uma medida esteja dentro de um limite de classe é a área sob o gráfico da densidade de distribuição que cai sobre este limite.

A classificação definiu 9 classes, nomeadas  $V_p, O_p, Q_p, S_p, A_p, L_p, D_p, X_p$ , e  $C_p$ , onde, o subscrito "P" indica os dados obtidos a partir da fotometria. Como o método de classificação atribui uma classe a uma observação, desde que, esta tenha 60 por cento das probabilidades da soma das probabilidades para todas as classes, algumas observações que não atinjam tal requerimento recebem letras múltiplas. Como resultado da classificação foi obtida a seguinte divisão do número de asteroides para cada classe: 17764 para  $C_p$ ; 3558  $X_p$ ; 2580  $D_p$ ; 4815  $L_p$ ; 15581  $S_p$ ; 410  $A_p$ ; 2818  $V_p$ ; 3296  $Q_p$ ; 63  $Q_p$ ; 2284  $CX_p$ ; 484  $XD_p$ ; 615  $DL_p$ ; 5151  $LS_p$ ; 145  $SL_p$ ; 256  $SV_p$ ; 2394  $SQ_p$ ; 362  $QV_p$ .

Tratando-se dos espectros, temos características comuns às classes correspondentes na taxonomia de Bus. Podemos sumarizar assim as principais características dos grupos: A classe  $D_p$  não apresenta Banda de absorção, com grande inclinação positiva por toda sua extensão;  $L_p$  têm inclinação elevada até a região de  $0.5\mu m$ , onde diminui e se planifica;  $X_p$  e  $C_p$  compartilham semelhanças, com espectro sem queda, com  $X_p$  tendo uma inclinação maior na parte final;  $S_p, A_p, V_p, O_p, Q_p$ , são os espectros caracterizados por queda de reflectância, sendo mais acentuada nos três últimos.

Como resultado final, as classificações foram comparadas em relação às classificações obtidas com espectroscopia. Os resultados demonstraram uma compatibilidade consistente com a classificação de Bus.

### 2.3.12 Carry et al. 2016

A classificação realizada por [CARRY et al. \(2016\)](#) foi mais uma a utilizar dados de fotometria obtidos a partir do SDSS, mas desta vez, a análise se concentrou sobre os NEAs (*Near-Earth Asteroids*) e os *Mars-crossing asteroids*. Aqui foi usada uma metodologia que buscou ser compatível com a de [DEMEO et al. \(2009\)](#), contudo, os limites de valores dos parâmetros para definição de cada classe foram determinados manualmente, assim como em [DEMEO e CARRY \(2013\)](#). Os parâmetros escolhidos na classificação foram o *slope* através dos filtros  $g'$ ,  $r'$ , e  $i'$  e a cor  $z'-i'$ .

Dada a limitação da resolução espectral, algumas classes foram agrupadas em largos complexos. a classificação foi feita tanto para objetos identificados em três bandas ( $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$ ) como para os identificados em quatro ( $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$ ,  $z$ ), sendo a última a mais precisa. Para quatro bandas foram classificados um total de 982 NEAs e MCs <sup>1</sup>, para um total de dez classes: A, B, C, D, K, L, Q, S V e X. Além dos objetos que não puderam ser identificados, classificados com U.

Um outro foco relevante nesse trabalho foi a análise dos efeitos de encontros planetários nas superfícies de asteroides. Utilizando um modelo de forças sobre uma superfície granular e integração numérica, concluíram que as distâncias para que alterações superficiais relevantes ocorram variam de 2 a 10 raios planetários para encontros com Vênus, Terra e Marte. Também, para as classes S e Q foram comparados as ocorrências de encontros dentro destes limites. Asteroides da classe Q têm mais encontros com com Vênus e Terra que a classe S, enquanto em relação a Marte ambas as classes têm encontros que podem alterar a superfície estatisticamente equivalente.

### 2.3.13 Mahlke et al. 2022

O trabalho de classificação realizado por [MAHLKE et al. \(2022\)](#) consistiu da análise de um conjunto de 2125 asteroides. Como conjunto de dados foram utilizados espectros no visível e infravermelho, além do albedo. As fontes para para os espectros do SMASS e do MITHNEOS (*MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey*). Já os albedos foram obtidos do SsODNet (*IMCCE's Solar system Open Database Network*).

A metodologia utilizada, nessa taxonomia, foi a análise fatorial, técnica estatística que considera que variáveis não observadas são responsáveis pelas covariâncias nas variáveis observadas. Para classificação utilizaram um modelo probabilístico em vez de uma determinação definitiva das classes.

Os asteroides foram divididos em 17 classes que compõem três complexos C, S e M. O complexo C apresenta um espectro com avermelhamento na região visível com a redução

---

<sup>1</sup>No citado trabalho de Carry et al. 2016, não é explicitada, em nenhum momento do artigo, a divisão dos asteroides relativamente às classes. Cita-se uma tabela com as classificações para os asteroides, contudo, ela não é acessível através de qualquer link, nem está presente no texto.

da reflectância após este intervalo, resultando em um formato côncavo. O complexo S apresenta bandas de absorção moderadas em  $1\mu m$  e  $2\mu m$ , e um *slope* de neutro a elevado em direção ao infravermelho. O complexo M apresenta um *slope* positivo com bandas leves próximo a  $0.9\mu m$  e  $1.9\mu m$ .

A divisão de asteroides para as 17 classes resultou em: A 32, B 45, C 221, Ch 107, D 82, E 46, K 42, L 58, M 142, ) 2, P 135, Q 107, R 10, S 898, V 142, X 33 e z 23. Tais classes, são apresentadas no texto desse trabalho, na figura 2.2, onde temos um quadro da evolução das classes em comparação com as classes presentes no trabalho de THOLEN (1984) e de BUS e BINZEL (2002).

## 2.4 Classificações taxonômicas: Atualidades tecnológicas

Após o a observação da síntese de alguns trabalhos, que representam parte da evolução da taxonomia de asteroides, cumpre refletir acerca de possíveis caminhos da área, com a observação de alguns trabalhos recentes. Neste sentido, um possível direcionamento a se notar nestes trabalhos, é a ênfase em metodologias de classificação de um número mais amplo de dados, o que contrasta com o contexto geral das taxonomias de asteroides, marcadas por uma escassez. Assim, uma tendência de abordagem que podemos especular para as taxonomias futuras, são classificações mais automatizadas, que possibilitem classificar um número grande de objetos.

Além do aumento numérico de dados, podemos ter um aumento da informação em direção ao infravermelho, cenário que demanda a elaboração de novas metodologias de classificação, para se encontrar características pertinentes nos espectros, em um novo intervalo de comprimento de onda, ainda inexplorado.

Neste contexto, com o objetivo de tratar de dados de maneira automatizada, e que se estendam ao infravermelho, mais especificamente, oriundos da missão Gaia, foi testado por PENTTILÄ *et al.* (2021) um método de classificação taxonômica utilizando-se de redes neurais para classificar de maneira automática espectros, tendo como parâmetro a taxonomia de Bus. Neste caso, os autores utilizaram dados que simulam dados de Gaia para testar a eficácia das redes neurais em realizar tal classificação. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, credenciando, possivelmente, as redes neurais como alternativa de abordagem aos dados de Gaia e de campanhas semelhantes.

PENTTILÄ *et al.* (2022) realizou uma classificação de dados simulados, a partir de redes neurais para outro futuro projeto, o *Legacy Survey of Space and Time (LSST)*, que funcionará entre 2025 e 2028. A eficácia da classificação foi mais uma vez avaliada a partir da comparação da classificação Bus-demeo para os espectros, com o resultado obtido pelas redes neurais. Neste caso, a eficácia da classificação foi de 90 por cento.

Tholen		Bus-DeMeo		This work
B	→	B	→	B
F	↗			
G	→	Cg	↘	
	→	Cgh	↘	
C	→	C	→	C
	→	Ch	→	Ch
	→	Cb	↗	
D	→	D	→	D
			→	Z
P	...	Xc	...	P
M	...	Xk	...	M
X	...	X	...	X
E	...	Xe	...	E
	...	Xn		
T	→	T		
		K	→	K
		L	→	L
Q	→	Q	→	Q
		Sq		
	↗	Sr	↘	
S	→	S	→	S
	↘	Sa	↗	
		Sv		
O	→	O	→	O
R	→	R	→	R
A	→	A	→	A
V	→	V	→	V

Figura 2.3: Tabela mostrando a evolução das classes a partir das taxonomias de Tholen e Bus-DeMeo até a classificação de MAHLKE *et al.* (2022), que aparece na terceira coluna "This work". As setas indicam a evolução das classes. Fonte: MAHLKE *et al.* (2022)

Também objetivando a análise sobre futuros dados da missão Gaia, CELLINO *et al.* (2020) classificou 10000 espectros simulados, com a técnica não supervisionada, **k-means**. A classificação, na análise dos autores, garante a utilização de seu método, para os dados da missão em questão. A classificação chegou em 12 grupos, obtendo uma divisão consistente com as classes atribuídas aos asteroides em classificações anteriores.

Uma ferramenta, talvez mais sedimentada na ciência de asteroides que as redes

neurais, é o aprendizado de máquina supervisionado. Sob a perspectiva da utilização destas ferramentas sobre um conjunto grande de dados, [KLIMCZAK et al. \(2022\)](#) apresentam testes sobre cinco diferentes métodos de aprendizado de máquina supervisionados, buscando o mais adequado a tal propósito. Utilizando-se de métricas diversas, avaliou-se a eficácia das cinco diferentes técnicas em classificar os asteroides, segundo o método Bus-Demeo. Sendo, neste caso, a mais fundamental constatação, a variação nos resultados de classificação a depender do método escolhido. O que exemplifica, que, a despeito da automaticidade procurada, ainda se faz necessária a interpretação de quais métodos se aplicam melhor ao dados disponíveis.

Um direcionamento possível dos trabalhos que se utilizam de aprendizado de máquina na classificação de asteroides, são aquelas que visam construir classificações de espectros a partir dos espectros de meteoritos obtidos em laboratório. Como exemplo, [DYAR et al. \(2023\)](#) classificou asteroides a partir de diferentes métodos de aprendizado de máquina supervisionado: *support vector machine, logistic regression, kernel fisher discriminant analysis e quadratic discriminant analysis*. Os dados para treino foram 1422 espectros de meteoritos obtidos da base RELAB, da universidade de Brown, com resultados aplicados a 605 espectros de asteroides. Neste estudo, não se encontrou diferença significativa entre as quatro técnicas, no que concerne a classificar os espectros de asteroides, a partir de seus correlatos nos espectros de meteoritos.

A partir do observado com o histórico das classificações de asteroides, podemos notar, conclusivamente, mudanças nas tendências de abordagens ao longo dos anos, começando por uma classificação por intervalos de valores [CHAPMAN et al. \(1975\)](#) a uma classificação baseada na análise de agrupamento a partir de [THOLEN \(1984\)](#). Além disso, em termos dos dados disponíveis, dada a dificuldade em obter medidas espectroscópicas, grandes *surveys* que não são orientados a pequenos corpos são fontes para classificações ([PENTTILÄ et al. \(2021\)](#)), o que impulsiona a utilização de métodos computacionais de classificações orientados a muitos dados.

Outra elemento a se notar na evolução das classificações de asteroides concerne ao número de classes, do início de duas classes na classificação de [CHAPMAN et al. \(1975\)](#) para as 26 na de [DEMEIO et al. \(2009\)](#), e apesar das classificações divergentes para alguns objetos iguais, o acréscimo de novas classes não resultou na invalidação de classificações pregressas, ao contrário, a recuperação de classes por autores a partir de técnicas diferenciadas sugerem que as taxonomias fornecem informação real sobre os espectros dos asteroides ([CARVANO et al. \(2010\)](#)). Por isso, a busca por essa informação se justifica, tanto por seu passado, quanto por sua atualidade.



# Capítulo 3

## Dados e Metodologia

### 3.1 A campanha fotométrica J-PLUS

A campanha **J-PLUS** (**Javalambre Photometric Local Universe Survey**) é uma campanha fotométrica inicialmente planejada com o objetivo de calibração da campanha **J-PAS** (**Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey**). As observações da campanha J-PLUS são feitas no Observatório Astrofísico de Javalambre, localizado em Teruel, Espanha, utilizando o telescópio JAST/T80, que tem uma abertura de 80 cm equipado com um CCD de 9216 X 9232 pixels, resultando e um campo de visda de  $2.0 \text{ deg}^2$ . A campanha foi projetada para cobrir  $8500 \text{ deg}^2$  do céu setentrional usando um conjunto de 12 filtros, e tem como objetivo primário definir a distribuição espectral de energia (SED, sigla em inglês) de um conjunto de estrelas a serem utilizadas na calibração dos dados a serem obtidos na campanha J-PAS ([CENARRO \*et al.\* \(2019\)](#)). O conjunto de filtros inclui 5 filtros de banda intermediária compatíveis com o sistema de filtros da campanha SDSS (Ibid.) e 7 filtros de banda estreita. As curvas de transmissão dos filtros usados na campanha J-PLUS são mostradas na Figura 3.1. As observações da campanha J-PLUS são feitas com três exposições subsequentes por filtro, de forma que cada posição de apontamento no céu é coberta com 36 exposições em um tempo total de 30-60 minutos, dependendo das condições do céu. A sequência de observação, tempo mediano das exposição individuais usados para os filtros são mostrados na tabela 3.1

A partir do conjunto de asteroides detectados, foram obtidos espectros de reflectância, que, em alguns casos, não são compatíveis com as classes taxonômicas conhecidas. Tal fato é resultado dos efeitos da rotação desses objetos, afetando seus brilhos e aumentando as incertezas sobre as medidas. Com o intuito de recuperar os espectros de reflectância com grande ruído, foi desenvolvido e aplicado por um algoritmo genético para a reconstrução de tais espectros. Deste modo, os dados utilizados na análise do presente trabalho são, justamente, espectros de reflectância reconstruídos por este algoritmo. Na

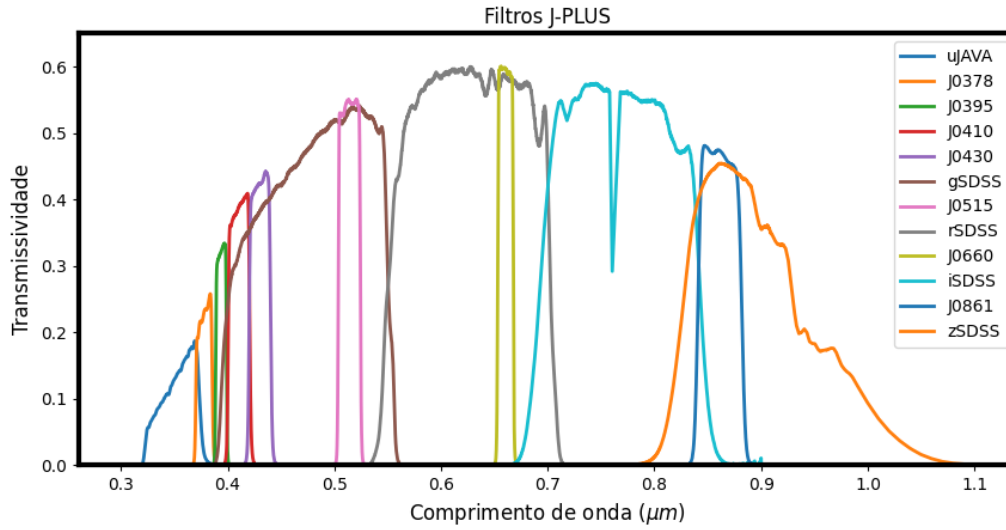


Figura 3.1: Curva de transmissão dos filtros da campanha J-PLUS, convoluídas com a eficiência quântica do detector

Tabela 3.1: Sequência de observação, tempos de exposição medianos e comprimentos de onda centrais da campanha J-PLUS.

Filtro	tempo de exposição (s)	comprimentos de onda centrais ( $\mu m$ )
iSDSS	32.97	0.772
uJAVA	73.56	0.348
J0430	65.07	0.43
J0861	59.80	0.861
J0515	59.78	0.515
J0410	66.62	0.41
rSDSS	40.74	0.625
J0378	109.60	0.379
J0660	77.72	0.66
gSDSS	42.18	0.475
J0395	117.84	0.395
zSDSS	39.08	0.915

próxima seção descrevemos o método usado na reconstrução e suas limitações atuais.

## 3.2 Método de reconstrução do espectro de reflectância

O método se baseia nas hipóteses de que tanto a curva de luz quanto a reflectância dos asteroides em geral tendem a variar de forma suave entre segmentos adjacentes. A obtenção de cores a partir das curvas de luz se baseia na condição de uma variação linear da magnitude em função do tempo. Então, se ajusta a cada segmento da curva de luz, formado por três exposições em cada filtro, um segmento de reta cujo coeficiente linear é a média das magnitudes nas três exposições, no tempo de observação médio, e um coeficiente angular que se ajusta à variação da magnitude no tempo. Com isso, para filtros adjacentes no tempo, pode-se extrapolar o segmento de reta e se obter a cor entre eles. Contudo, o ruído nas magnitudes observadas pode implicar em uma variação grande de coeficiente angular da reta de ajuste. Com vista a minimizar tais variação, foi desenvolvido e aplicado um algoritmo genético que busca minimizar a diferença entre gradientes adjacentes da curva de luz. O desenvolvimento deste algoritmo não foi parte deste trabalho, mas é necessário explicar suas características principais, o que é feito na sequência.

Seja a magnitude em cada filtro  $m_{j,k}$ , com  $j=1, 2, 3, \dots, 12$ , sendo o número correspondente aos filtros da J-PLUS, na ordem da sequência de observação e  $k=1, 2, 3$ , a sequência de observação para cada filtro. Seja o tempo de cada observação  $t_{j,k}$  e o tempo de observação médio é  $t_j = \sum_k \frac{t_{j,k}}{N_k}$ , onde  $N_k$  é o número de observações realizadas. O segmento de reta que ajusta os pontos da curva de luz tem um coeficiente linear definido como a magnitude média em cada filtro,  $a_j = \sum_k \frac{m_{j,k}}{N_k}$ . O coeficiente angular  $b_j$  do segmento de reta ajustado ao segmento de curva de luz se dá por,

$$b_j = \frac{\sum_k (t_{j,k} - t_j)(m_{j,k} - a_j)}{\sum_k (t_{j,k} - t_j)^2} \quad (3.1)$$

Para a definição de  $\sigma_{ref}$  (métrica de suavidade de reflectância) é necessário o cálculo das cores entre dois filtros,  $j$  e  $j+1$ , que é a diferença de magnitude calculada extrapolando seus segmentos de reta para um instante de tempo intermediário  $t_i = 0.5(t_{j,3} + t_{j+1,1})$ , entre a última observação em  $j$  e a primeira em  $j+1$ . Então a cor  $c_{j,j+1}$  entre dois filtros  $j$  e  $j+1$  se define por:

$$c_{j,j+1} = a_{j+1} - a_j + (t_i - t_{j+1})b_{j+1} - (t_i - t_j)b_j. \quad (3.2)$$

A partir das cores em (2) é possível a obtenção de cores para qualquer filtro em relação a um filtro de referência. Assim, cores solares G podem ser utilizadas para cálculo

da reflectância em relação a um filtro de referência  $i_0$ ,

$$r_i = 10^{-0.4(c_{i,i_0} - G_{i,i_0})} \quad (3.3)$$

Onde,  $c_{i,i_0}$  é a cor no filtro  $i$  em relação ao filtro  $i_0$  e  $G_{i,i_0}$  é a cor solar no filtro  $i$  em relação ao filtro  $i_0$ .

A partir da reflectância temos o gradiente de reflectância entre filtros adjacentes,

$$R_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{w_{i+1} - w_i} \quad (3.4)$$

Onde,  $r_{i+1}$  e  $r_i$  são as reflectâncias nos filtros  $i+1$  e  $i$  respectivamente e  $w_{i+1}$  e  $w_i$  os comprimentos de onda efetivos dos filtros  $i+1$  e  $i$  respectivamente.

A partir de (1), (2) (3) e (4) podemos definir o parâmetro  $\sigma_{ref}$ , métrica de suavidade de reflectância,

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\sum_j^{n-1} (R_{i+1} - R_i)^2} \quad (3.5)$$

A minimização da métrica de suavidade de reflectância (3.5) reduz variações randômicas da reflectância entre filtros adjacentes no comprimento de onda, por isso, ela se faz uma boa medida de o quanto os formatos dos espectros de reflectância reconstruídos estão dentro de um padrão esperado para um espectro de asteroide. Deste modo, quanto maior o valor de  $\sigma_{ref}$ , pior a qualidade do espectro reconstruído.

Este método de reconstrução foi testado com curvas de luz sintéticas, feitas a partir de modelos de formas reais e espectros de reflectância de meteoritos, que buscam reproduzir o efeito da variação da cor sobre o espectro de reflectância, simulando a sequência de aquisição do J-PLUS considerando três exposições por filtro e o tempo de exposição e ordem dos filtros dados na Tabela 3.1. A estas curvas sintéticas foram adicionados ruídos gaussianos cuja variância em função da magnitude no filtro  $g_{SDSS}$  foi determinada a partir da distribuição de incertezas medida a partir de observações de estrelas da campanha J-PLUS. O algoritmo de reconstrução foi então aplicado a uma amostra de 450 curvas sintéticas com magnitudes  $g_{SDSS}$  entre 15 e 19 e períodos de rotação entre 2 e 17 horas, feitas a partir de 15 diferente modelos de forma e 6 espectros de reflectância que reproduzem as principais classes taxonômicas. Os resultados sugerem que a implementação atual do método é em geral capaz de remover de forma satisfatória os efeitos da rotação para asteroides com  $g < 17$ , mas pode falhar por conta da combinação de variações aleatórias no ruído e regiões da curva de luz onde a hipótese de variação linear dos segmentos não é satisfeita pelos dados, como em torno de mínimos e máximos. Exemplos dos resultados possíveis da reconstrução que ilustram esse ponto são mostrados na Figura 3.2, para observações simuladas feitas a partir de espectros de asteroides tipo S com  $g_{SDSS} = 17.1$

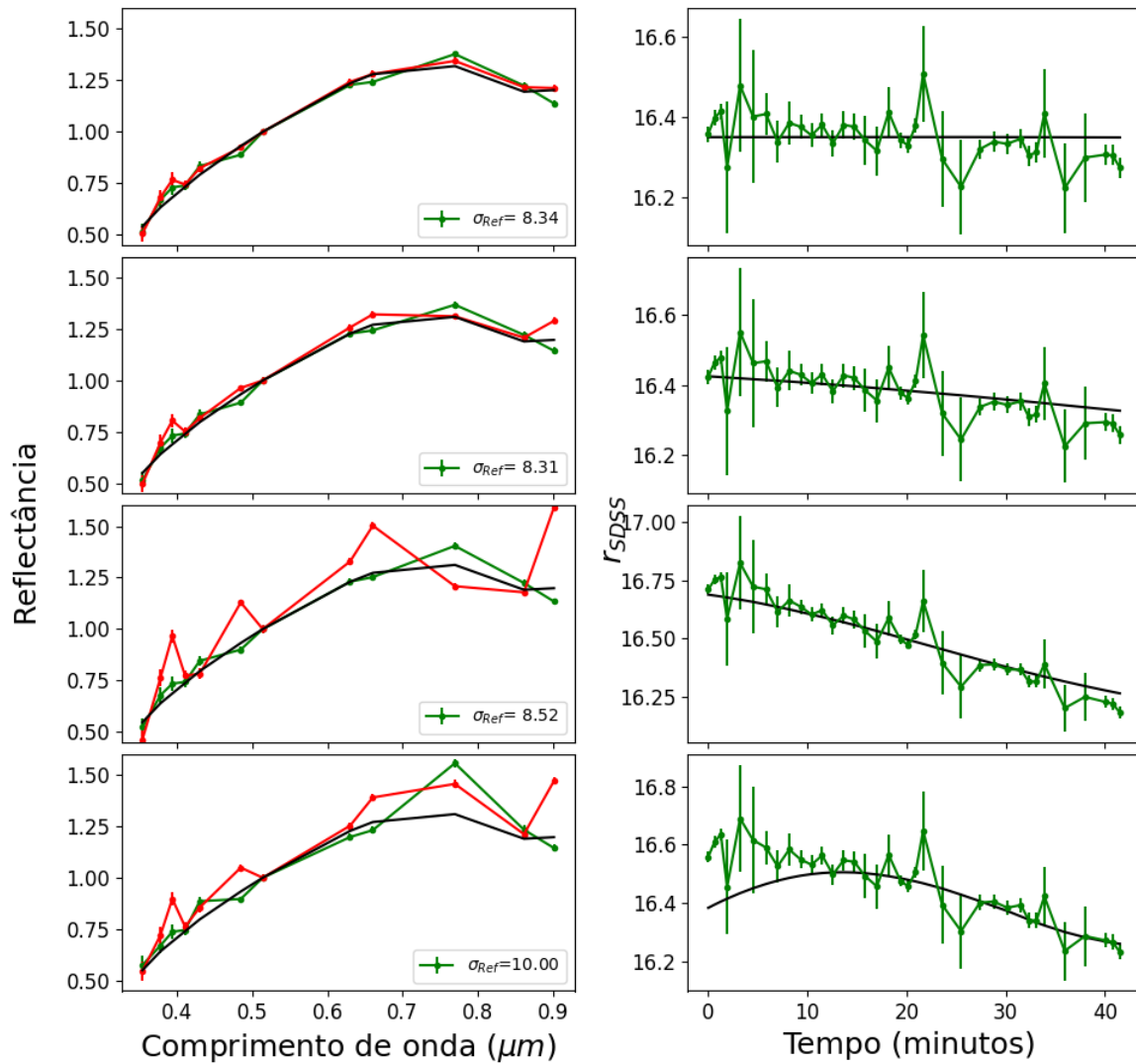


Figura 3.2: Resultados do método de reconstrução para curvas de luz sintéticas para o filtro  $r_{SDSS}$  (ver texto)

em diferentes curvas de luz. Nesta figura são mostrados, no painel esquerdo, os espectros originais (preto), observados (vermelho) e reconstruídos, e no direito as curvas de luz reconstruídas (verde) e reais (preto).

Este método foi aplicado aos dados dos asteroides que tiveram observações recuperadas nos 12 filtros no terceiro *Data Release* da colaboração. Para os fins deste trabalho, foi estabelecido um limite superior para o valor de  $\sigma_{ref}$  calculado como resultado da reconstrução. O estabelecimento do limite para o corte se deu pela interpretação visual, a nossa escolha a partir desta interpretação levou à determinação de  $\sigma_{ref}=10$ , como valor limite para os espectros presentes em nossa análise. Com isso, nossos dados, que inicialmente eram de 503 espectros de reflectância, foram reduzidos a 170 espectros. Então, nossa análise foi realizada sobre 170 espectros de reflectância sobre onze filtros, pois, os

dados foram normalizados para o filtro com comprimento de onda efetivo em  $0.515\mu m$ . Estes espectros são mostrados na Figura 3.3 junto aos espectros de reflectância da literatura, quando disponíveis.

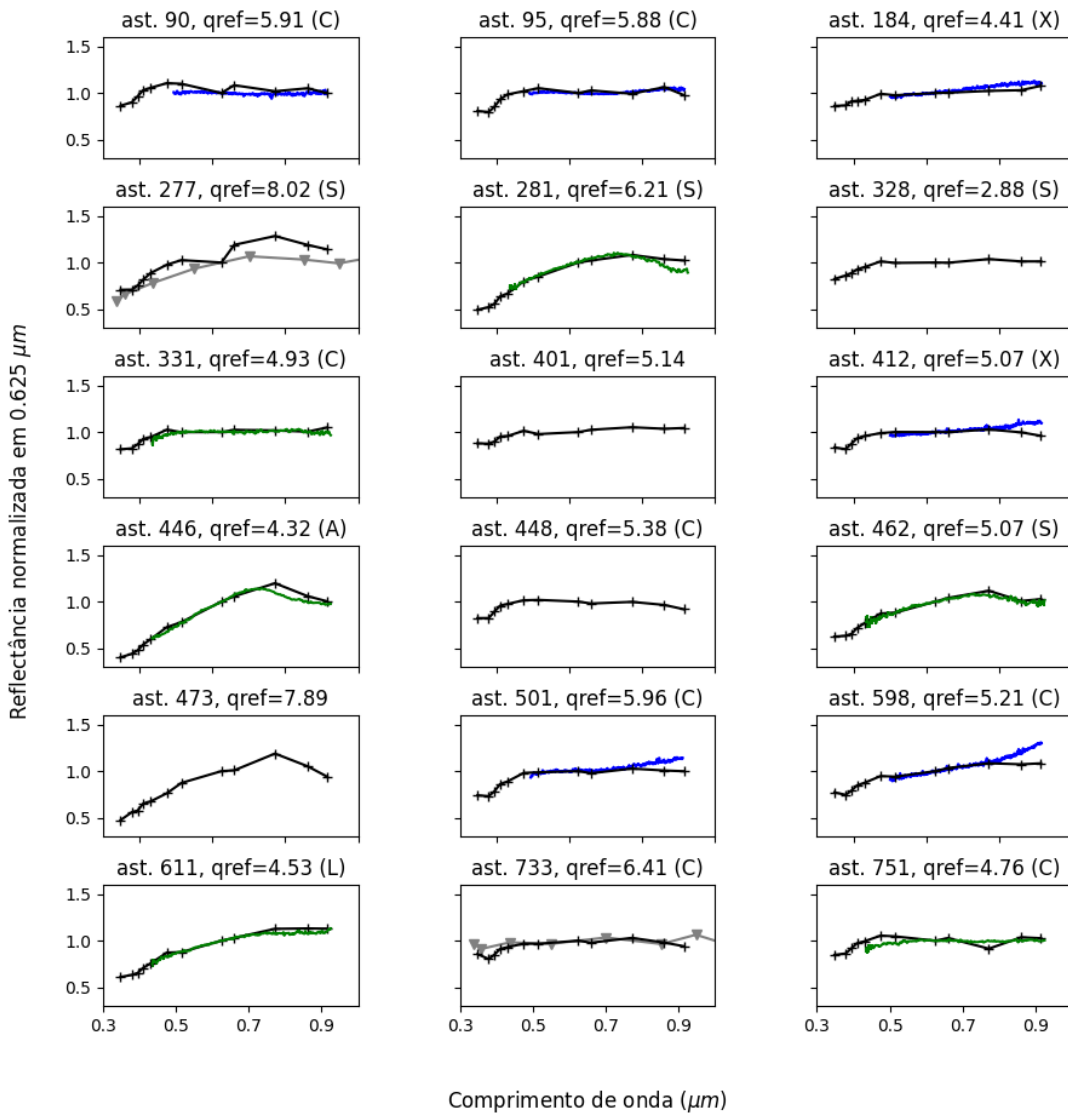


Figura 3.3: Espectros dos asteroides com a melhor reconstrução ( $\sigma_{ref} < 10$ ). Quando disponível plotamos o espectro SDSS (vermelho) ou o espectro SMASS2 (verde). Se nenhum desses espectros for disponíveis, plotamos o espectro ECAS (cinza), se existir ou S3OS2 (azul). Os espectros estão em ordem do número de identificação dos asteroides.

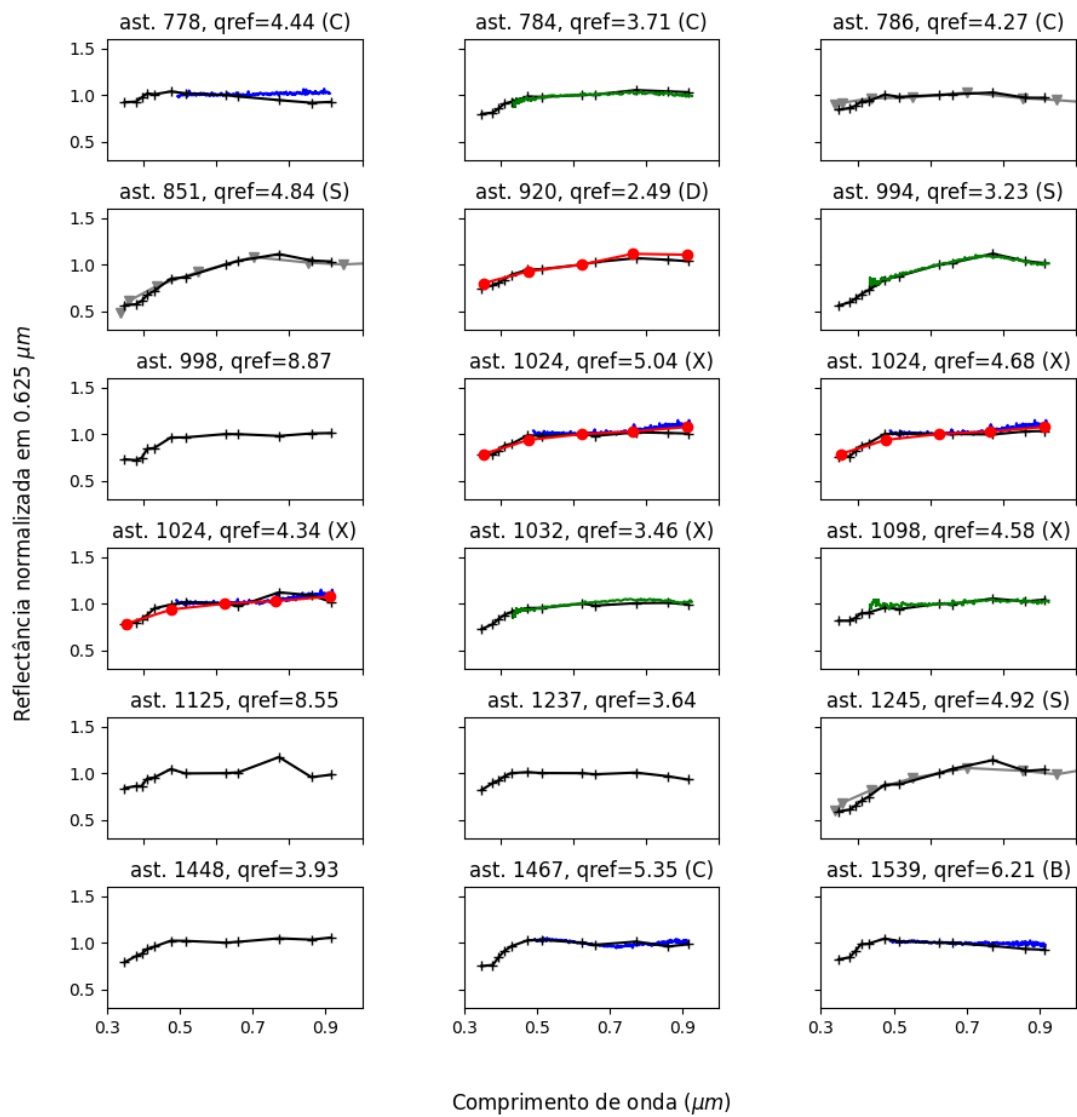


Figura 3.4: (continuação)

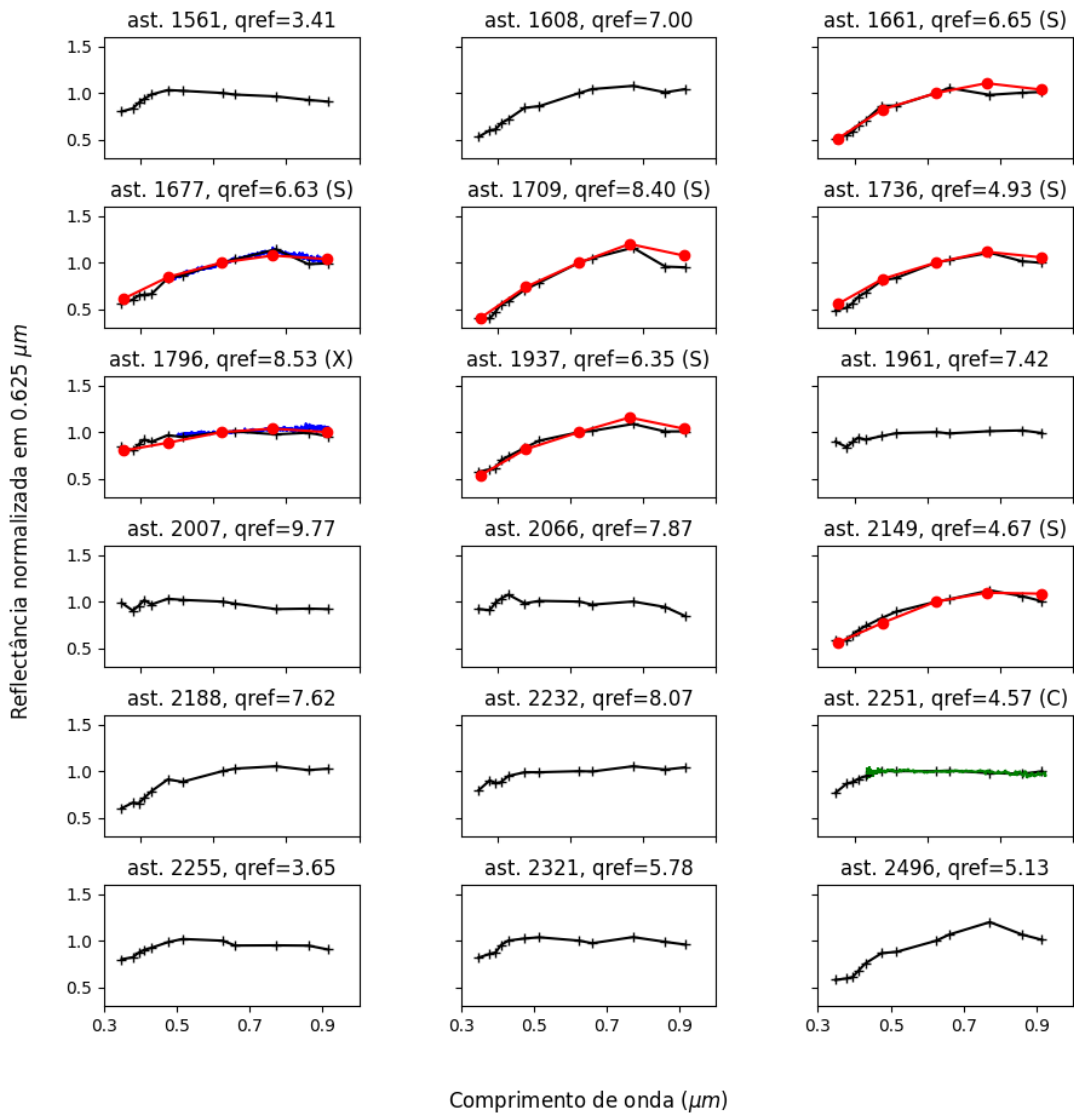


Figura 3.5: (continuação)

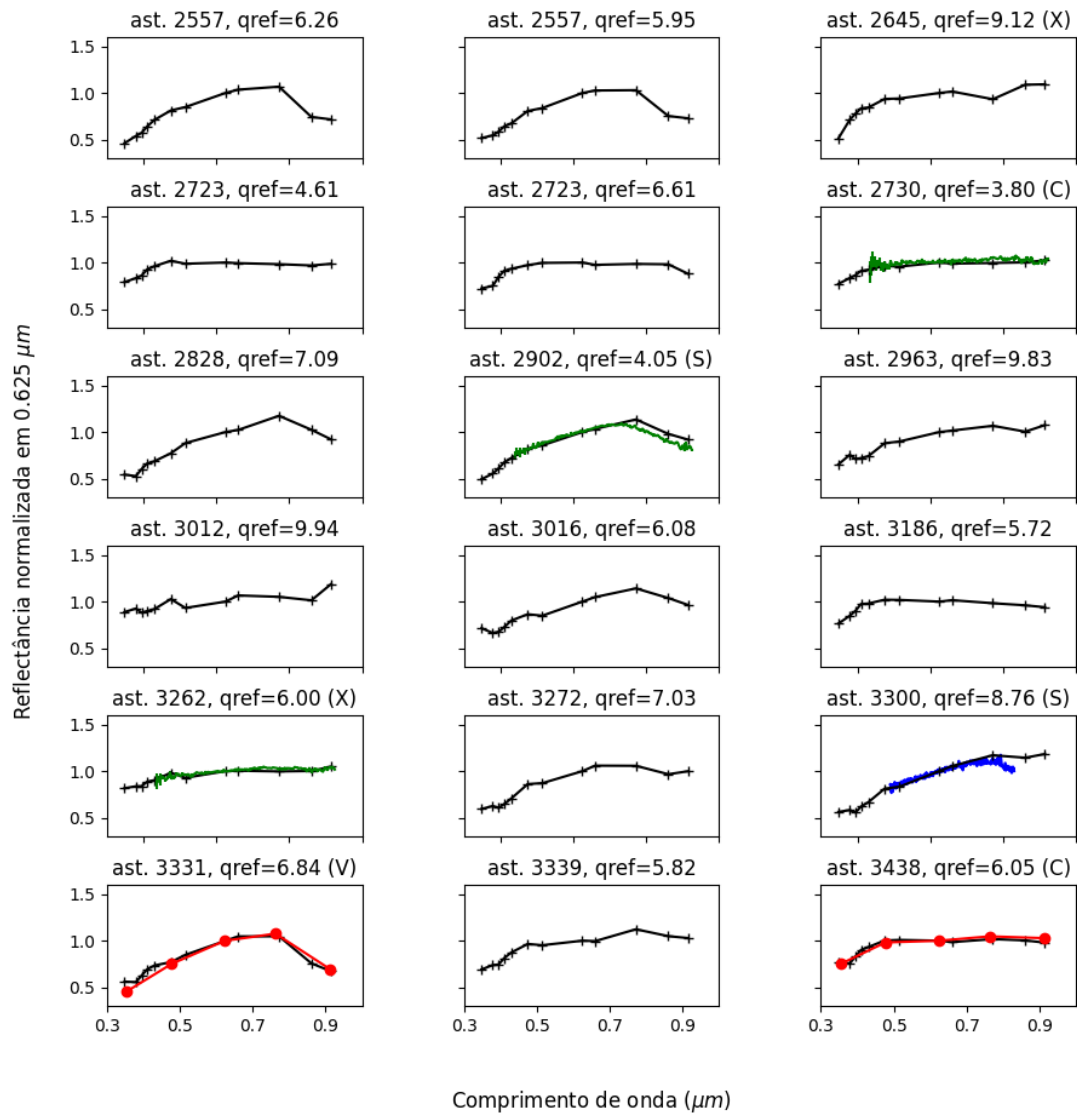


Figura 3.6: (continuação)

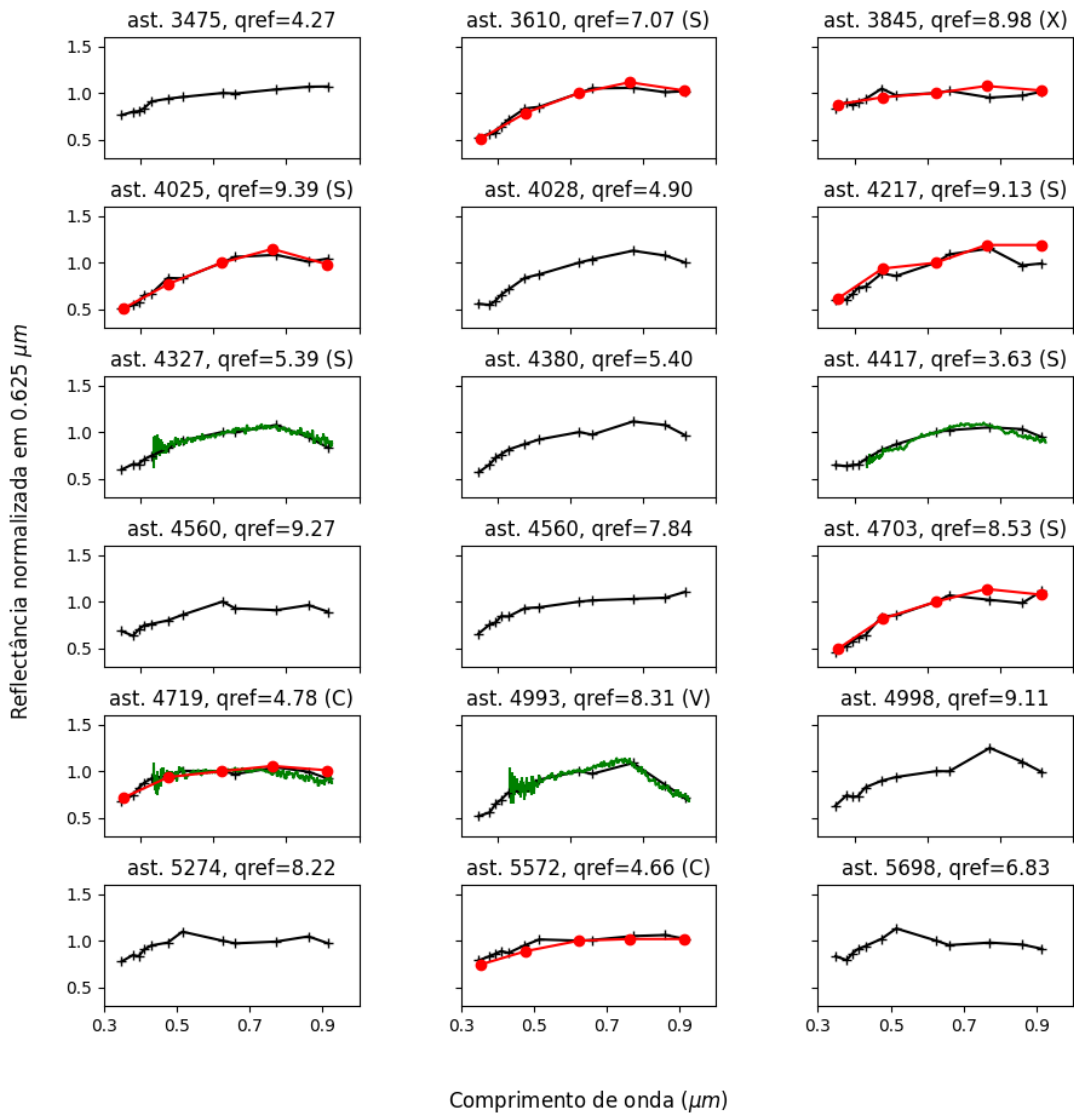


Figura 3.7: (continuação)

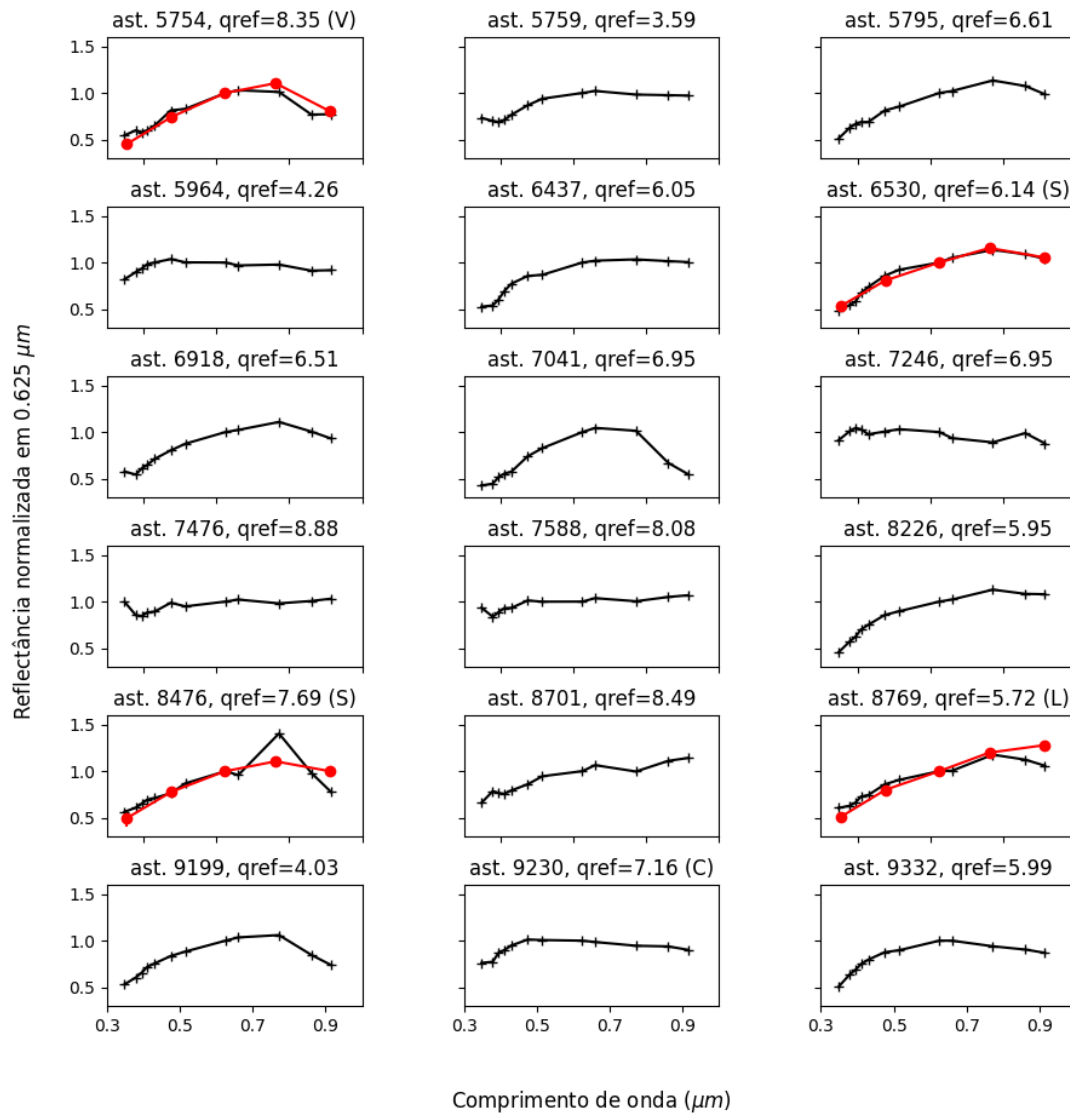


Figura 3.8: (continuação)

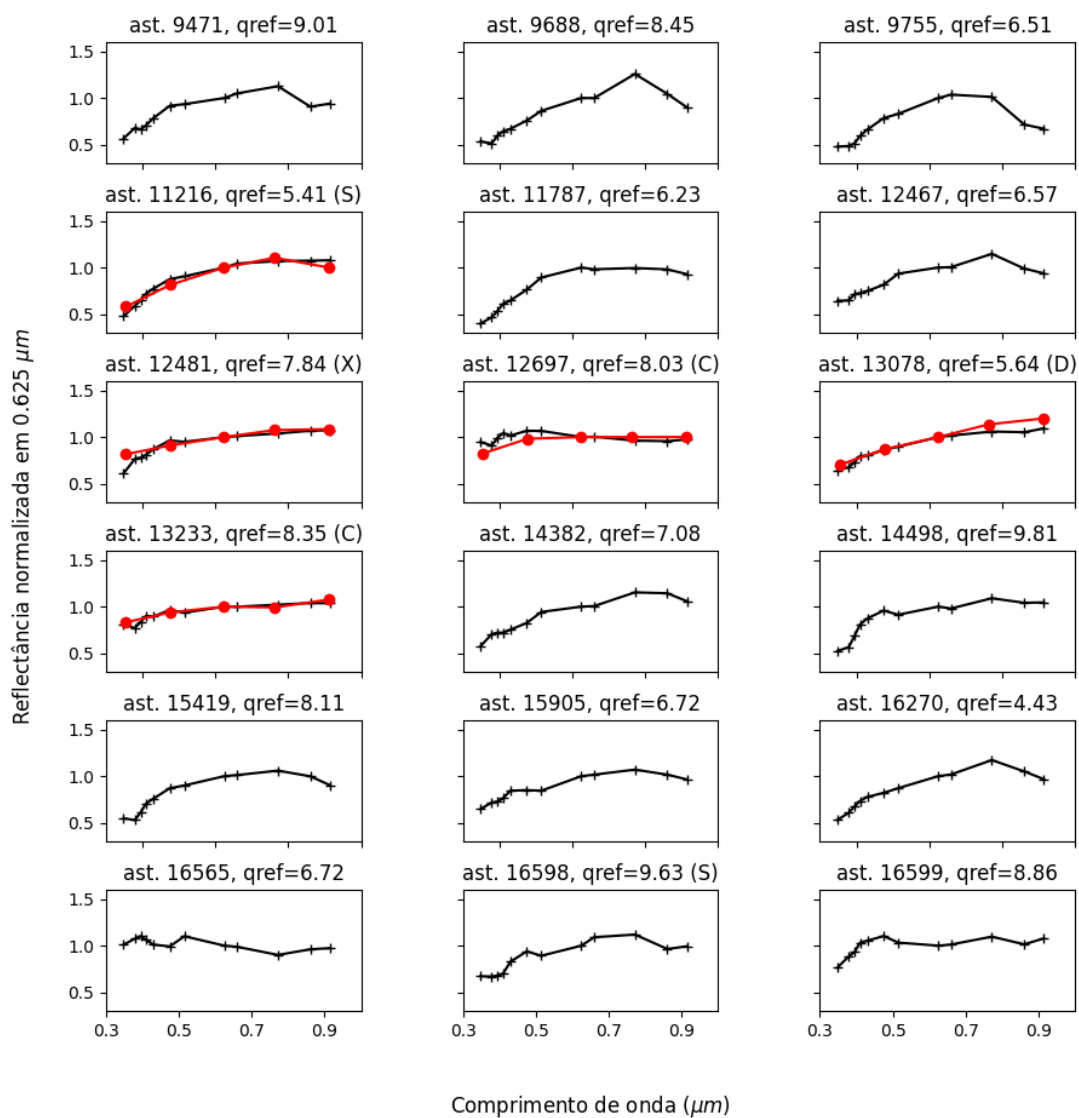


Figura 3.9: (continuação)

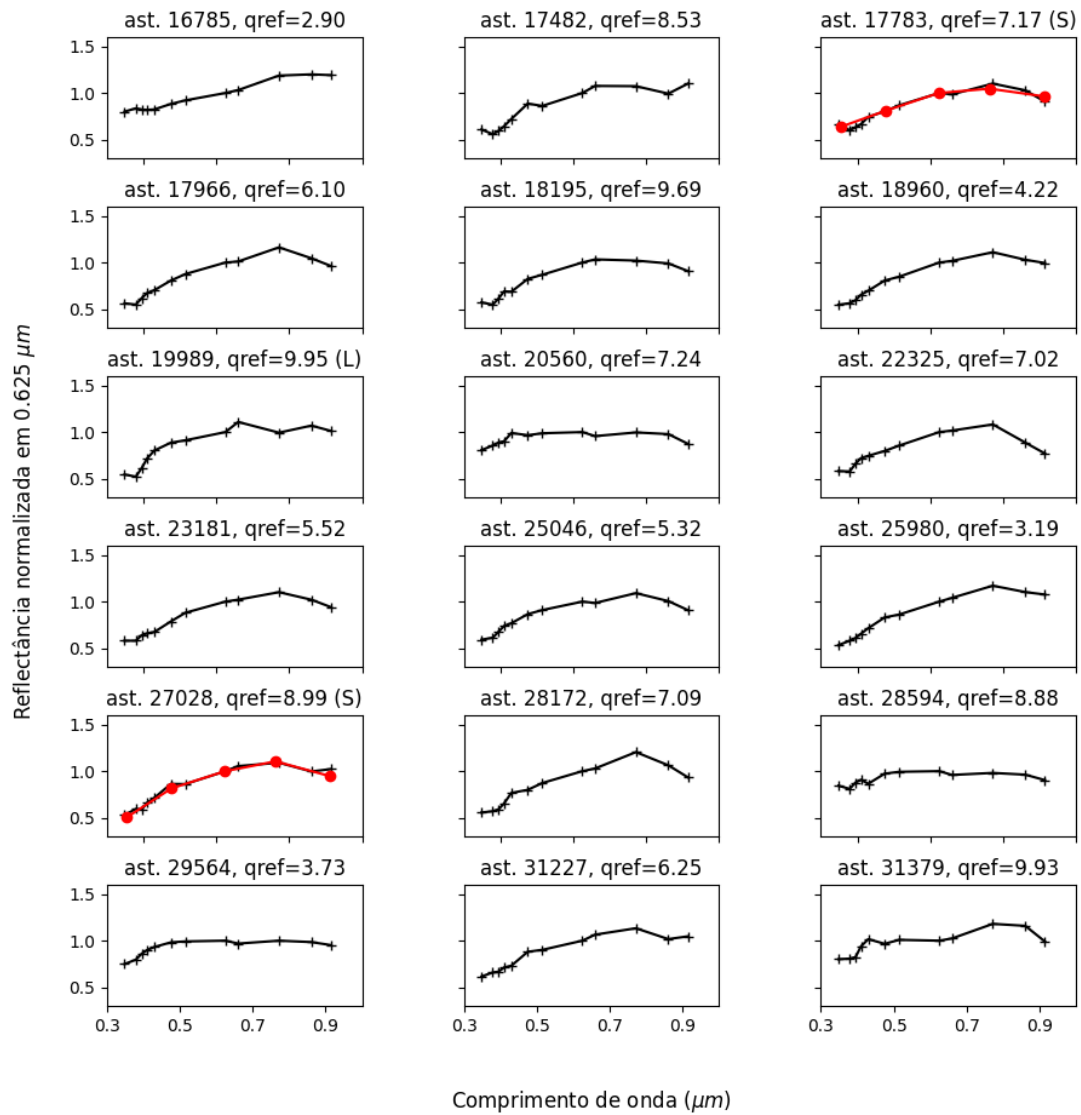


Figura 3.10: (continuação)

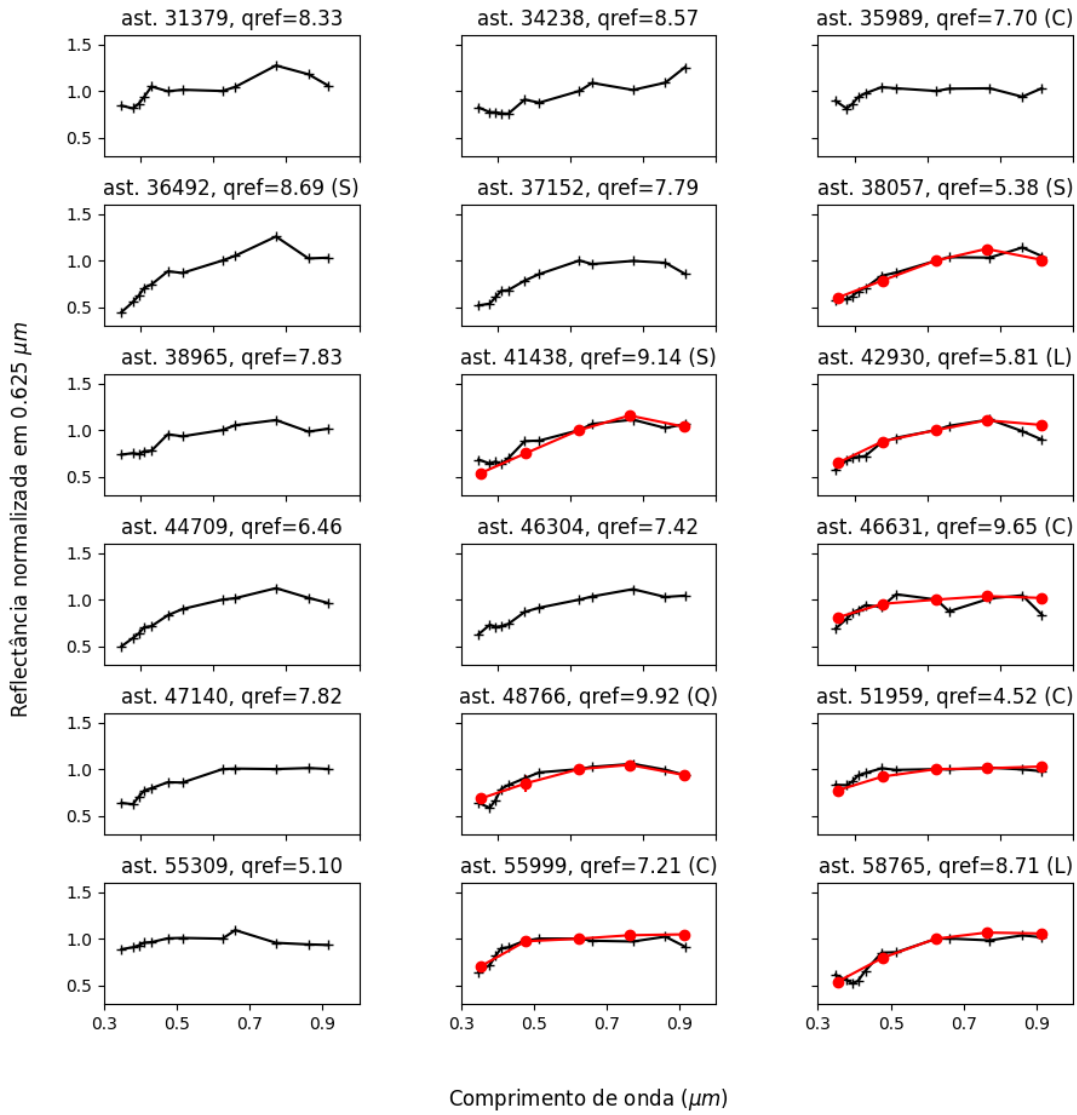


Figura 3.11: (continuação)

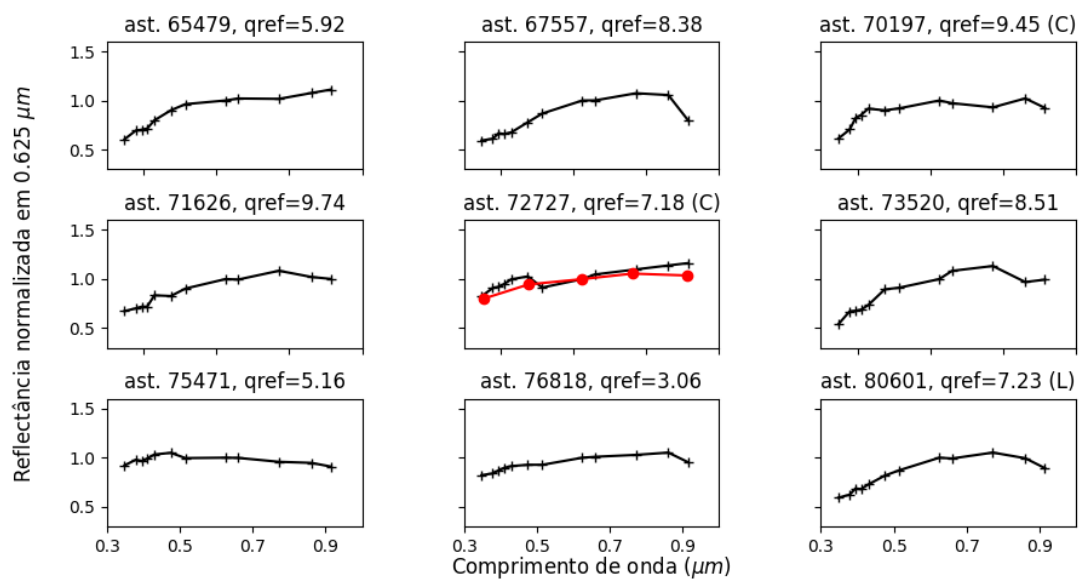


Figura 3.12: (continuação)

### 3.3 A Análise De Componentes Prinipais

Em posse dos dados reduzidos, demandou-se um tratamento anterior à classificação, chamado **Análise de componentes principais - ACP**. A **ACP** é uma técnica de redução de dimensionalidade, onde se substitui as variáveis originais, com alta correlação, por variáveis não correlacionadas, chamadas de componentes principais. A análise de componentes principais têm a sua primeira aplicação na classificação de asteroides por [THOLEN \(1984\)](#), sendo utilizada em classificações posteriores, como a de [BUS e BINZEL \(2002\)](#) e [DEMEMO \*et al.\* \(2009\)](#).

A aplicação de **ACP** aos espectros reconstruídos se justifica, principalmente, pela alta correlação entre os valores de reflectância entre os diferentes filtros, como pode ser visto pela matriz de correlação R (eq. 3.6) . A alta correlação entre as variáveis leva a uma redundância indesejável, sobretudo, no contexto da classificação, onde se busca a maior dessemelhança possível entre os dados.

A alta correlação entre os dados é observada pela matriz de correlação R entre as reflectâncias para os onze filtros considerados (excluindo o filtro J0515, onde se ajustou para sempre ter o valor de reflectância igual à unidade) .

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.87 & 0.84 & 0.78 & 0.71 & 0.50 & -0.58 & -0.55 & -0.56 & -0.34 & -0.15 \\ 0.87 & 1 & 0.93 & 0.85 & 0.79 & 0.58 & -0.63 & -0.60 & -0.59 & -0.36 & -0.13 \\ 0.84 & 0.93 & 1 & 0.95 & 0.86 & 0.54 & -0.70 & -0.69 & -0.68 & -0.45 & -0.26 \\ 0.78 & 0.85 & 0.95 & 1 & 0.92 & 0.61 & -0.71 & -0.69 & -0.68 & -0.47 & -0.27 \\ 0.71 & 0.79 & 0.86 & 0.92 & 1 & 0.66 & -0.65 & -0.63 & -0.59 & -0.39 & -0.22 \\ 0.51 & 0.58 & 0.54 & 0.61 & 0.66 & 1 & -0.24 & -0.13 & -0.31 & -0.14 & 0.23 \\ -0.58 & -0.63 & -0.70 & -0.71 & -0.65 & -0.24 & 1 & 0.93 & 0.83 & 0.63 & 0.49 \\ -0.55 & -0.60 & -0.69 & -0.69 & -0.62 & -0.12 & 0.93 & 1 & 0.82 & 0.63 & .58 \\ -0.56 & -0.59 & -0.68 & -0.68 & -0.59 & -0.31 & 0.83 & 0.82 & 1 & 0.71 & 0.50 \\ -0.34 & -0.36 & -0.45 & -0.47 & -0.39 & -0.14 & 0.63 & 0.63 & 0.71 & 1 & 0.83 \\ -0.15 & -0.13 & -0.26 & -0.27 & -0.22 & 0.23 & 0.49 & 0.58 & 0.50 & 0.83 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Na matriz de correlação R estão dispostas as correlações de Pearson para as reflectâncias nos diferentes filtros, onde, cada elemento da matriz  $m_{ij}$ (elemento da linha i e coluna j) representa o coeficiente de correlação de Pearson entre a i-ésima e a j-ésima variável. Vemos que em alguns casos temos correlação bastante elevada ( coeficiente próximo a 1) como para a reflectância no terceiro filtro com a reflectância no quarto filtro.

Na **ACP** as novas variáveis são combinações lineares das variáveis originais. Os coeficientes da expansão são determinados a partir da solução da equação de autovalores e autovetores da matriz de dados.

Seja A uma matriz de dados com P objetos e N variáveis, podendo ser escrita do seguinte modo,

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & x_{p3} & \dots & x_{pn} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Onde  $x_{pn}$  representa o valor da medida da n-ésima variável para o p-ésimo objeto. A partir da matriz A, podemos obter a matriz de correlação D.

$$D = \begin{pmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1x_2) & \dots & Cov(x_1x_n) \\ Cov(x_2x_1) & Var(x_2) & \dots & Cov(x_2x_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Cov(x_nx_1) & Cov(x_nx_2) & \dots & Var(x_n) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Onde, a variância se define por,

$$Var(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.9)$$

onde  $x_i$  é o i-ésimo valor da amostra e  $\bar{x}$  é a média da amostra. E a covariância é definida por

$$Cov(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{[(x_i - \mu_i^x)][(y_i - \mu_i^y)]}{n} \quad (3.10)$$

$\mu_i^x$  é a média dos valores da variável x,  $\mu_i^y$  é a média dos valores da variável y e n é o número de amostras.

Os coeficientes da expansão das novas variáveis em termos das variáveis originais são obtidos a partir solução da equação de autovetores e autovalores da matriz D (8).

$$Dv = kv \rightarrow det[D - \lambda I] = 0 \rightarrow D - \lambda I = 0. \quad (3.11)$$

I é a matriz identidade,  $\lambda$  a matriz dos autovalores e v é o autovetor.

Seja V a matriz dos autovetores obtida a partir de (11),

$$V = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \dots & e_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{p1} & e_{p2} & e_{p3} & \dots & e_{pn} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Os valores das novas variáveis (componentes principais) em termos das variáveis

Tabela 3.2: variâncias percentuais para as onze componentes principais.

pc1	pc2	pc3	pc4	pc5	pc6	pc7	pc8	pc9	pc10	pc11
0.64	0.19	0.05	0.043	0.029	0.013	0.012	0.0063	0.0056	0.0038	0.0015

originais (valores de reflectância) são chamados de *scores* e são obtidos do seguinte modo:

$$G_{jn} = e_{1n}x_{j1} + e_{2n}x_{j2} + e_{3n}x_{j3} + e_{4n}x_{j3} + \dots + e_{pn}x_{jn} \quad (3.13)$$

$G_{jn}$  é o *score* da n-ésima componente principal para o j-ésimo objetos em termos da p-ésima reflectância, com  $e_{1n}, e_{2n}, \dots, e_{pn}$  sendo os termos da n-ésima coluna de (12) e  $x_{j1} \dots \dots x_{jn}$  sendo os valores de reflectância para o j-ésimo objeto do primeiro ao n-ésimo filtro.

A ordem das componentes principais é determinada a partir do valor da variância, ou seja, a primeira componente principal têm o maior valor de variância, a segunda o segundo maior valor e assim sucessivamente. Na tabela 3.2 vemos os valores das variâncias percentuais em relação à variância total para as 11 componentes principais. A variância representa uma medida da distribuição do conjunto de dados, que pode ser entendida como a quantidade de informação contida nesses dados (THOLEN (1984)).

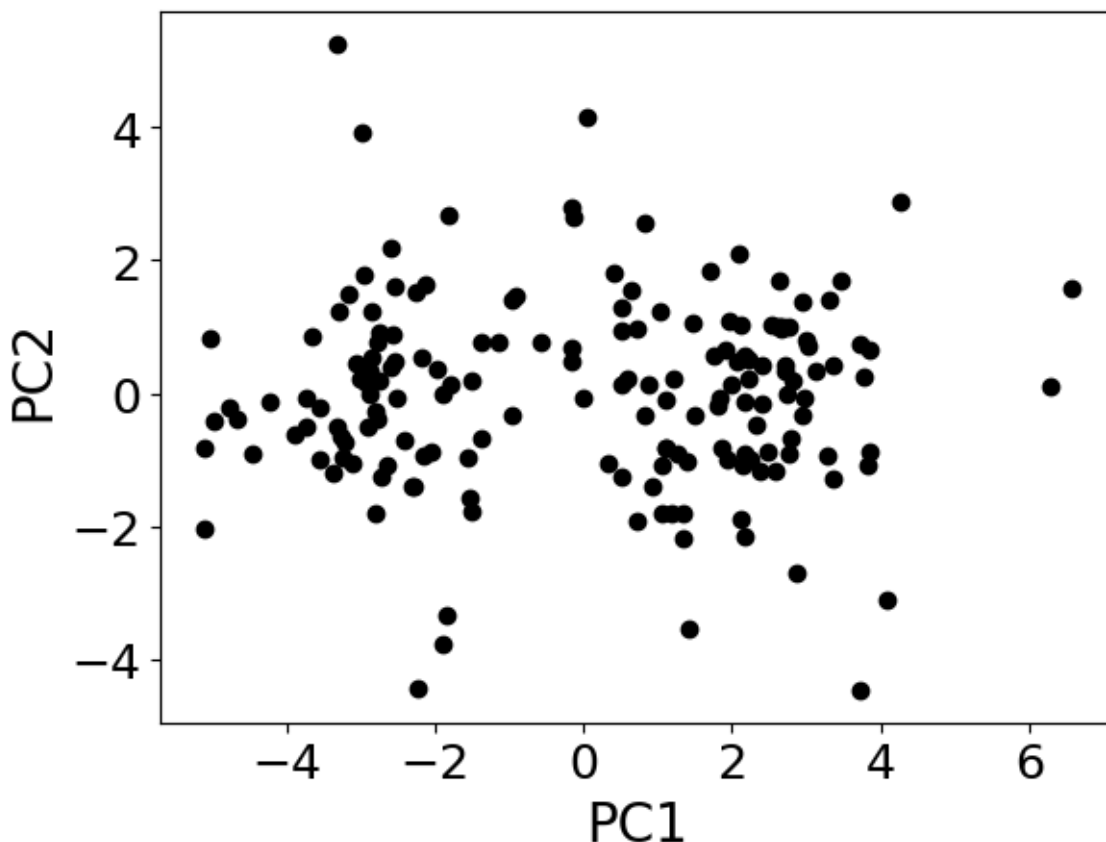


Figura 3.13: Gráfico da primeira versus segunda componente principal para os 170 asteroides com os melhores espectros reconstruídos.

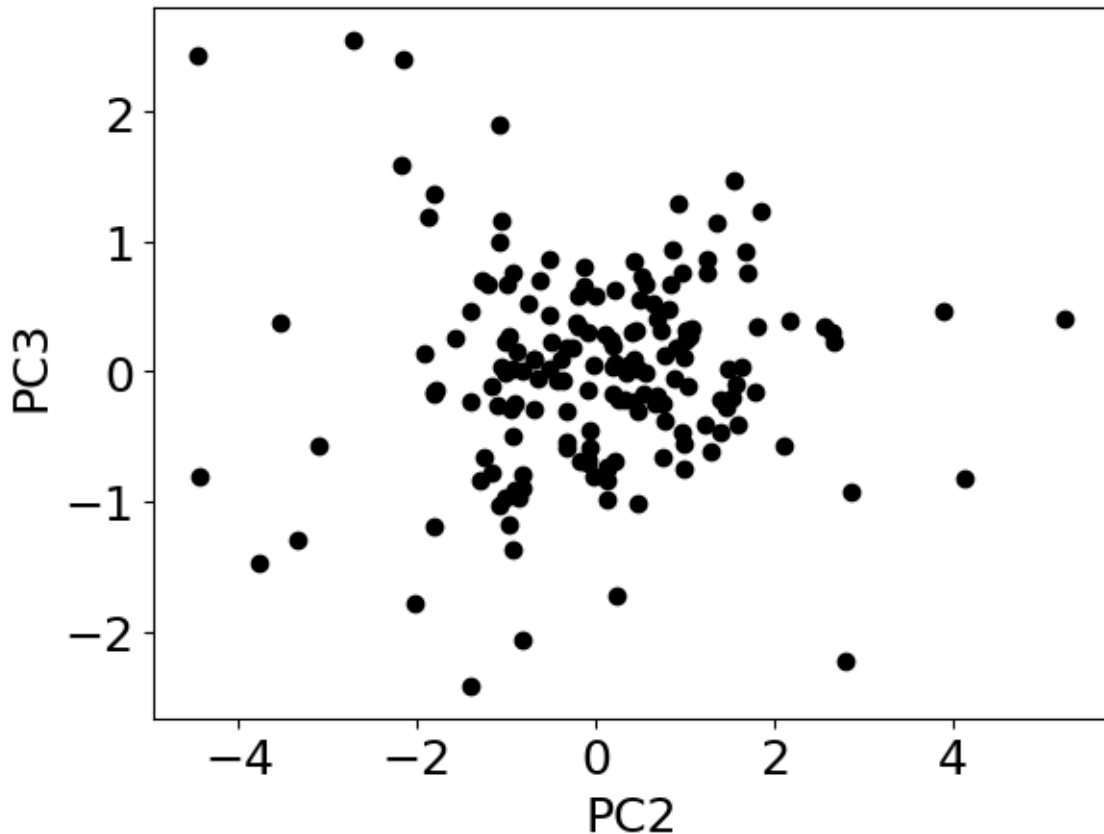


Figura 3.14: Gráfico da segunda versus terceira componentes principais para os 170 asteroides com os melhores espectros reconstruídos.

Deste modo, com a primeira e segunda componentes, possuímos 83 por cento da informação contida nos dados originais **Fig. 3.13**. Enquanto com a segunda e a terceira componente temos aproximadamente 25 por cento **Fig. 3.14**.

A partir da transformação dos dados, efetuada pela aplicação da **ACP**, concluímos a classificação, utilizando a análise de agrupamento.

### 3.4 Análise De Agrupamento

Nossa classificação dos dados se baseou na aplicação de uma das técnicas estatísticas de um conjunto de técnicas chamadas **análise de agrupamento**. A análise de agrupamento ou em inglês *cluster analysis* é um conjunto de métodos numéricos desenvolvidos com o intuito de descobrir de maneira objetiva grupos em um conjunto de dados **EVERITT et al. (2001)**. As técnicas de análise de agrupamento são variadas, com múltiplas abordagens possíveis para dados de diferentes naturezas. A técnica escolhida em nossa abordagem foi a k-means, bastante difundida e que se baseia na segmentação dos dados.

As técnicas de análise de agrupamento podem ser divididas em quatro categorias principais (**FRADES e MATTHIESEN (2009)**):

1. **Hierárquicos**- São algoritmos que se baseiam na ligação de grupos através de árvores, denominados dendogramas;
2. **Particionais**- Algoritmos que operam a partir da divisão dos dados em uma configuração que otimize uma função que representa a estrutura dos dados;
3. **Agrupamento baseado em densidade**- conjunto de algoritmos que segmenta os dados a partir da densidade com a qual eles se distribuem em diferentes regiões;
4. **Agrupamento baseado em grade**- Essas técnicas assumem o espaço dividido em um número finito de células e separam os dados a partir da divisão do espaço.

### 3.4.1 K-means

Dentre a vastidão de escolhas possíveis, mencionadas, optamos por uma técnica que faz parte das particionais, a *k-means*. Em *k-means*, os dados são particionados em grupos ou agrupamentos (*clusters*), considerando-se a distância entre os objetos e a otimização de uma função, chamada de soma do quadrado das distâncias ou função inércia, que representa a distância dos objetos dos centros dos agrupamentos dos quais esses objetos pertencem.

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{x_j \in s_i} |x_j - \mu_i|^2. \quad (3.14)$$

Onde,  $x_j$  representa a posição de um objeto pertencente ao conjunto  $s_i$ , e  $\mu_i$  representa a posição do  $i$ -ésimo centróide (centro do grupo).

O algoritmo de agrupamento dos dados, realizado em K-means pode ser sumarizado no seguinte conjunto de etapas:

1. São computados K centróides randomicamente, com os objetos sendo associados aos centróides mais próximos, formando grupos.
2. Após todos os pontos serem associados a um grupo, novos centróides são computados.
3. Depois, cada objeto é associado ao centróide mais próximo e o ciclo se repete, se encerrando na configuração que minimiza a função inércia (Eq. 14).

A proximidade dos objetos para a formação dos grupos é mensurada a partir de uma função de similaridade-dissimilaridade. Inúmeras funções são possíveis, em nossa aplicação utilizamos a distância euclidiana,

$$D = \sqrt{(x_1^2 - y_1^2) + (x_2^2 - y_2^2) \dots (x_n^2 - y_n^2)} \quad (3.15)$$

onde  $x_1 \dots x_n$  e  $y_1 \dots y_n$  representam as coordenadas de dois pontos em um espaço euclidiano n-dimensional.

O número de agrupamentos  $K$  a serem computados no K-means é um dos parâmetros de entrada para a execução do algoritmo. A sua determinação pode ser feita a partir de uma interpretação subjetiva dos dados, contudo, há alguns métodos objetivos que merecem atenção.

### A determinação de $K$ e o método silhueta

Uma das possíveis motivações à objeção ao K-means é a determinação prévia do número de *clusters*  $K$ . Em alguns casos a determinação é óbvia, em outros, como no nosso, não é possível presumir o número de agrupamentos. Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas que tinham como objetivo a determinação do melhor  $K$  (para um aprofundamento sobre o tema vide (EVERITT *et al.* (2001))), uma das mais difundidas é o método *elbow*, onde se plota o valor da função inércia (14) por número de agrupamentos. Neste caso, a escolha é feita a partir do encontro de um ponto onde haja uma mudança na curvatura, um cotovelo (elbow), a partir deste ponto não teríamos uma variação brusca da função inércia e não seria necessário um aumento de clusters, pois, perderíamos informação com um número demasiado grande de agrupamentos. Contudo, o *elbow* é um método que não consideramos satisfatório para nosso propósito, dada a sua subjetividade, além de não ficar aparente um "cotovelo" em nosso plot para os dados da J-PLUS (Fig. 3.15).

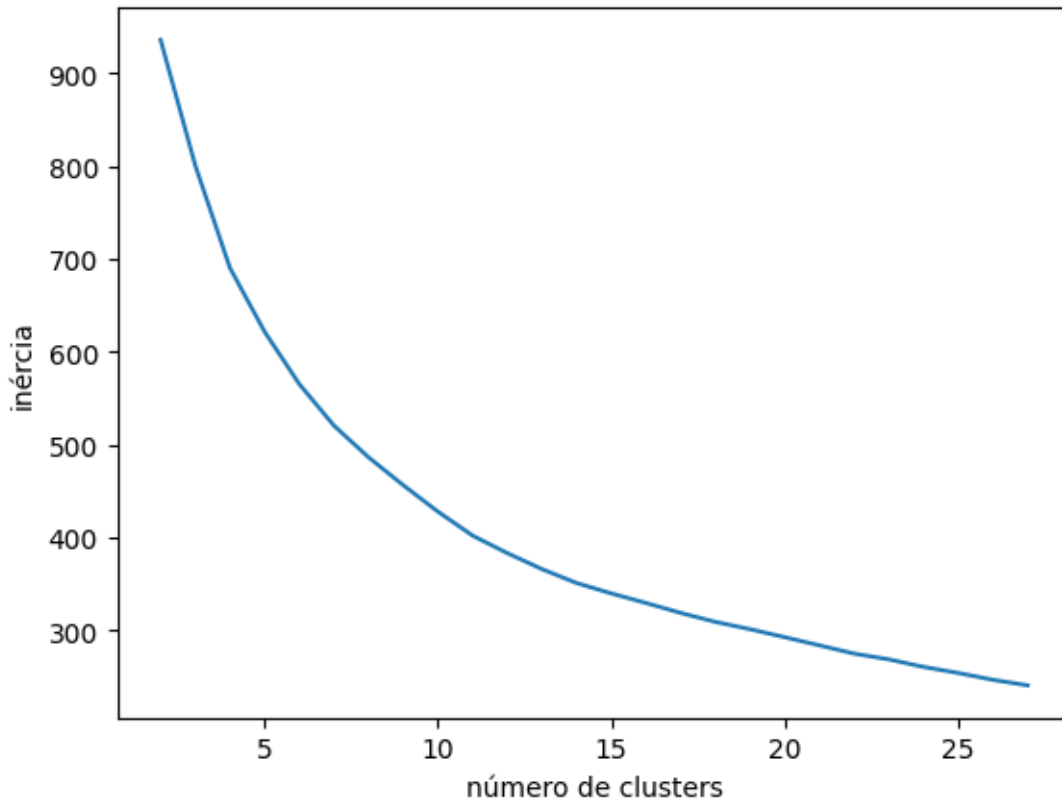


Figura 3.15: Gráfico função inércia versus número de clusters.

Considerando o apresentado, optamos por um outro método, chamado silhueta (*silhouette*), que se fundamenta no cálculo do coeficiente de silhueta para um objeto pertencente a um *cluster*,

$$S = \frac{B - A}{\max(A, B)} \quad (3.16)$$

Aqui, B representa a distância média de uma amostra ao *cluster* vizinho, determinada por (15), A representa a distância média de uma amostra para as amostras de seu *cluster* e  $\max(A, B)$  o máximo valor entre A e B.

Como se pode notar, o valor do coeficiente de silhueta pode variar entre 1 e -1. Um coeficiente de valor próximo a 1 indica que a amostra está bem classificada, enquanto valores negativos indicam uma classificação equivocada. Por isso, a escolha do melhor valor de K a partir da utilização do coeficiente de silhueta se baseia no cálculo do coeficiente de silhueta médio para diferentes valores de K, optando assim, pelo valor que oferece o maior coeficiente médio de silhueta.

O nosso cálculo para o coeficiente médio em diferentes valores de K pode ser visto na **Fig. 3.16**, consideramos o intervalo de 5 a 30 agrupamentos, que é um número razoável se considerarmos as classificações realizadas (temos 26 na classificação realizada

por BUS e BINZEL (2002)). aplicado este método, obtivemos o maior valor de coeficiente de silhueta médio para a configuração com 12 agrupamentos, com base neste resultado, efetuamos a classificação com este valor para K.

### 3.4.2 A classificação

Como resultado da aplicação de K-means para 12 grupos, obtivemos a classificação mostrada na **Fig. 3.17**. Discussões mais detalhadas, como as características dos espectros dos diferentes grupos, serão discutidos nos capítulos seguintes, contudo, podemos notar que em alguns, casos amostras de grupos distintos parecem estar demasiadamente próximas, contudo, deve ser salientado que a classificação foi realizada em onze dimensões, sendo a **figura 5** uma projeção, além disso, como vimos, a variância para as duas primeiras componentes não são significativas para serem consideradas isoladamente, sem perda de informação.

Cabe salientar, que, para a aplicação tanto da **ACP** como de **K-means** utilizamos como ferramenta a biblioteca em *python scikit-learn* que é orientada ao aprendizado de máquina, o que permitiu tornar a maioria das operações realizáveis.

Como referência feita anteriormente, a metodologia de análise posterior à classificação será tratada adiante, com maior detalhamento que no presente capítulo.

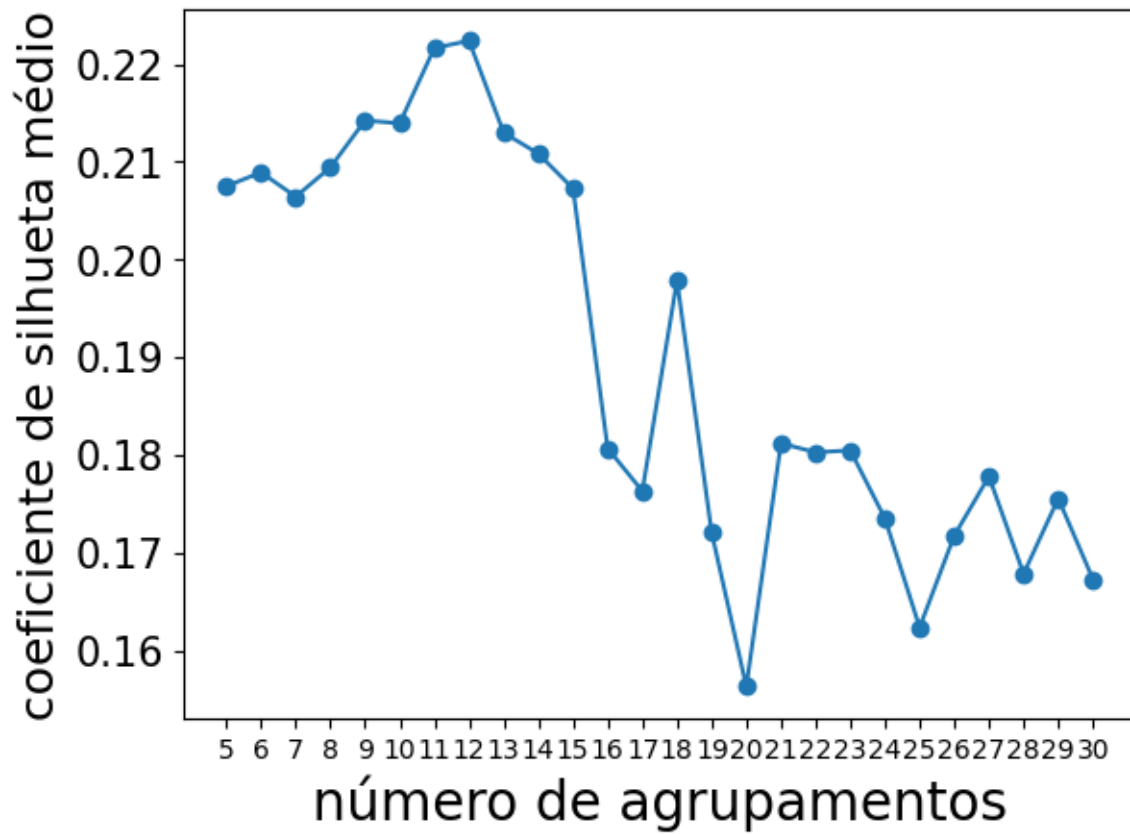


Figura 3.16: Gráfico coeficiente de silhueta versus número de agrupamentos  $k$ . O valor máximo ocorre para  $k=12$ .

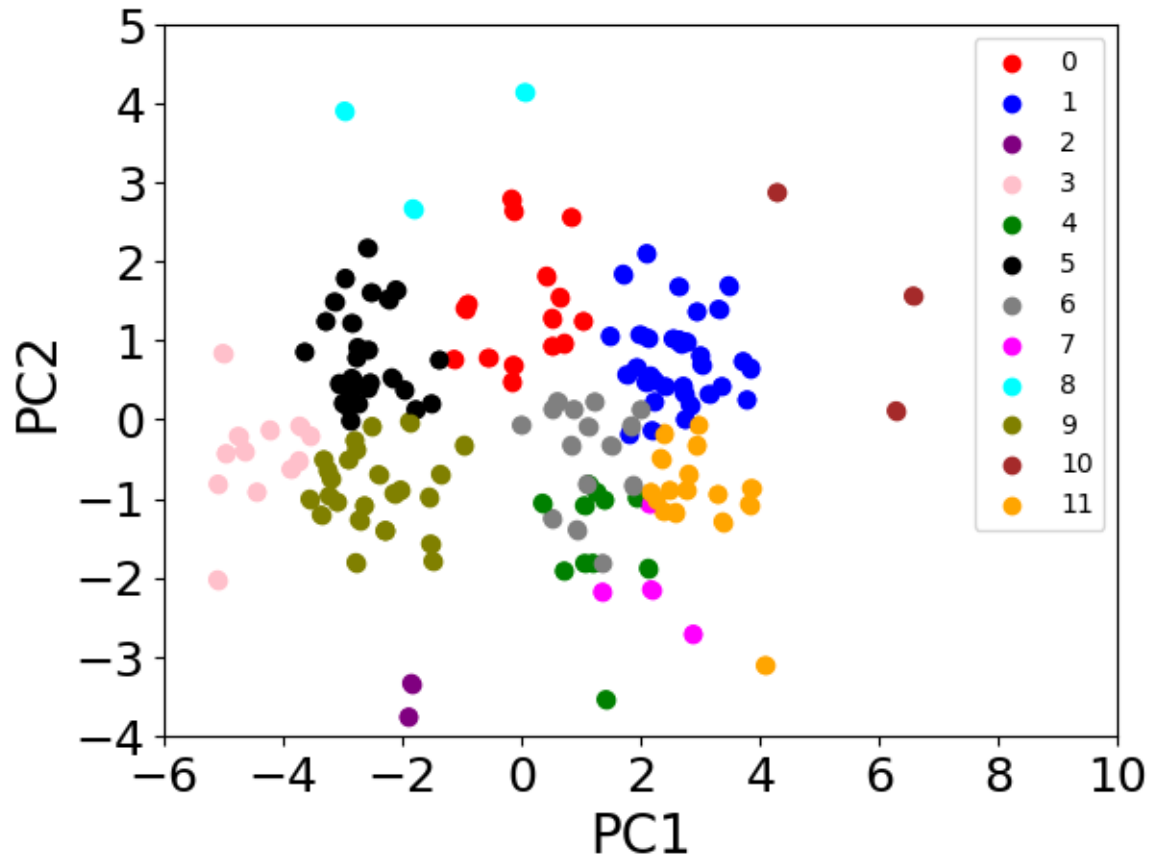


Figura 3.17: Resultado de classificação com k-means para 12 agrupamentos. As cores para os diferentes pontos caracterizam os doze diferentes grupos.



# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 A Distribuição de Classificações Anteriores em Relação às Componentes Principais

Após a aplicação das metodologias necessárias para o tratamento dos dados e da análise de agrupamento, obtivemos como resultado a classificação com 12 grupos, apresentada na **figura 4.1**, desta vez com a indicação dos centróides. A partir de então, um possível aspecto a ser analisado é a distribuição dos grupos em relação a classificações obtidas em trabalhos prévios. Na **figura 4.2**, temos dispostas as classificações prévias para alguns dos asteroides considerados neste trabalho. Podemos notar uma certa tendência de distribuição, com a maior parte dos valores relativos a objetos pertencentes a classes relacionadas a características de absorção devido a presença de silicatos posicionados à direita do gráfico, em contrapartida, valores de objetos pertencentes à classes caracterizadas por não possuírem banda de absorção estão em sua maioria à esquerda do gráfico. Deste modo, temos um indicativo de que a primeira componente principal seja capaz de dividir espectros segundo as características de absorção. Além disso, a disposição das classes semelhantes posicionadas em posições próximas e classes díspares posicionadas afastadas é uma evidência que a aplicação da **ACP** foi bem sucedida no que se refere à separar grupos segundo tais semelhanças e disparidades.

Comparando as figuras **4.1** e **4.2** a primeira com os grupos obtidos por *k-means* e a segunda representando classificações em trabalhos progressos, podemos notar algumas correspondências. Como exemplo, boa parte dos espectros do grupo 5 possuem classificação referente às classes X ou C, enquanto o grupo 1 possui alguns objetos que pertencem à classe S, logo podemos supor que o grupo 5 deve corresponder à uma das classes sem característica associada á olivina/piroxênio, enquanto o grupo 1 está provavelmente associado às classes espectralmente próximas à classe S.

A divisão observada entre espectros com bandas associadas à presença de silicatos e àqueles que não apresentam tal característica demonstrada na **figura 4.2**, para os

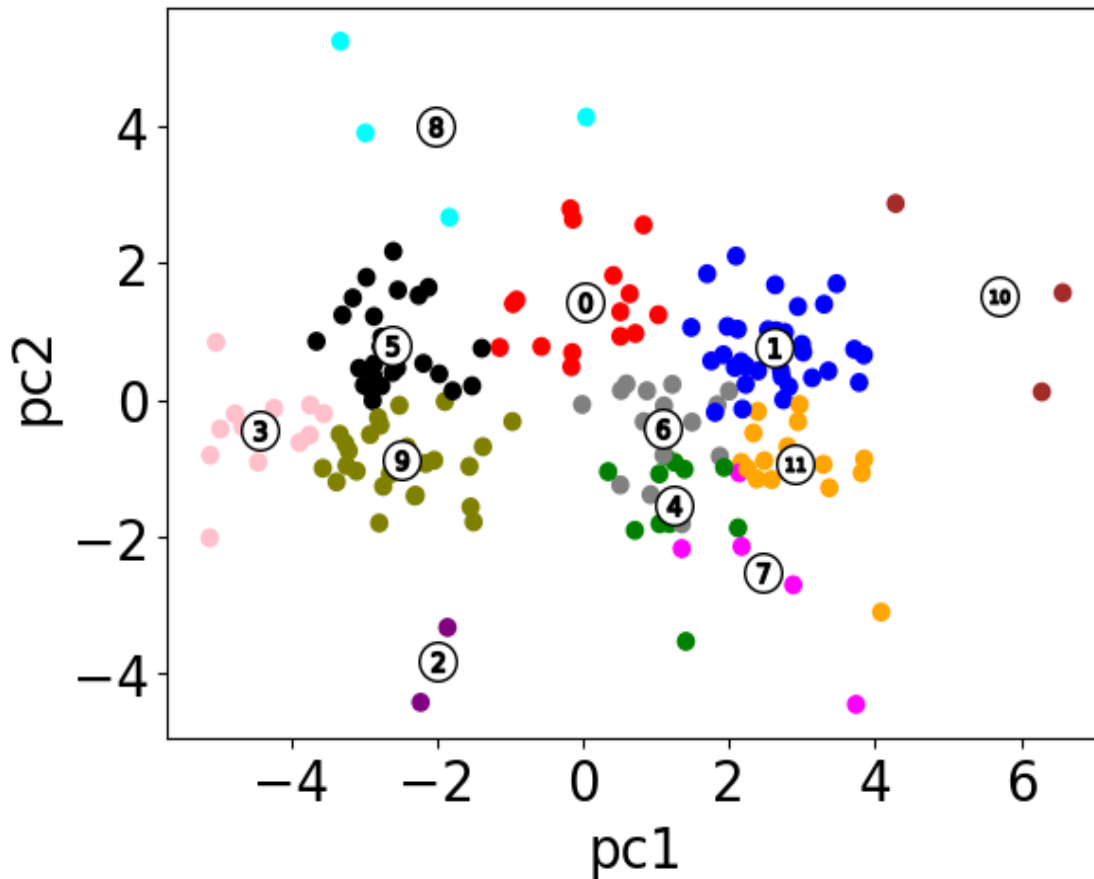


Figura 4.1: Classificação para os 170 espectros melhor reconstruídos. Os números indicam o número atribuído ao grupo e suas posições indicam as posições dos seus centróides.

asteroides que já possuem classificação, é confirmada ao longo do capítulo para os asteroides sem classificação prévia, a partir da inspeção visual, sendo um elemento de confirmação do sucesso da técnica aplicada.

## 4.2 Características Espectrais Dos Grupos

### 4.2.1 Sobre a comparação com as classes Bus-Demeo

Realizada a classificação, com os grupos definidos, chegamos à etapa que qualifica de maneira mais evidente o quão bem sucedida foi a metodologia aplicada no referente à separar os dados em relação às características dos espectros dos 170 asteroides analisados. Assim, convém discutir de maneira mais pormenorizada as características dos espectros dos asteroides dos doze grupos obtidos. Também é necessário ressaltar que algumas características apresentadas em trabalhos baseados em espectroscopia como o de [BUS e BINZEL \(2002\)](#) podem não ser perceptíveis em dados oriundos de fotometria como os da J-PLUS, por isso, não é sempre viável realizar uma correspondência precisa e direta entre os nossos grupos e as classes **Bus-Demeo**, ainda mais pela natureza não

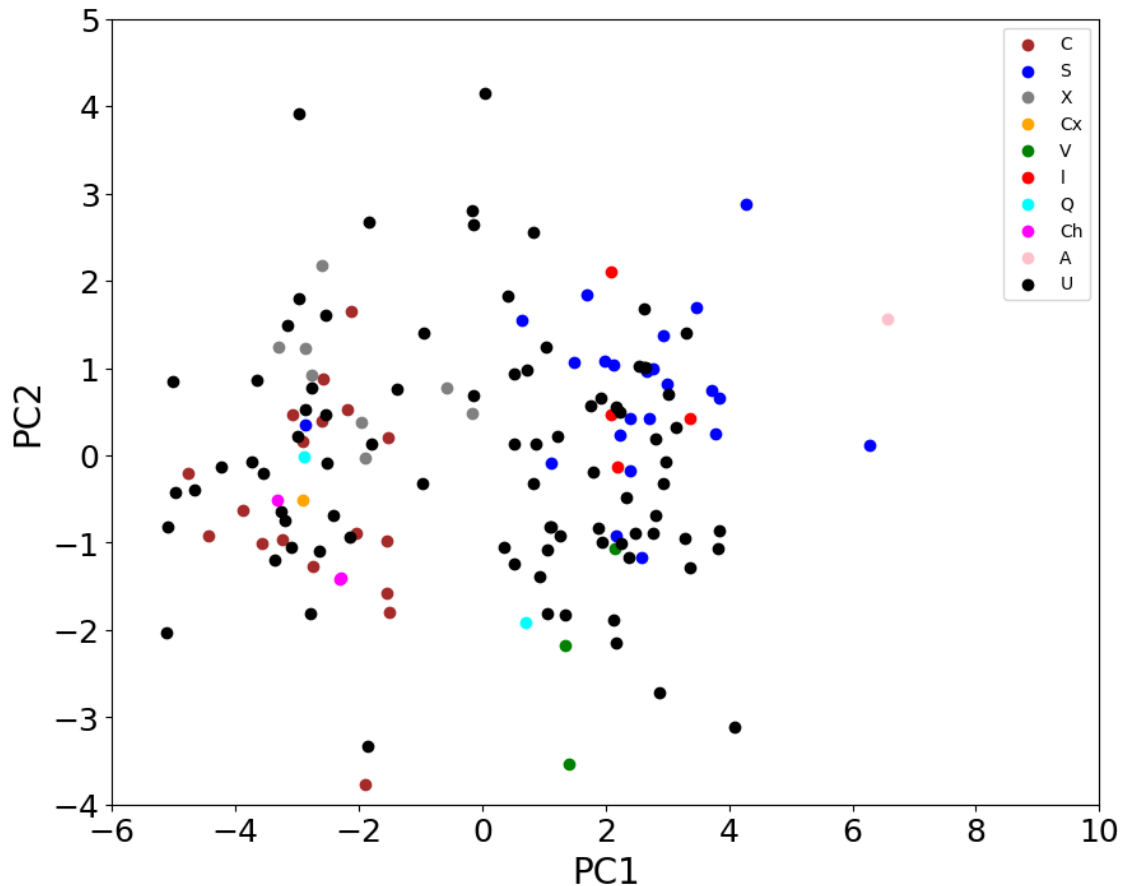


Figura 4.2: Distribuição das classes para os asteroides analisados em relação as duas primeiras componentes principais para objetos com classificação prévia. As cores representam classes na taxonomia de Bus-Demeo e Tholen, os pontos em preto representam objetos sem classificação prévia (U).

supervisionada de classificação, onde não houve qualquer restrição prévia para se obter as classes já conhecidas, fazendo que nos limites entre grupos próximos possamos ter algumas classificações destoantes.

Os grupos apresentados neste trabalho receberam uma denominação por sistema de letras, baseando-se na comparação dos espectros com os espectros das classes de [BUS e BINZEL \(2002\)](#). Ou seja, utilizamos tal comparação para atribuir a cada grupo numérico fornecido pela máquina um nome indicativo de possível composição com correspondência na taxonomia de [BUS e BINZEL \(2002\)](#), a despeito das diferenças da forma de obtenção dos dados. Assim, a nomenclatura baseada em um sistema de letras será apresentada ao fim da discussão, como um resultado. Contudo, ao longo de maior parte do capítulo utilizaremos a denominação numérica para fazer referência aos grupos e discutiremos a que classes mais se assemelham, especulativamente, a partir das inspeções visuais sobre os espectros. Os títulos das seguintes subseções apresentam o número dos grupos acompanhados da classe que atribuímos em nossa classificação, que tratamos na seção 4.4.1.

### 4.2.2 Grupo 3- B

O grupo 3 está posicionado do lado esquerdo, próximo ao centro do eixo da segunda componente, no gráfico da primeira versus a segunda componente, conforme pode ser visualizado na **figura 4.3** (lado esquerdo). Relativamente ao espectro médio do grupo, podemos notar que ele apresenta uma inclinação negativa a partir de  $0.4\mu m$ , características do espectro associado à classe Cb de **BUS e BINZEL (2002)** e semelhantes à classe B de **THOLEN (1984)**. A classe Cb foi apresentada pela primeira vez na classificação de **Bus (2002)**. Na taxonomia de **Bus (2002)** a classe Cb faz parte do complexo C, Sendo uma classe intermediária entre a classe C (com característica de absorção UV e com inclinação quase nula) e a classe B (sem característica de absorção e com inclinação negativa), o que acorda com a posição do grupo 3 próximo à concentração de objetos previamente classificados como C, B e outros do mesmo complexo.

Para os 12 asteroides que compõem o grupo, temos alguns com classificação prévia, como o **778 Theobalda** que é classificado como F na classificação de **Tholen (1984)** e o **1539 Borrelly** que foi classificado como B na classificação de **Bus (2009)**. As classes B e F apresentam bastante semelhanças em seus espectros e a presença de dois objetos dessas classes em um mesmo grupo não é incoerente.

### 4.2.3 Grupo 9- C

O grupo 9 é composto por 25 asteroides, está localizado à direita do grupo 3, no plano da primeira versus a segunda componente principal **figura 4.4**. O seu espectro médio também se assemelha aos espectros do complexo C de **Bus**, contudo apresenta uma leve queda na região entre  $0.8\mu m$  e  $0.9\mu m$ , além da acentuada queda em direção à faixa do UV. Por essa queda bastante acentuada no UV, em relação à classificação de **Bus** o espectro médio do grupo 9 talvez se assemelhe ao da classe Cg, surgida a partir da eliminação da classe G de **Tholen**, diferenciando da classe C por uma queda mais acentuada na região do UV. Dentre os objetos com classificação prévia, neste grupo, temos um classificado como Cg, o **501 Urhixidur**.

### 4.2.4 Grupo 5- X

O grupo 5 possui 26 asteroides, sendo o segundo mais numeroso. O seu espectro médio se mantém sem banda de absorção em toda região do visível e no intervalo de infravermelho coberto pelos nossos dados **figura 4.5**. Quatro dos objetos do grupo 5 que possuem classificação prévia pertencem à classe C de **Bus**, mas quatro também são classificados como X. A classe X foi definida por **Bus** para amalgamar os grupos E, M e P, que eram degenerados espectralmente e separados por valores de albedos. As classes

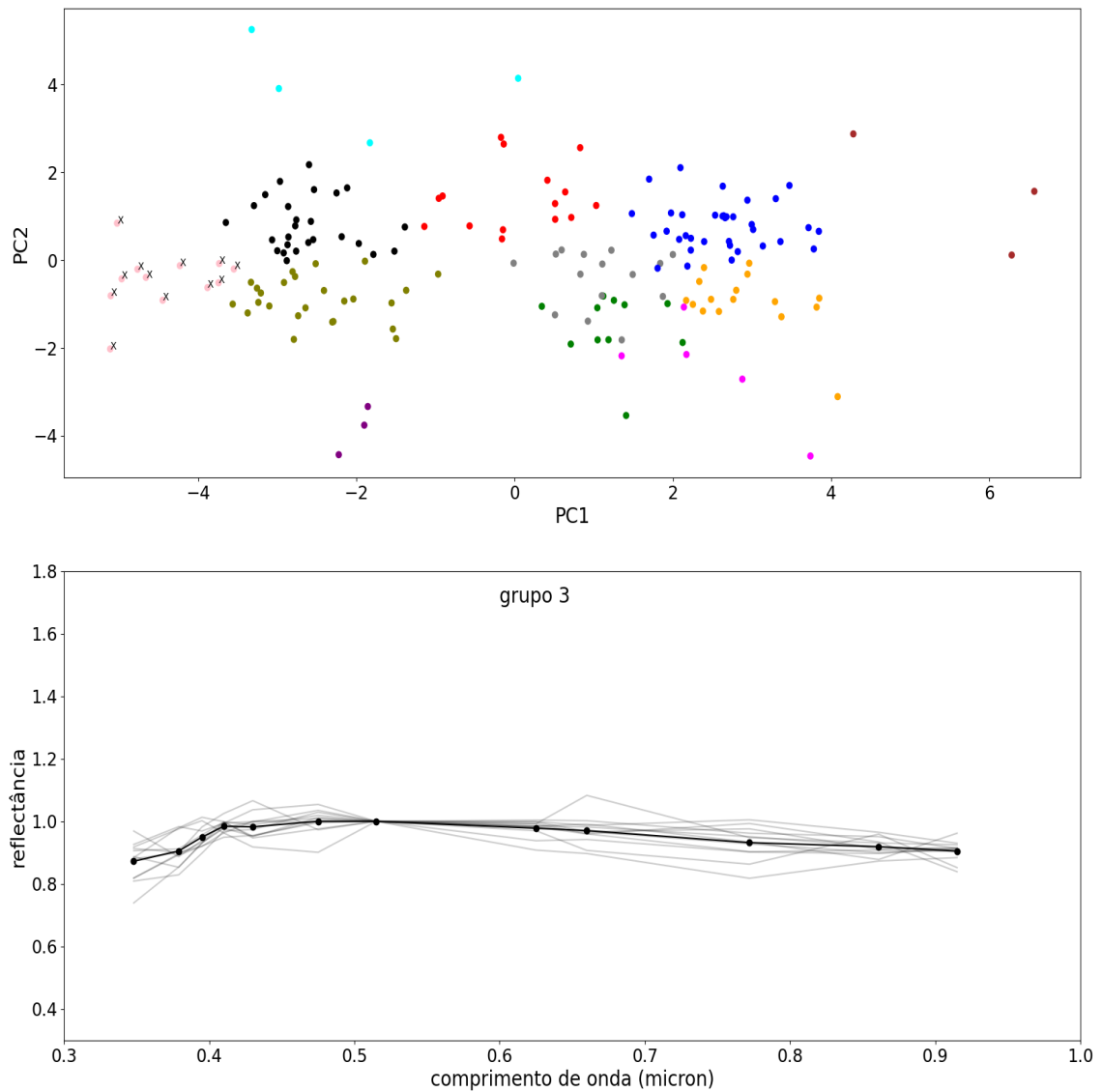


Figura 4.3: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 3 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 3 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto) (inferior).

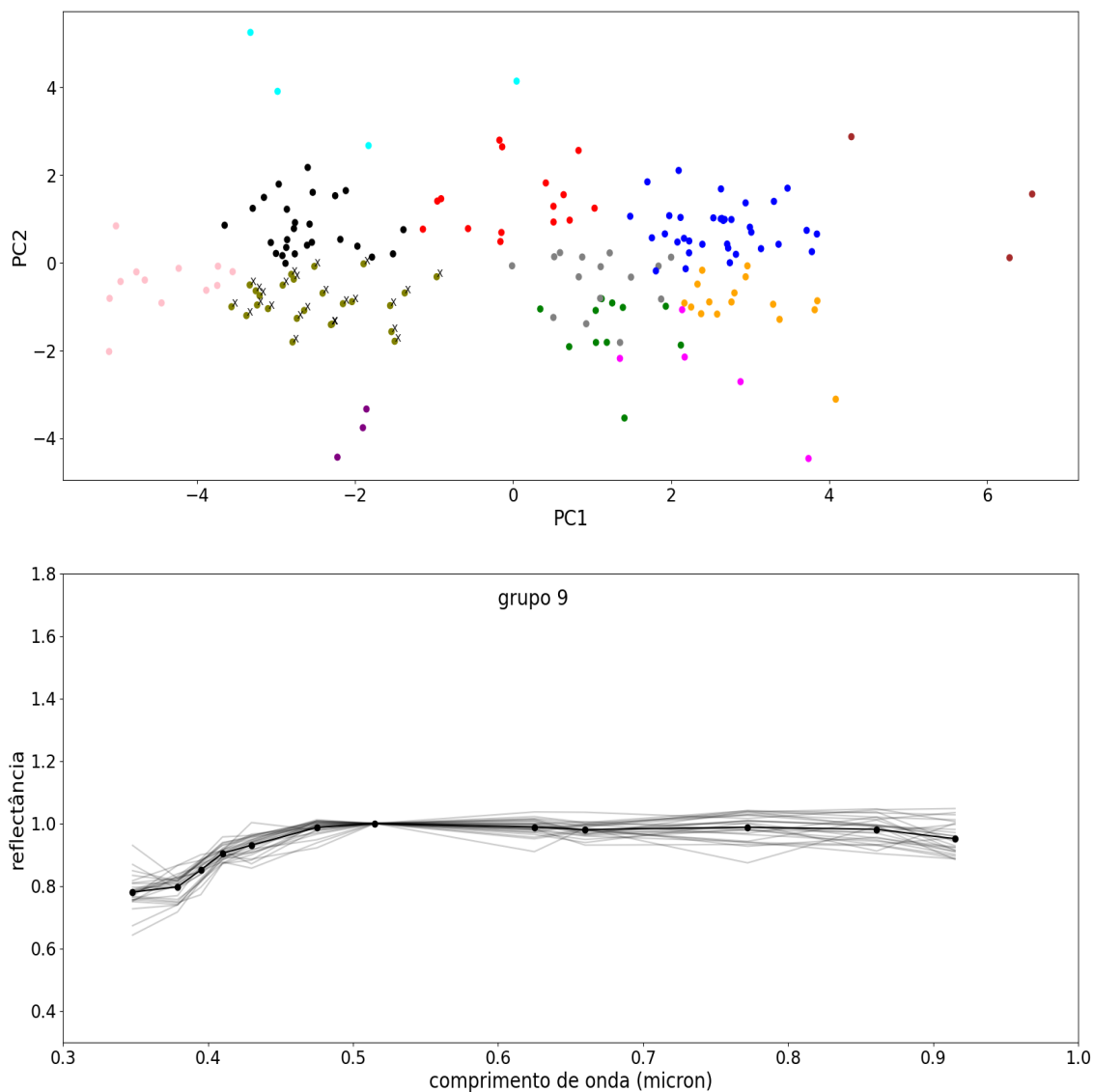


Figura 4.4: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 9 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 9 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

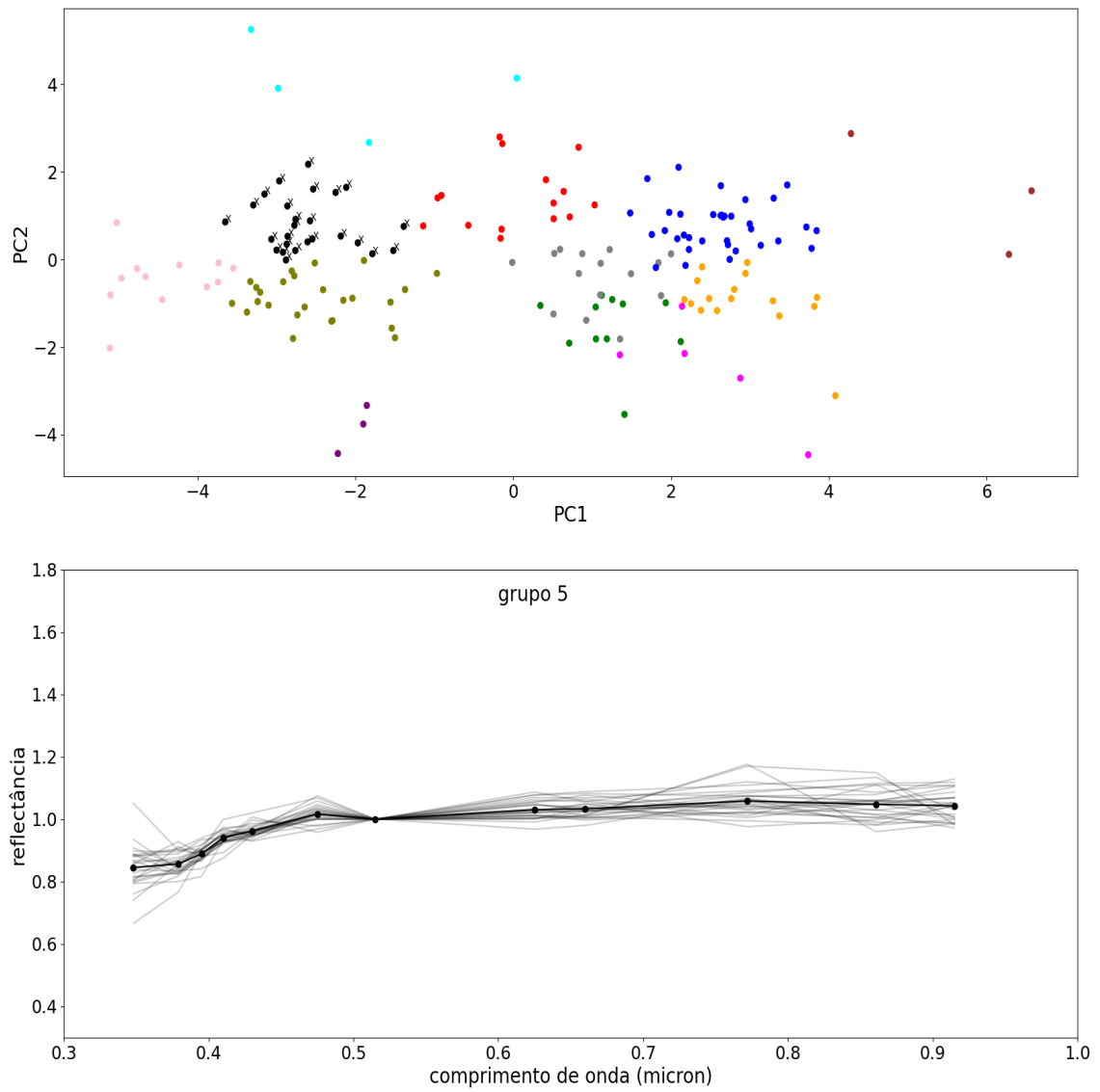


Figura 4.5: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 5 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 5 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

X e C compartilham algumas semelhanças espectrais, sendo possível classificações que reunam essas classes, a depender do método, como ocorre no grupo 5.

#### 4.2.5 Grupo 8- K

O grupo 8 possui 4 objetos **figura 4.6**, está na parte superior esquerda do plano pc1-pc2. Ao observamos seu espectro médio podemos ver que, ele apresenta bastante diferenças em relação aos grupos 3, 5 e 9. A começar, ele é mais avermelhado no intervalo do visível, sobretudo, entre  $0.50\mu m$  e  $0.60\mu m$ . À direita de  $0.60\mu m$  o espectro passa a ser mais plano, até  $0.86\mu m$  quando volta a se tornar avermelhado. Pelas características, possivelmente, o espectro do grupo 8 se aproxima dos referentes às classes K ou L, inserida por [TEDESCO et al. \(1989\)](#) para contemplar asteroides com parâmetros intermediários entre as classes C e S. A classe L foi introduzida por [BUS e BINZEL \(2002\)](#), para contemplar espectros com características entre K e S.

#### 4.2.6 Grupo 0- S2

O grupo zero possui 15 membros, está em uma região mais centralizada do plano das duas primeiras componentes principais, por isso, em relação aos asteroides com classificação prévia, vemos que possui dois previamente classificados como X e 1 como D, classes bem distintas. Referente ao espectro médio, vemos que ele é mais inclinado na região do visível, apresentando uma queda leve após  $0.75\mu m$  **figura 4.7**. Dadas as características, o grupo 0 está mais próximo da classe S, mesmo com uma banda na região associada a silicatos moderada. Devido às características da análise de agrupamento escolhida, é esperado que surjam grupos que se encontram no limiar entre características importantes, no caso, a banda em  $1\mu m$  e a despeito dos dois objetos previamente classificado como X, a maior identificação do grupo é com a classe S.

#### 4.2.7 Grupo 6- S1

O grupo 6 também possui 15 objetos, está localizado abaixo e à direita do grupo 0, também apresentando características espectrais semelhantes aos da classe S (**figura 4.8**). No entanto, podemos notar em seu espectro uma banda mais acentuada após  $0.75\mu m$ .

O grupo 6 possui apenas um objeto com classificação prévia, pertencente à classe S. Além disso, comparado ao espectro médio do grupo 0, vemos que no grupo 6 há um declive na fase final do infravermelho coberta por nossa amostra, enquanto o espectro do grupo 0 termina plano.

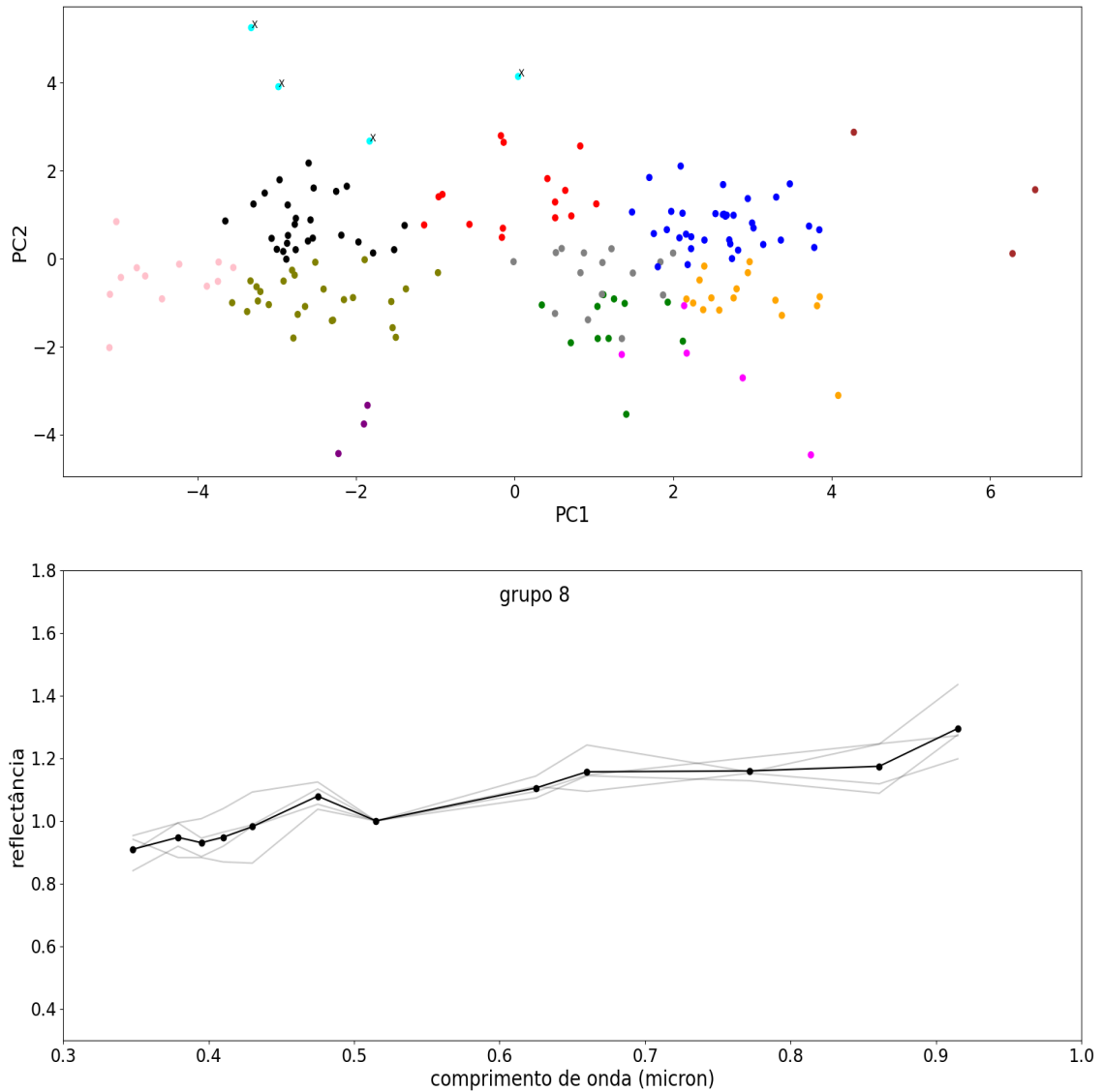


Figura 4.6: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 8 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 8 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

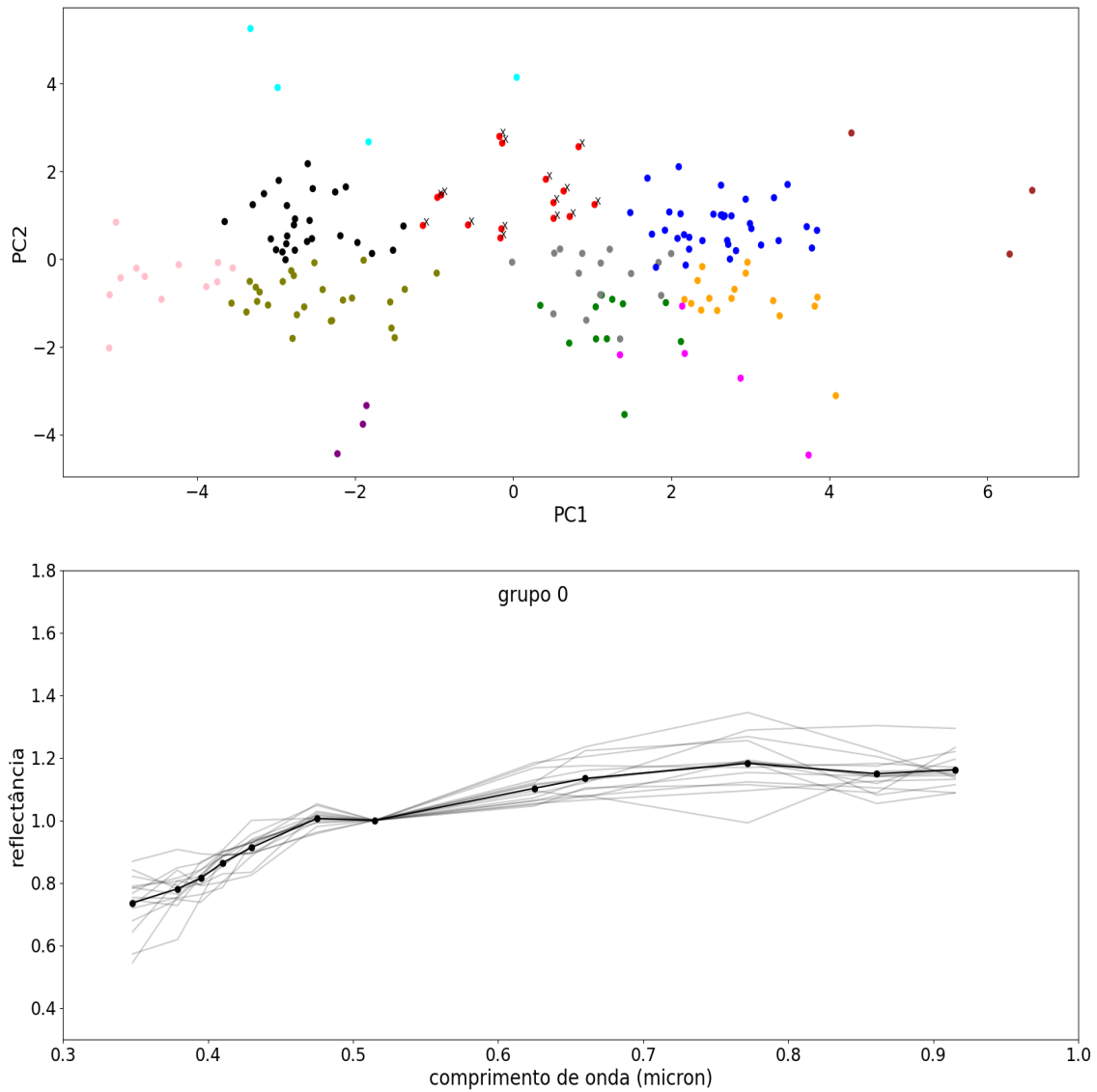


Figura 4.7: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 0 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 0 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

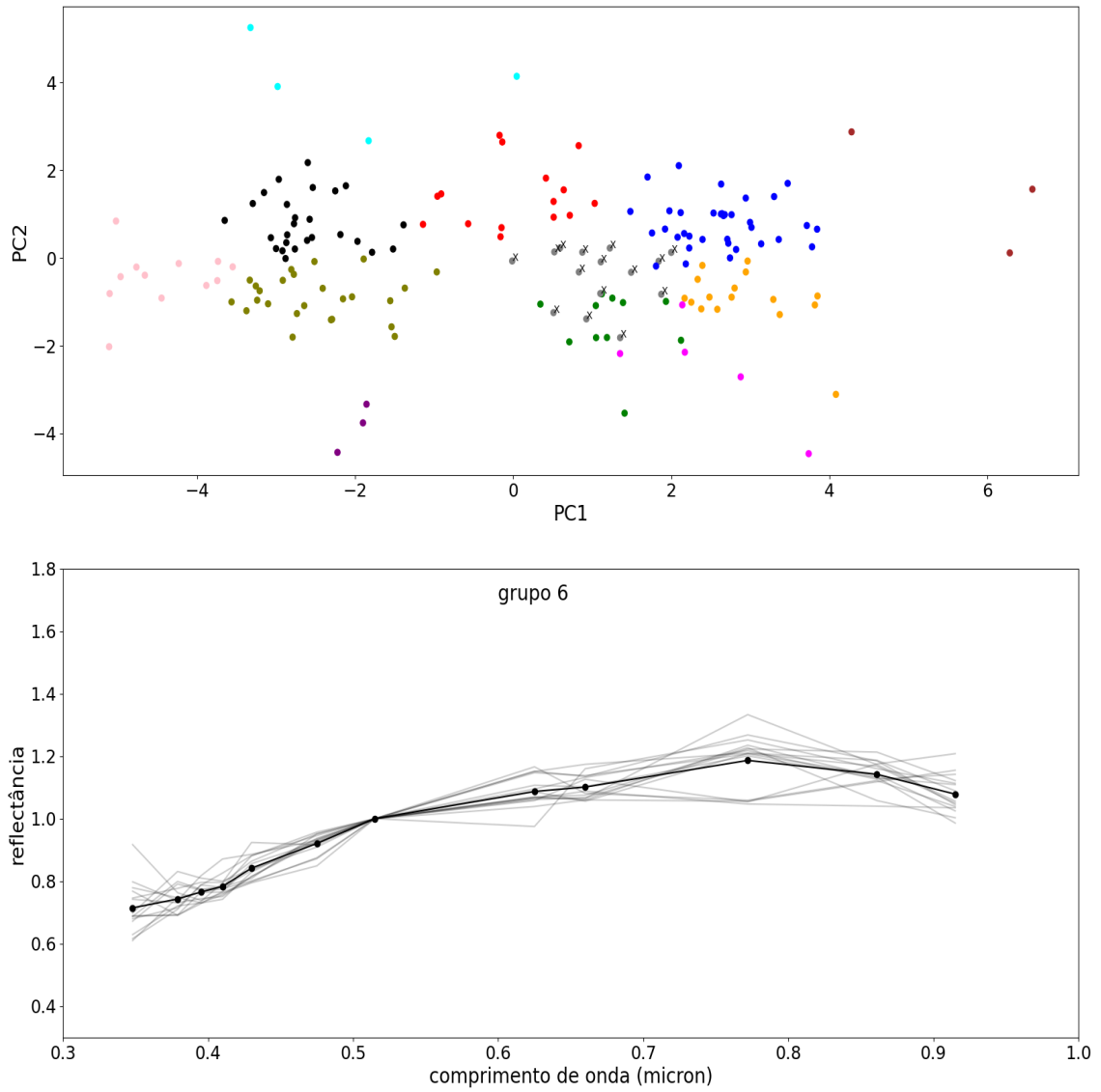


Figura 4.8: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 6 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 6 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

### 4.2.8 Grupo 4- VQ

O grupo 4 possui 11 membros, está localizado na parte central direita do plano pc1-pc2 (**figura 4.9**). Relativamente ao seu espectro, vemos que ele é crescente ao longo de todo intervalo  $0.3 - 0.77\mu m$ , após este intervalo, o espectro apresenta uma queda bastante acentuada. Dada a profundidade da banda que este grupo apresenta na região após  $0.77\mu m$ , ele se assemelha com as classes V, Q ou R. A classe V recebeu esta denominação na classificação de **THOLEN (1984)**, contudo o asteroide que o caracteriza, 4 Vesta está presente em grande parte dos trabalhos pré classificações taxonômicas, sendo o primeiro a ser observado por espectrofotometria no intervalo  $0.3 - 1.1\mu m$  por **MCCORD et al. (1970)**. Vesta está presente na taxonomia de **CHAPMAN et al. (1975)** sendo considerado o objeto com as características mais distintas de toda a amostra. Como nessa taxonomia houve a divisão apenas em dois grupos C e S e um terceiro denominado U serviu para indicar os asteroides não classificados, foi esta a atribuição de classe dada à Vesta. A classe Q também teve origem na classificação de **Tholen(1984)** e assim como a classe V servia para caracterizar um único membro o *NEA* 1862 Apollo. A classe R de espectro semelhante ao de V e Q era o grupo do único membro asteroide 349 Dembowska.

Apenas um asteroide possui classificação prévia nas taxonomias observadas, o 4327 Ries, sendo classificado como Sk.

### 4.2.9 Grupo 7- V

Com 5 membros, o grupo 7 está na parte de baixo à direita da distribuição em relação às duas primeiras componentes principais (**figura 4.10**). O espectro médio do grupo é positivamente inclinado ao longo de todo intervalo  $0.3 - 0.66\mu m$ , é praticamente plano no curto intervalo  $0.66 - 0.77\mu m$ , e apresenta forte queda em direção ao infravermelho. As referidas características também se assemelham aos grupos V, Q, R. Contudo, quando comparados os espectros dos grupos 4 e 7, percebemos que o segundo possui uma característica de absorção mais acentuada na região à direita de  $0.77\mu m$ . Por essa profundidade de banda mais acentuada a indentificação com a classe V tende a ser mais apropriada ao grupo 7.

No que concerne às classificações prévias, apenas o asteroide de identificação 5754 foi classificado como V, considerando a nossa verificação sobre as taxonomias realizadas.

### 4.2.10 Grupo 11- Sv

O grupo 11 está situado na parte direita central do plano das duas primeiras componentes principais, com 16 membros. Seu espectro médio é avermelhado até o comprimento de onda de  $0.77\mu m$ , onde apresenta característica de absorção. Relativamente

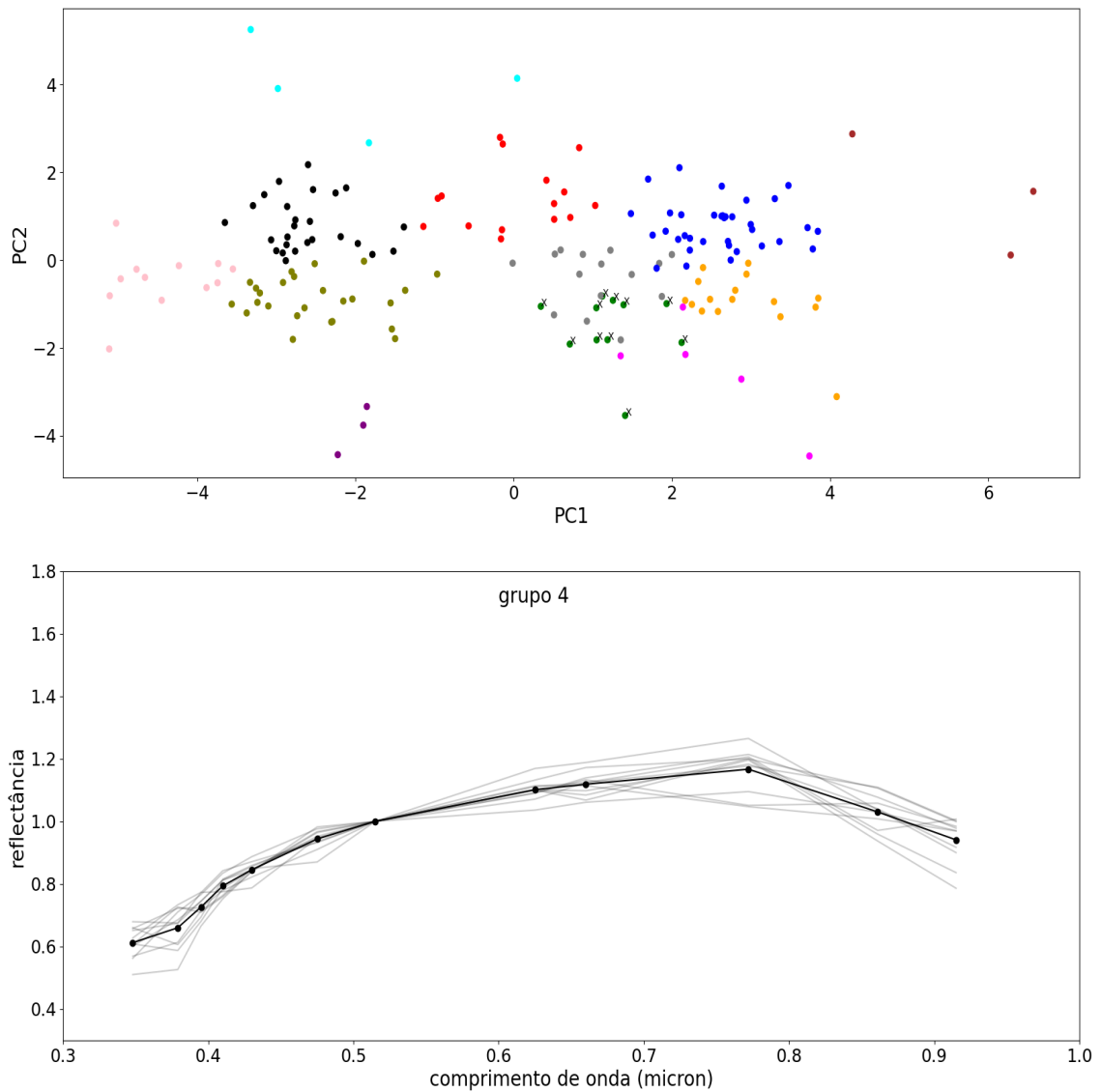


Figura 4.9: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 4 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 4 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

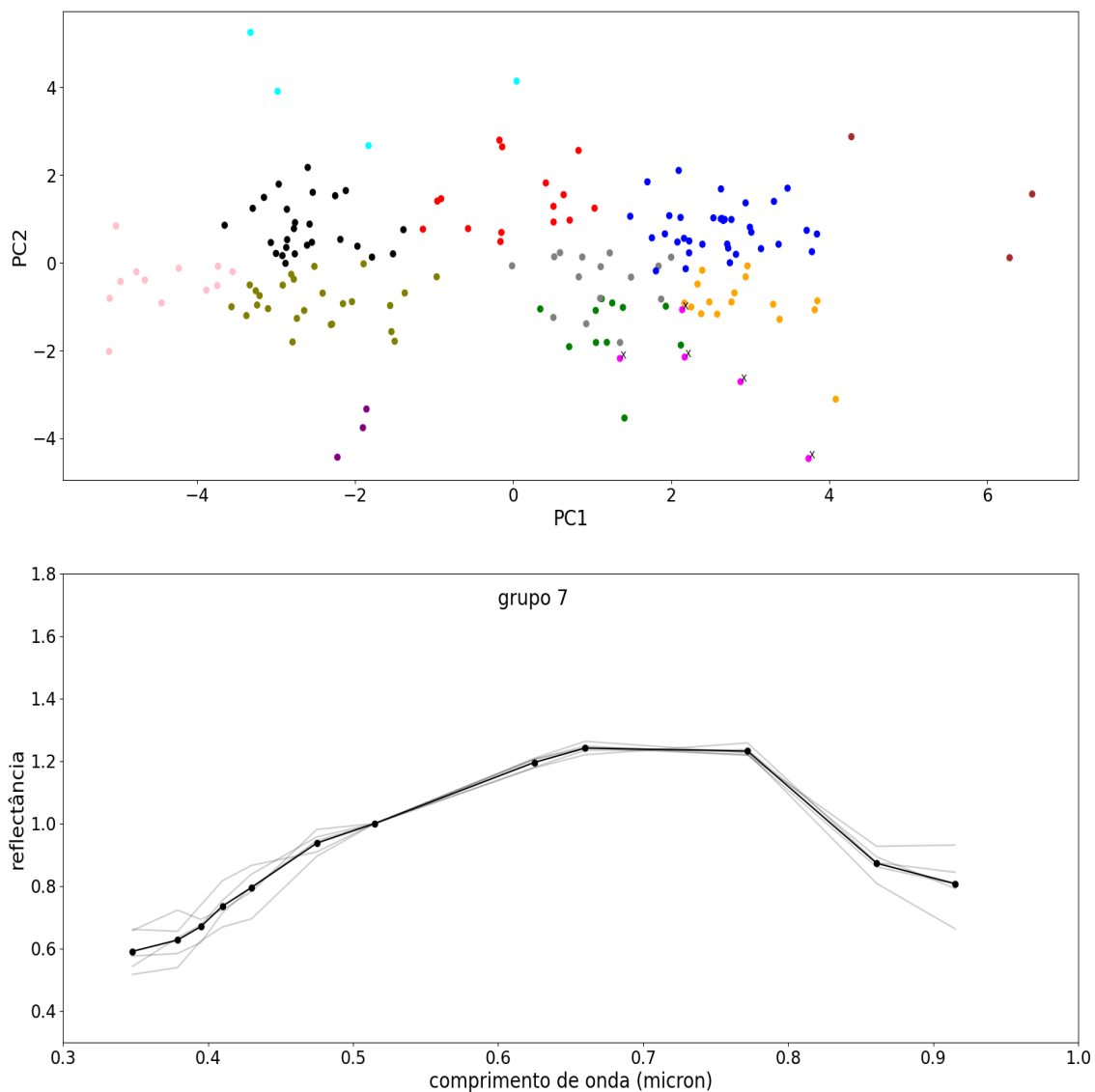


Figura 4.10: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 7 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 7 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

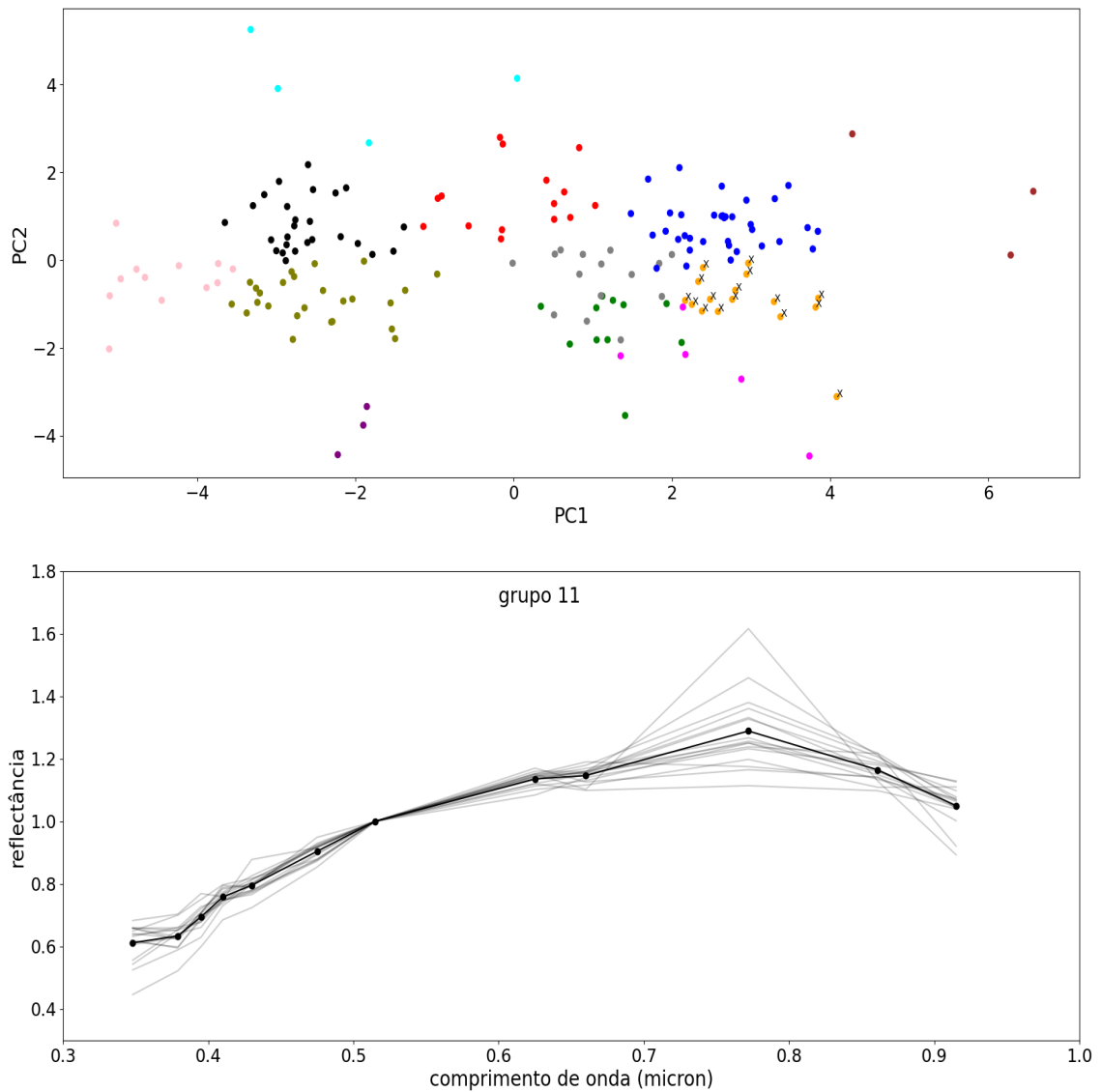


Figura 4.11: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 11 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 11 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

às classificações anteriores, o grupo 11 tem três objetos classificados como S, enquanto os outros não aparecem nas classificações observadas (**figura 4.11**). Pelas características do espectro, este é mais um dos grupos indentificados com a classe S, ou com algum dos seus semelhantes como da classe L ou A.

#### 4.2.11 Grupo 1- S3

O grupo 1 está localizado na parte superior direita em relação às duas primeiras componentes principais (**figura 4.12**), é constituído por 35 membros, sendo o grupo mais numeroso de nossa classificação. O seu espectro é crescente ao longo de todo intervalo  $0.3 - 0.7\mu m$  a partir de então apresentando uma banda na região associada à olivina-piroxênio. Logo, pelas características, é possível identificar este grupo com a classe S.

Dos objetos já classificados do grupo 1, 17 são atribuídos à classe S em classificações anteriores, enquanto 5 receberam a classificação de L.

#### 4.2.12 Grupo 10- SA

Localizado na parte mais extrema à direita do plano das duas primeiras componentes principais (**figura 4.13**), o grupo 10 se constitui de três asteroides. O seu espectro se caracteriza por uma inclinação positiva por todo intervalo de comprimento de onda  $3 - 7.7\mu m$ , com uma queda após  $7.7$ , características comuns a espectros da classe S ou A. Os três asteroides pertencentes ao grupo 10 possuem classificação em trabalhos anteriores, o 446 Aeternitas é classificado como A, enquanto o 1709 Ucraina e o 3300 McGlasson receberam a classificação S.

#### 4.2.13 Grupo 2- Ch

O último grupo a ser considerado é o que apresenta o espectro médio mais peculiar dos grupos obtidos. O grupo 2 está localizado na parte central inferior do plano das duas primeiras componentes principais e possui três membros (**figura 4.14**). Seu espectro médio é positivamente inclinado no intervalo  $0.35 - 0.52\mu m$ , após este intervalo, apresenta uma banda de absorção com centro no intervalo  $0.6 - 0.7\mu m$ , característica presente em espectros associados ao grupo Ch de **Bus**, que se caracterizam pela presença de minerais hidratados [RIVKIN et al. \(2015\)](#). A caracterização desses objetos era realizada a partir de uma banda em  $3\mu m$ , contudo, [VILAS \(1994\)](#) demonstrou que havia uma forte correlação da banda em  $3\mu m$  com a banda em  $0.7\mu m$ . A possibilidade de substituição da banda de procura para caracterizar este grupo de asteroides surge oportunamente, devido à dificuldade de observação em  $3\mu m$  [BUS e BINZEL \(2002\)](#).

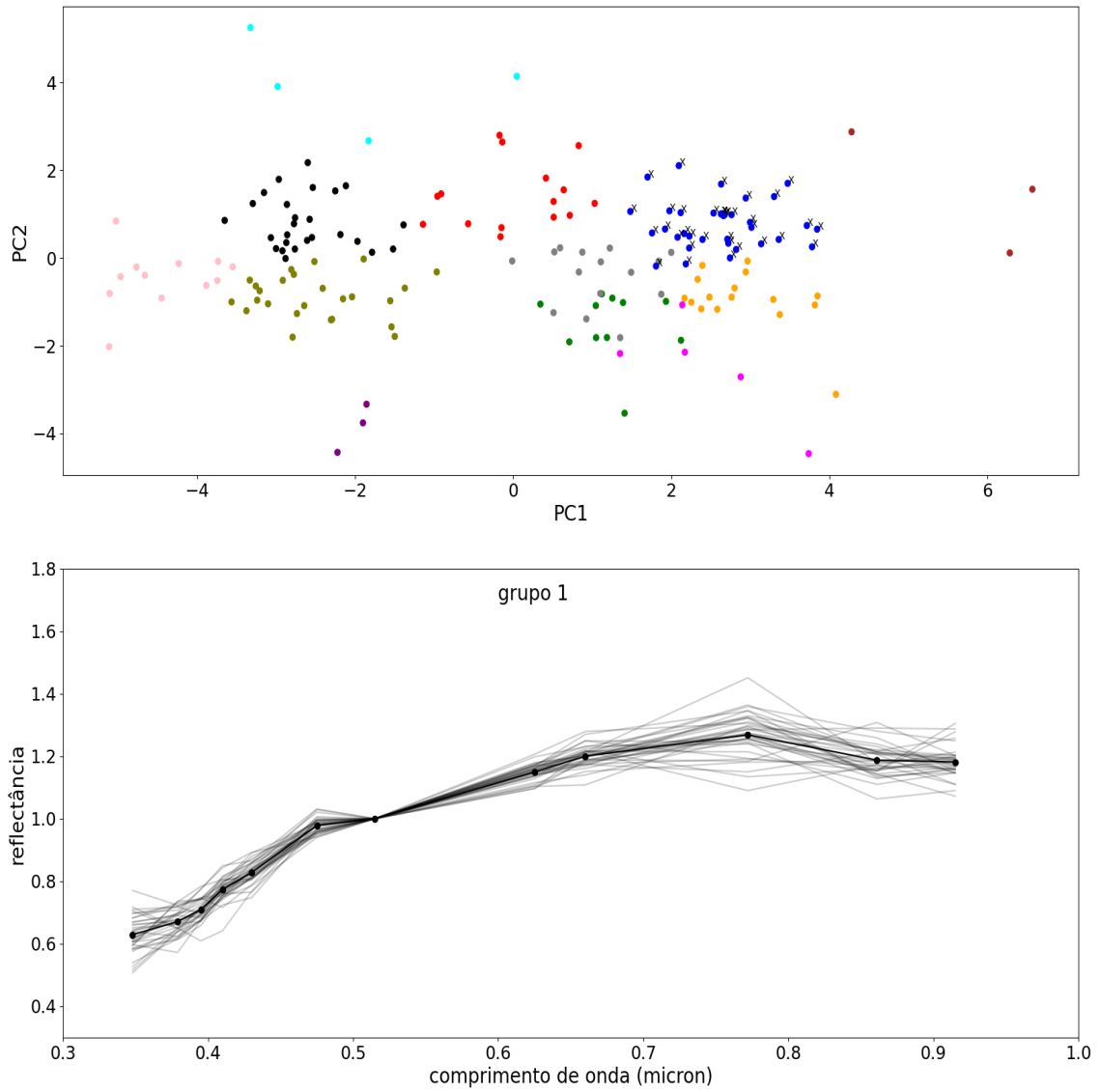


Figura 4.12: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 1 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 1 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

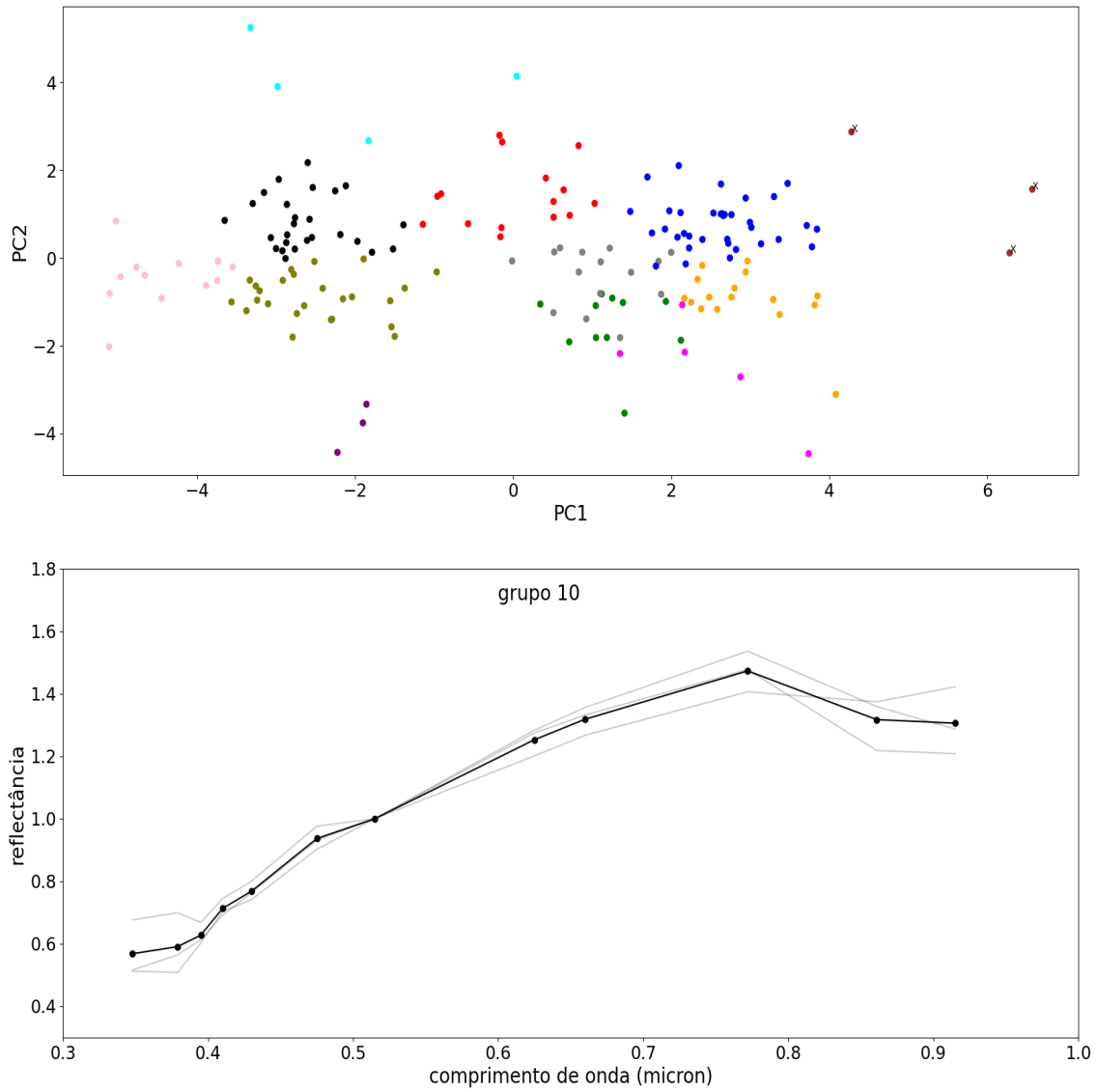


Figura 4.13: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 10 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 10 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

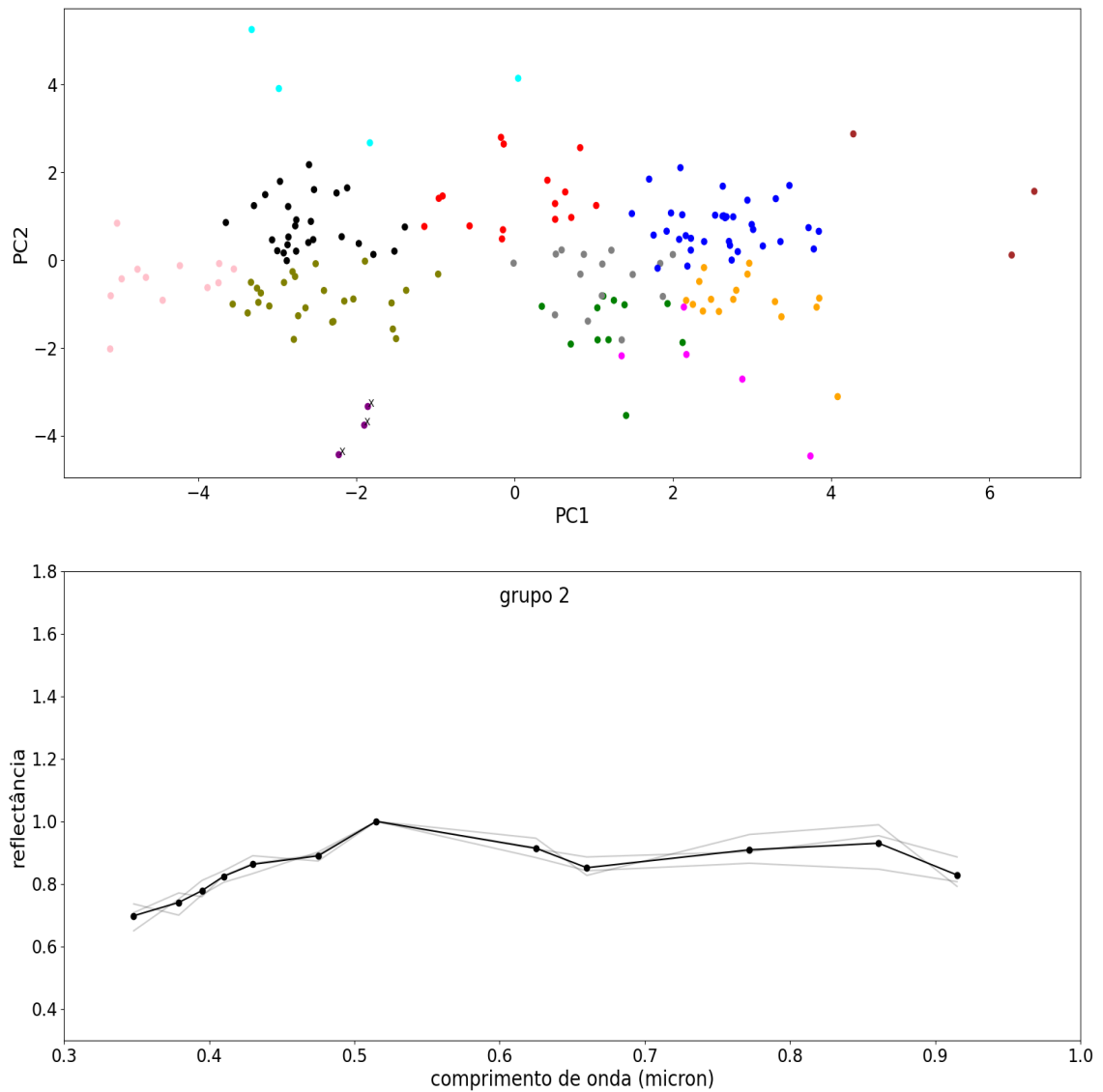


Figura 4.14: Gráfico da primeira componente versus a segunda componente principal com a posição do grupo 2 marcada por "x"(superior). Espectros dos asteroides do grupo 2 (cinza sombreado) com o espectro médio do grupo (preto)(inferior).

### 4.3 A Distribuição Dos Grupos Em Relação às propriedades dinâmicas

Uma possibilidade de análise sobre a classificação obtida corresponde a verificar como os grupos se distribuem em relação a parâmetros dinâmicos. Neste caso, observamos como os objetos se distribuem em relação ao semieixo maior e à inclinação osculantes. Apesar do número pequeno de amostras, tal observação serve para maior conhecimento sobre os grupos obtidos.

Desde a classificação taxonômica feita por [CHAPMAN \*et al.\* \(1975\)](#), ficou evidenciada a concentração de objetos associados à classe S em regiões mais internas do cinturão principal, enquanto objetos da classe C dominavam na região mais externa, resultado replicado ao longo das investigações semelhantes através dos anos, apesar de cada vez mais asteroides da classe S detectados ao longo dos anos [DEMEO e CARRY \(2014\)](#).

Observando os grupos obtidos em nossa classificação ([figura 4.15](#)) vemos uma distribuição espalhada dos asteroides de grupos que se aproximam espectralmente aos da classe S na região de semieixo maior inferior a 3 UA (amarelo) com a redução desses objetos após este intervalo, enquanto para valores maiores que estes, predominam os asteroides dos grupos que mais se assemelham à classe C (vermelho), conforme se nota pela dominância do vermelho no lado direito do gráfico. As características de distribuição dos dois conjuntos ficam mais evidentes quando observamos a distribuição em relação ao semieixo maior na forma de histograma, onde o intervalo de semieixo maior foi particionado em 8 "caixas" iguais ([figura 4.16](#)), onde se nota mais claramente a concentração dos grupos de espectros próximos à classe C em semieixo maior superior a 3 UA.

Observando a distribuição dos grupos individualmente, são notadas algumas características que podem ser destacadas ([figura 4.17](#)). O **grupo 2** que apresenta espectros semelhantes ao Ch têm os seus três asteroides bastante afastados, tornando nula qualquer possibilidade de se tratarem de membros de uma mesma família dinâmica. Entre outros grupos com poucos membros não há qualquer proximidade considerável, o **grupo 8 (semelhante a K ou L)** tem três de seus quatro objetos em distâncias relativamente próximas, porém com inclinações bastantes distintas. O **grupo 4 (semelhante a V ou Q)** se divide em grupos com certa proximidade, com três objetos bastante isolados dos demais. O **grupo 7 (semelhante a V ou Q)** apresenta objetos bastante isolados. Outro ponto a se destacar é que o objeto com a maior inclinação pertence ao **grupo 3**, o asteroide de identificação **189251 (2004 TN8)**, sendo o único com inclinação superior a 30 graus.

Logo, com o observado, podemos concluir que o resultado mais notável em relação à distribuição dos grupos em relação à inclinação e semieixo maior osculantes concerne às distribuições dos grupos espectralmente semelhantes às classes C e S, onde observamos um padrão esperado, com base em resultados anteriores, ou seja de domínio da classe C

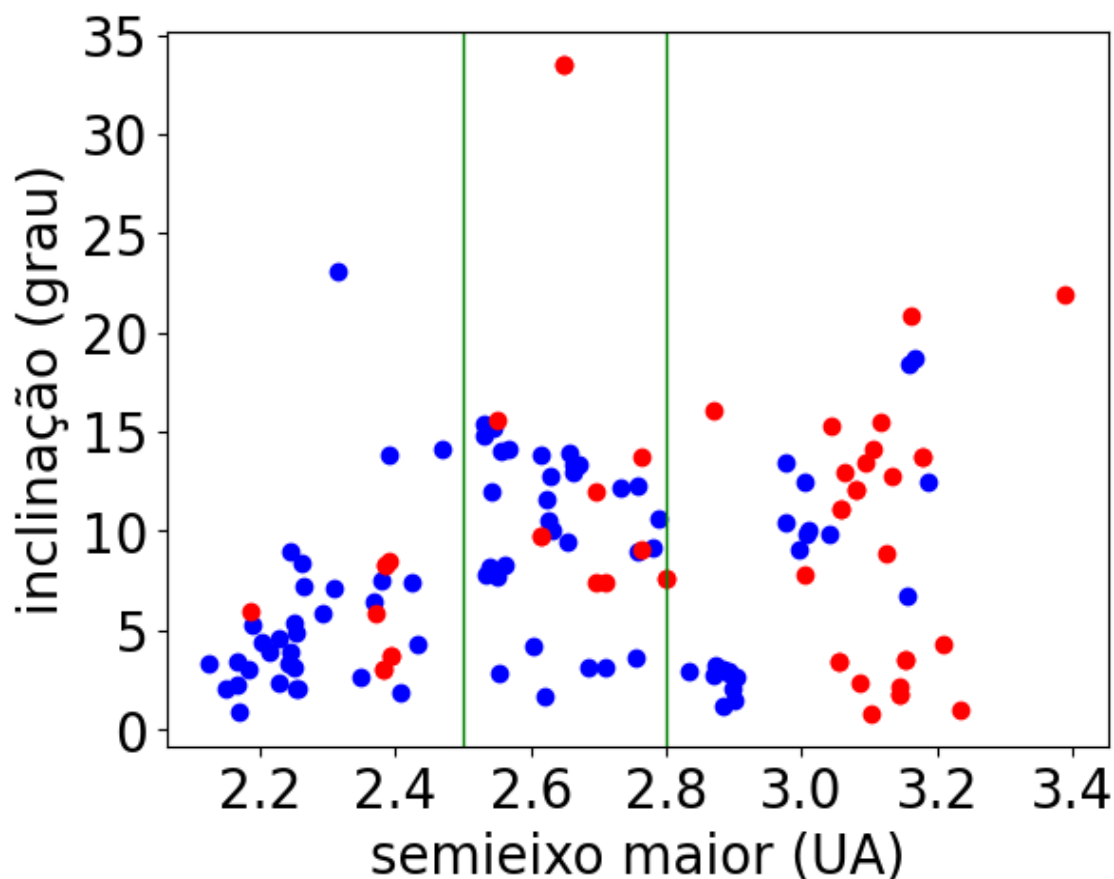


Figura 4.15: gráfico Inclinação versus semieixo maior, para os asteroides dos grupos 10, 6, 11 0 e 1 (semelhantes à classe S) (azul) e para os asteroides dos grupos 3, 9 e 5 (vermelho) (semelhantes à classe C). As linhas verticais verdes dividem o gráfico em três regiões, 2.0-2.5 UA (interior do cinturão), 2.5-2.8 UA (região central) e superior a 2.8 UA região exterior.

na parte exterior do cinturão principal.

## 4.4 Conclusão Sobre A Classificação

De modo a concluir nossa análise sobre a classificação, devemos discutir mais tais resultados, tanto de comparação com classificações anteriores, como relativamente às diferenças de características presentes nos espectros dos grupos obtidos, previamente abordadas na seção 4.2, objetivando, dessa maneira avaliar, dentro das possibilidades, a coerência da classificação.

Na **tabela 4.1** são apresentadas as classificações obtidas por *K-means* para os 170 melhores espectros reconstruídos e as classificações, para os objetos que as possuem, nas taxonomias de **Tholen-Bus**. Para os poucos objetos que possuem classificação prévia nas metodologias de Bus ou Tholen, está evidenciada a coerência de nossa classificação, já que, todos aparecem em grupos com objetos espectralmente semelhantes. Na **tabela**

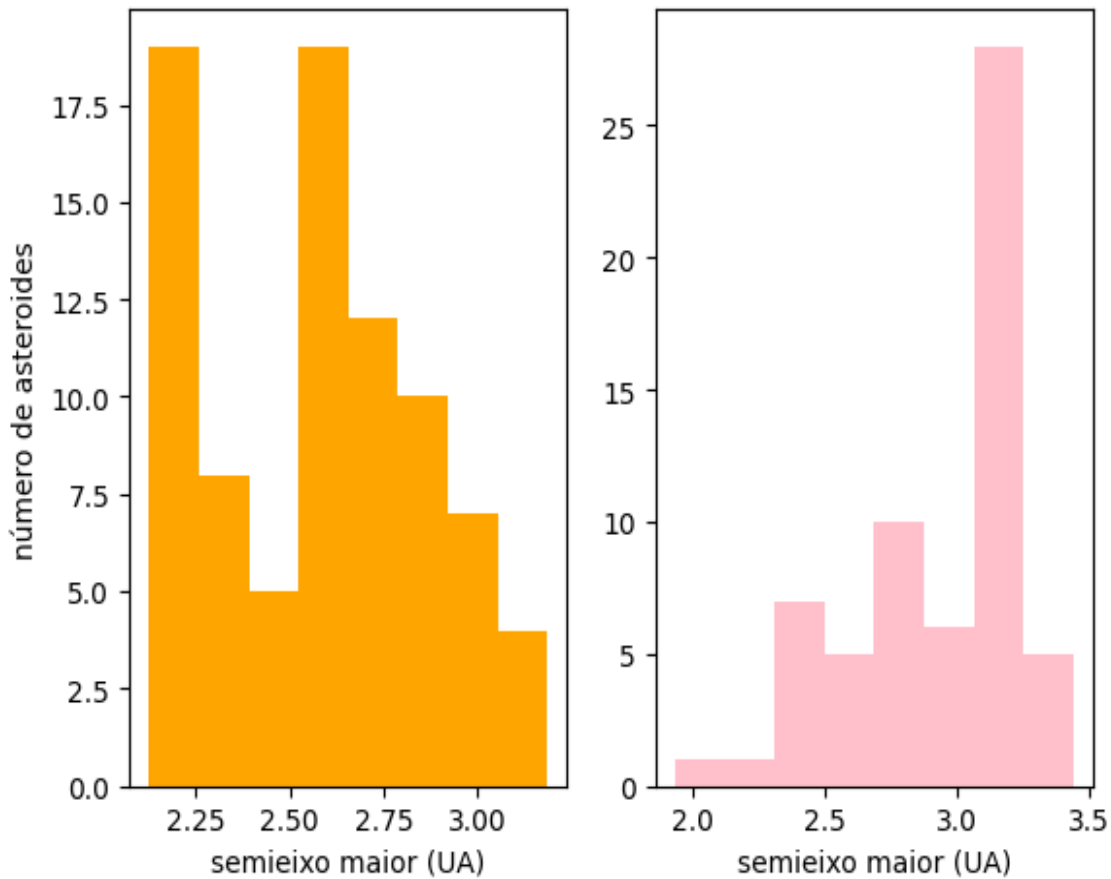


Figura 4.16: histograma da distribuição de asteroides em relação ao semieixo maior. Distribuição dos grupos 0, 1, 6, 10 e 11 ( esquerda laranja) (espectralmente semelhantes à classe S). Distribuição dos grupos 3, 5 e 9 ( direita rosa) (espectralmente semelhantes à classe C).

4.5 estão os números de objetos para cada classe de Tholen-Bus associado a cada um dos grupos que obtivemos pela classificação com K-MEANS. Dentro do pequeno grupo de objetos com classificações em taxonomias anteriores, mais uma vez se nota a coerência na classificação para estes objetos, com exceção para um asteroide com uma classificação S em uma taxonomia anterior que em nossa classificação está no grupo 5, claramente associado às classes do espectro C.

Um dos objetivos de nossa análise e indicador de um resultado satisfatório é a obtenção de grupos com características que justifiquem a divisão obtida. Deste modo, podemos dizer que a divisão dos grupos que obtemos está de acordo com a distinção dos espectros. Tais diferenças podem ser notadas tanto pelo discutido (**seção 2**) como pelo resumido na **tabela 4.6**, onde apresentamos a nomenclatura que definimos para os grupos obtidos a partir da comparação dos espectros médios dos grupos de nossa classificação com os espectros das classes de [BUS e BINZEL \(2002\)](#). Além disso, é possível notar uma predominância de coerência entre os espectros dos grupos. Ou seja, os espectros para o mesmo grupo se assemelham, na grande maioria dos casos.

### 4.4.1 Definindo uma nomenclatura

Detalhando a nomenclatura apresentada na **Tabela 4.6**, importa ressaltar que em alguns casos a correspondência direta com a classificação de BUS e BINZEL (2002) não é evidente, dada a já referida diferença na obtenção de dados. Por isso, procuramos priorizar letras maiúsculas para nomear às classes, já que, é difícil encontrar nuances que caracterizem subgrupos. No entanto, a segunda letra minúscula é utilizada em alguns casos, onde especificidades de subgrupos ficam evidenciadas mais claramente nos espectros, a partir de diferenças mais sutis nos espectros médios que possam ser notadas visualmente. Atribuímos uma letra maiúscula para os grupos com identificação mais clara, para classificações ambíguas atribuímos mais de uma letra maiúscula correspondente às classificações possíveis.

Os grupos 3, 9 e 5 são os que apresentam espectros semelhantes aos do complexo C **figura 4.18**. O grupo 3 se destaca dos outros dois, pois apresenta um azulamento de seu espectro, por isso o associamos à classe B. Já os espectros dos grupos 9 e 5 apresentam diferenças mais sutis. O espectro médio do grupo 9 é mais plano a partir  $0.4\mu m$  enquanto o espectro do grupo 5 apresenta um leve avermelhamento característico do grupo X, por isso, atribuímos o grupo 9 à classe C e o grupo 5 à classe CX, já que, não é tão clara a associação do grupo 5 com uma das duas em detrimento de da outra.

Nos grupos 0, 1, 6, 10 e 11, vemos as características espectrais compatíveis com o complexo S, com os três primeiros apresentando grande semelhança tornando-os quase indistinguíveis, contudo ao analisarmos seu espectros médios em conjunto (**figura 4.19**), podemos notar diferenças e a principal é a inclinação no intervalo do visível, onde o grupo 6 apresenta a menor inclinação, o grupo 0 têm a inclinação um pouco maior e o grupo 1 tem a maior inclinação dos três. Baseando-se neste aspecto, nomeamos os três grupos como S acompanhados de um número indicando a inclinação na região entre  $0.515\mu m$  e  $0.772\mu m$  1 a 3 do menos para o mais avermelhado. Deste modo, o grupo 6 é S1, 0 é S2 e 1 é S3.

Analisando o grupo 11, notamos algumas diferenças em comparação aos três grupos citados anteriormente, a principal é a queda mais abrupta à direita de  $0.77\mu m$  (**figura 4.20**). Por essa característica, chamamos esse grupo de Sv, pois, além da profunda banda, esse grupo está no espaço das componentes principais em uma região próxima aos grupos 7 e 4, que são espectralmente próximos da classe V.

O grupo 10 já apresenta um avermelhamento mais acentuado à esquerda de  $0.77\mu m$  em relação aos outro quatro grupos, por isso o denominamos de SA, pois, visualmente, o seu espectro está no limiar entre essas classes.

Para os espectros dos grupos 4 e 7 que compartilham algumas características comuns, como uma queda profunda à direita de  $0.77\mu m$ , com algumas diferenças como um avermelhamento maior do espectro do grupo 7 à esquerda da banda de absorção, e tam-

bém uma aparente banda mais profunda. Por essas características, atribuímos ao grupo 7 a classe V e o grupo 4 denominamos VQ.

Os dois grupos restantes 8 e 4 têm as mais peculiares características espectrais entre os grupos obtidos. O grupo 8 apresenta características próximas às classes K e L, por isso, o denominamos como KL. Já o grupo 2 com a perceptível banda de absorção centrada em  $0.7\mu m$  é denominada com Ch.

A partir das diferenças de características observadas nesta seção e ao longo de todo capítulo, a despeito de algumas possíveis incoerências isoladas de classificação decorrentes da natureza não supervisionada do método, podemos concluir que obtivemos grupos com características espectrais distintas, como objetivado do início do processo. Logo, tal resultado nos permite, de forma válida, ter uma análise da possível distribuição composicional do conjunto de asteroides analisados.

Tabela 4.1: classificação para os 170 asteroides

Identificação	K-means	Tholen-Bus
90	9	C
95	9	C
184	5	X
277	6	S
281	1	S
328	5	S
331	5	C
401	5	-
412	9	C
446	10	A
448	9	C
462	1	S
473	11	-
501	9	Cg
598	0	X
611	1	L
733	5	Cf
751	9	Ch
778	3	F
784	5	C
786	5	C
851	1	S
920	0	DTU
994	1	S
998	9	-
1024	9	Ch
1032	5	X
1098	5	Xe
1125	5	-
1237	3	-
1245	1	S
1448	9	-
1467	9	GC
1539	3	B
1561	9	-
1608	1	-
1661	1	-
1677	1	S

Tabela 4.2: continuação

Identificação	K-means	Tholen-Bus
1709	10	-
1736	1	-
1796	5	Cb
1937	11	-
1961	5	-
2007	3	-
2066	3	-
2149	11	S
2188	0	-
2232	5	-
2251	9	Cb
2255	9	Cb
2321	9	-
2496	1	-
2557	7	-
2645	0	X
2723	5	-
2730	5	C
2828	11	-
2902	1	Sq
2963	0	-
3012	8	-
3016	0	-
3186	9	-
3262	5	X
3272	1	-
3300	10	S
3331	7	-
3438	9	-
3475	5	-
3610	1	-
3845	5	-
4025	1	S
4028	1	-
4217	1	-
4327	4	Sk
4380	6	-
4417	6	S
4560	6	-
4703	1	-
4719	9	C
4993	4	V
4998	6	-
5274	2	-

Tabela 4.3: Continuação

Identificação	K-means	Tholen-Bus
5572	9	-
5698	2	-
5754	7	-
5759	6	-
5795	1	-
5964	3	-
6437	1	-
6530	11	-
6918	11	-
7041	7	-
7246	3	-
7476	5	-
7588	5	-
8226	1	-
8476	11	-
8701	6	-
8769	1	-
9199	4	-
9230	9	-
9332	4	-
9471	4	-
9688	11	-
9755	7	-
11216	1	-
11787	11	-
12467	6	-
12481	0	-
12697	3	-
13078	0	-
13233	5	-
14382	6	-
14498	0	-
15419	4	-
15905	0	-
16270	1	-
16565	3	-
16598	0	-
16599	5	-
16785	0	-
17482	1	-
17783	6	-
17966	11	-
18195	11	-
18960	1	-
19989	1	-
20560	9	-

Tabela 4.4: Continuação

Identificação	K-means	Tholen-Bus
22325	4	-
23181	11	-
25046	4	-
25980	1	-
27028	1	-
28172	11	-
28594	9	-
29564	9	-
31227	1	-
31379	5	-
34238	8	-
35989	9	-
36492	1	-
37152	11	-
38057	1	-
38965	0	-
41438	1	-
42930	4	-
44709	11	-
46304	6	-
46631	2	-
47140	0	-
48766	4	-
51959	5	-
55309	3	-
55999	9	-
58765	1	-
65479	6	-
67557	11	-
70197	5	-
71626	6	-
72727	8	-
73520	1	-
75471	3	-
76818	5	-
80601	6	-
83672	0	-
91487	4	-
93885	6	-
113728	9	-
147449	8	-
189251	3	-

Tabela 4.5: Distribuição dos grupos em relação às classificações anteriores. Não foram consideradas classificações de subgrupos, ou seja, como exemplo, um objeto Ch é assinado na tabela como C.

Classe e grupos	A	B	C	D	F	L	S	V	X
0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
1	0	0	0	0	0	1	6	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1	0
5	0	0	4	0	0	0	1	0	4
6	0	0	0	0	0	0	2	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	10	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabela 4.6: Resumo das características dos espectros dos diferentes grupos. Na terceira coluna da esquerda para a direita são atribuídas classificações baseando-se em tais características.

Grupo	Aspectos	classificação
0	Apresenta avermelhamento na região do visível com uma queda na região associada a olivina-piroxênio.	S2
1	Apresenta inclinação positiva na região, com característica de absorção após $0.77\mu m$ .	S3
2	Espectro com uma banda acentuada centralizada no entorno de $0.7\mu m$ .	Ch.
3	Não apresenta banda de absorção, tem uma inclinação negativa a direita de $0.4\mu m$ .	B
4	Espectro avermelhado até a queda elevada em direção ao infravermelho.	VQ.
5	Plano em toda região do visível. Não apresenta banda associada absorção em $1.0\mu m$ .	X.
6	Avermelhado até a região à direita de $0.77\mu m$ , apresenta banda associada à olivina-piroxênio.	S1.
7	Avermelhamento em todo intervalo UV-visível com banda de absorção acentuada à direita de $0.77\mu m$ .	V
8	Queda após o UV entre $0.4\mu m$ e $0.5\mu m$ , avermelhamento à direita deste intervalo e plano a partir de $0.65\mu m$	KL.
9	Plano sem banda de absorção.	C.
10	Avermelhado até a queda na à direita de $0.77\mu m$ .	SA.
11	Características semelhantes ao grupo 10, porém com queda mais acentuada.	Sv

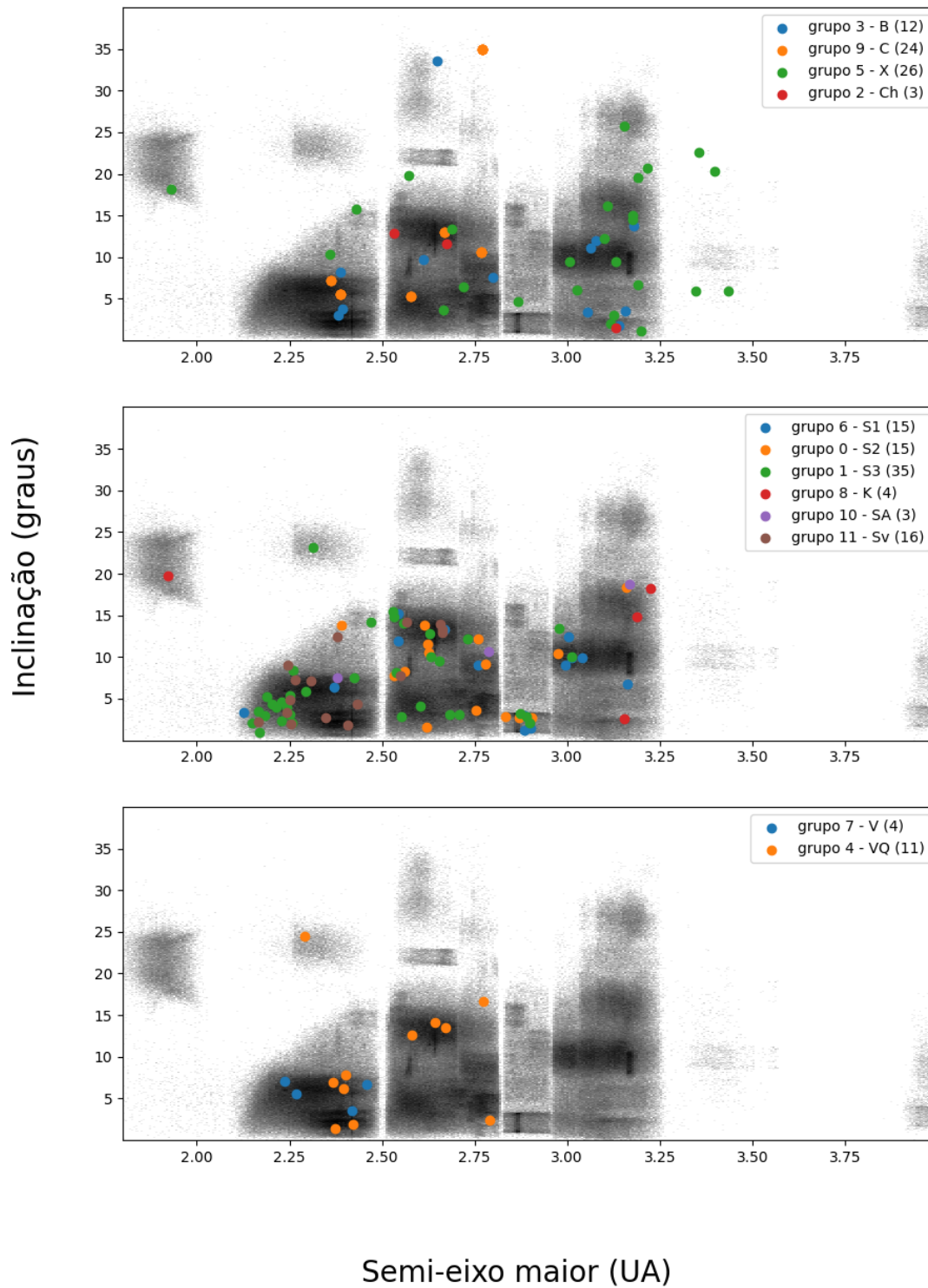


Figura 4.17: Gráfico inclinação versus semieixo maior para os 12 grupos da classificação obtida.

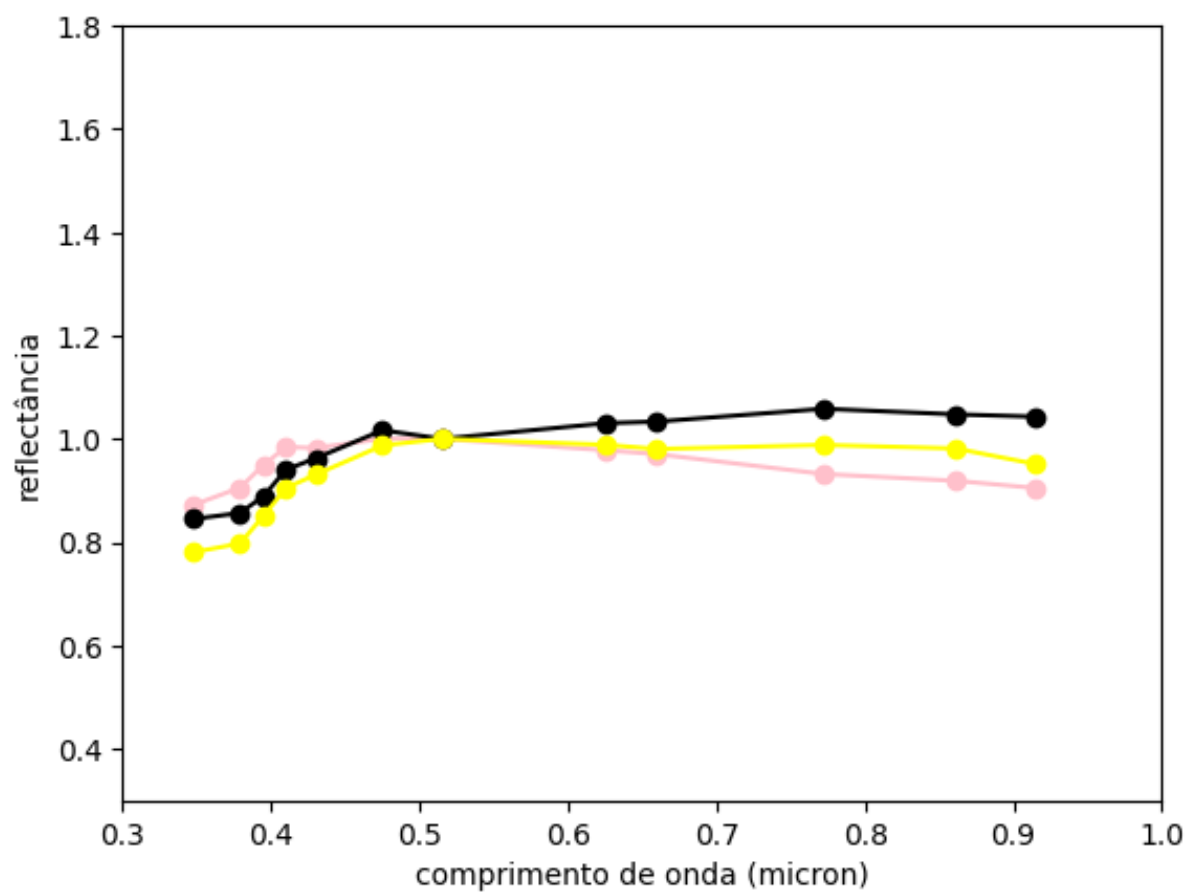


Figura 4.18: Espectros médios dos grupos 3 (rosa), 9 (amarelo) e 5 (preto)

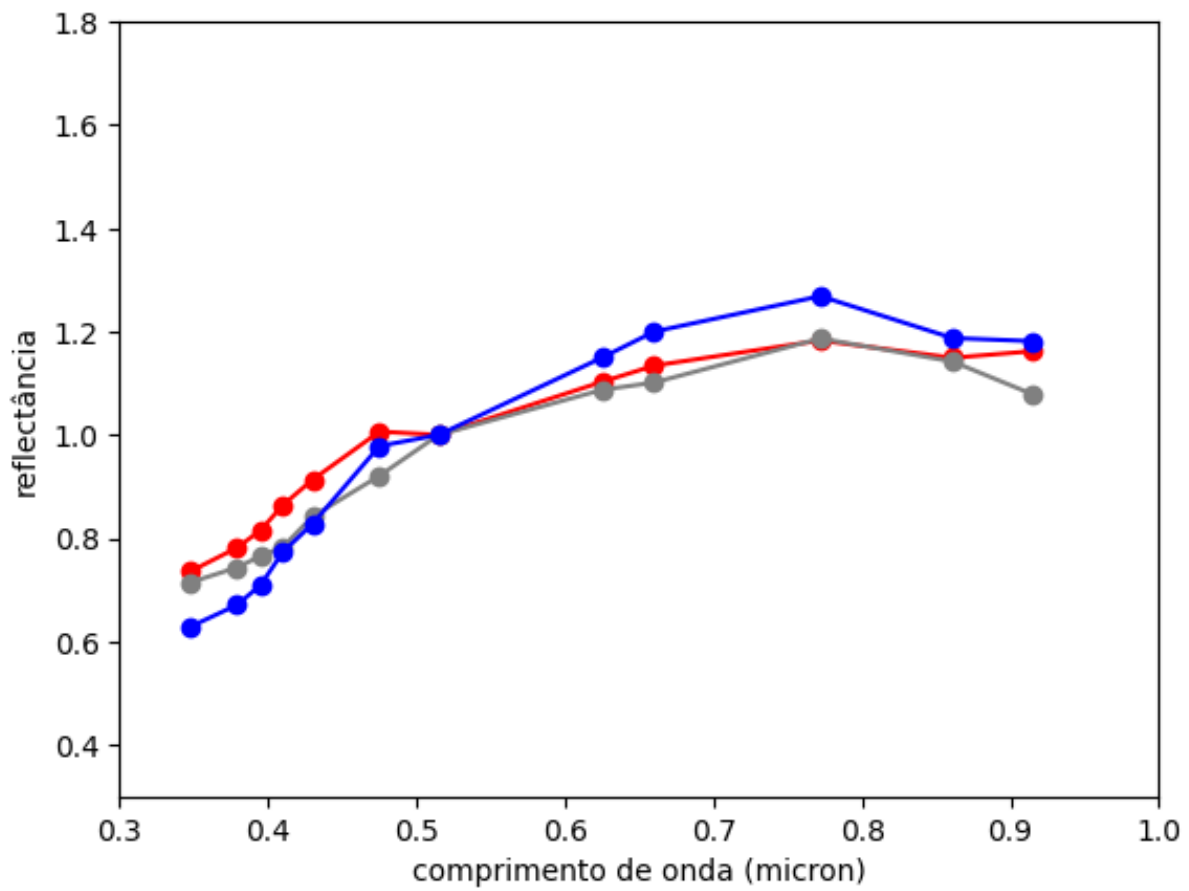


Figura 4.19: Espectros médios dos grupos dos grupos 6 (cinza), 0 (vermelho), 1 (azul).

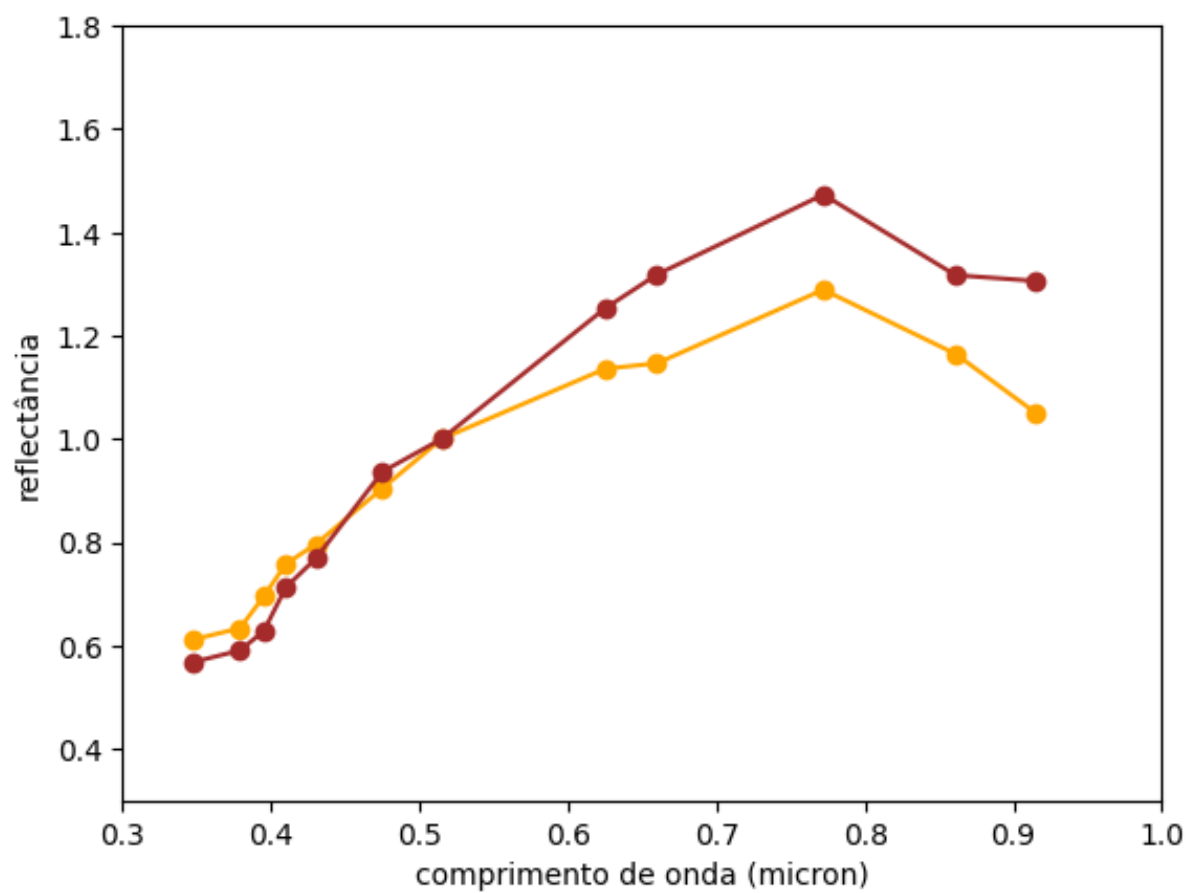


Figura 4.20: Espectros médios dos grupos 10 ( marrom) e 11 ( laranja)

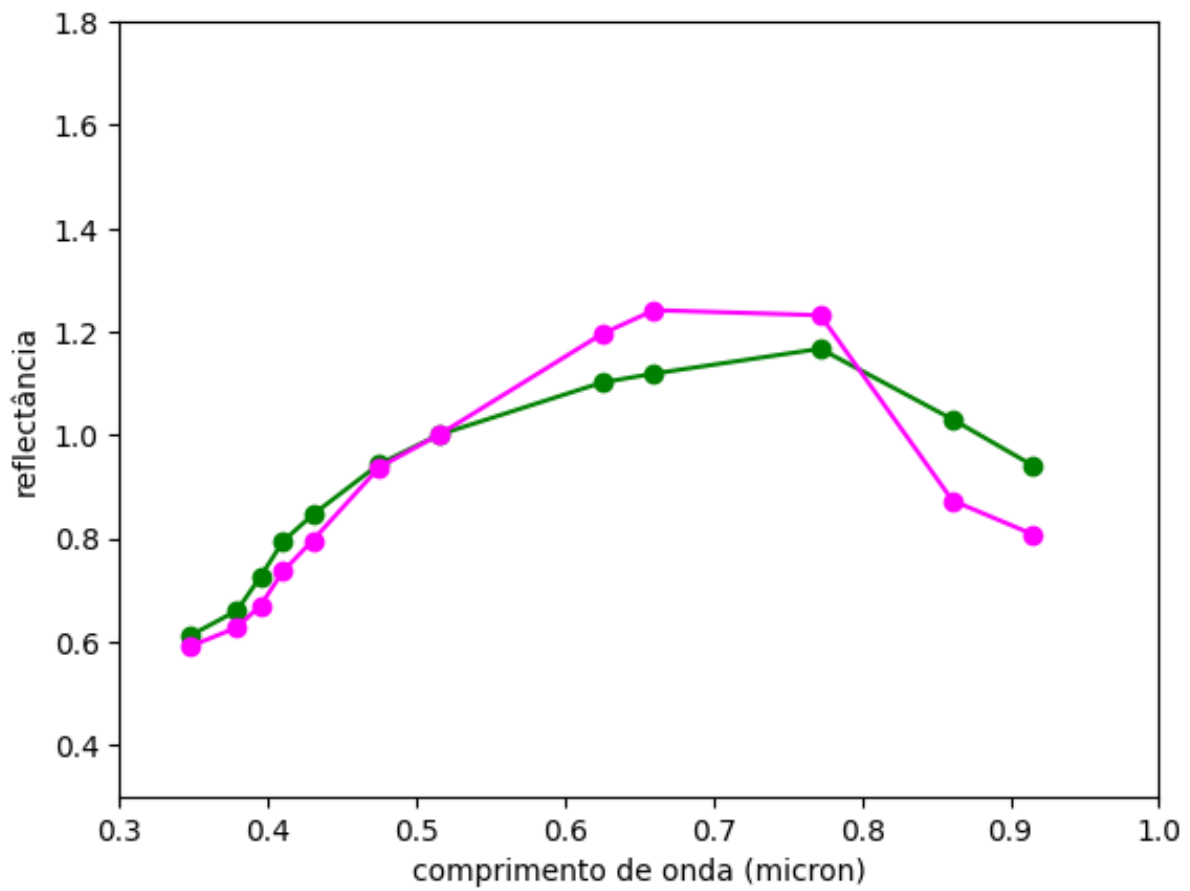


Figura 4.21: Espectros médios dos grupos 4 (verde) e 7 (magenta)

# Capítulo 5

## Conclusões e planos para o futuro

A partir de dados fotométricos da campanha J-PLUS corrigidos por um algoritmo genético, promovemos a classificação de 170 asteroides, utilizando a análise de componentes principais seguida da análise de agrupamento K-MEANS. A partir desta metodologia podemos particionar os dados disponíveis, obtendo doze grupos para a amostra de espectros de asteroides, que, dentro de cada grupo, compartilham características espectrais semelhantes.

Com a metodologia utilizada, conseguimos encontrar nos diferentes grupos, características de espectros de classes conhecidas em taxonomias anteriores e a partir da comparação visual com classificações espectrométricas, atribuímos possíveis classes posicionais à cada um dos grupos obtido pela classificação.

A partir da observação de tais características, atribuímos aos grupos obtidos nomes que remetem às classes de [BUS e BINZEL \(2002\)](#), mas pela natureza fotométrica de nossos dados e pela metodologia não supervisionada utilizada, não se fez praticável uma atribuição assertiva de uma classe aos grupos que obtemos em detrimento de outra classe espectralmente semelhante. Por isso, nomeamos os grupos com uma ou mais de uma letra com as possíveis classes a qual melhor se adequam.

Dos doze grupos obtidos, três são espectralmente próximos à classe C, totalizando 63 asteroides; quatro grupos têm espectros próximos à classe S totalizando 69 asteroides; dois grupos têm espectros que apresentam banda mais profunda centrada em  $1.0\mu m$ , com espectros entre a classe Q e V, com 16 asteroides; um grupo têm características que estão entre as classes K e L, com 4 asteroides; por fim, o nosso grupo mais peculiar apresenta características espectrais semelhantes à classe Ch, caracterizada pela banda em  $0.7\mu m$ , associada a um possível processo de hidratação.

O fato de um método de classificação não-supervisionada relativamente básico ter sido capaz de definir esta classe em especial sugere que o sistema de filtros do J-PLUS pode ser particularmente útil para mapear a hidratação no Cinturão Principal de Asteroides. Um problema aqui no entanto são as variações espúrias que podem resultar do efeito combinado de ruído e dos artefatos na reconstrução presentes na versão do algoritmo que

gerou os espectros de reflectância usados neste trabalho.

Como continuidade de trabalho, pretendemos classificar um conjunto maior, constituído por cores de mais de 3000 objetos. A partir da classificação desse conjunto maior de asteroides, tal informação pode ser utilizada para as restrições impostas para o algoritmo de reconstrução de curvas de luz. Já que, o conhecimento prévio da taxonomia de um objeto é um fator importante na imposição de delimitações quando da reconstrução das curvas de luz e de espectros de reflectância.

## Referências Bibliográficas

- BARUCCI, M. A., CAPRIA, M. T., CORADINI, A., et al., 1987, “Classification of asteroids using G-mode analysis”, *Icarus*, v. 72, n. 2 (nov.), pp. 304–324. doi: 10.1016/0019-1035(87)90177-1.
- BOBROVNIKOFF, N. T., 1929, “The spectra of minor planets”, *Lick Observatory Bulletin*, v. 407 (jan.), pp. 18–27. doi: 10.5479/ADS/bib/1929LicOB.14.18B.
- BOWELL, E., CHAPMAN, C. R., GRADIE, J. C., et al., 1978, “Taxonomy of asteroids”, *Icarus*, v. 35, n. 3 (set.), pp. 313–335. doi: 10.1016/0019-1035(78)90085-4.
- BUS, S. J., BINZEL, R. P., 2002, “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy”, *Icarus*, v. 158, n. 1 (jul.), pp. 146–177. doi: 10.1006/icar.2002.6856.
- CARRY, B., SOLANO, E., EGGL, S., et al., 2016, “Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry”, *Icarus*, v. 268 (abr.), pp. 340–354. doi: 10.1016/j.icarus.2015.12.047.
- CARVANO, J. M., HASSELMANN, P. H., LAZZARO, D., et al., 2010, “SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids”, *Astron. Astrophys.*, 510:A43. doi: 10.1051/0004-6361/200913322.
- CELLINO, A., BENDJOYA, P., DELBO’, M., et al., 2020, “Ground-based visible spectroscopy of asteroids to support the development of an unsupervised Gaia asteroid taxonomy”, *Astron. Astrophys.*, 642:A80. doi: 10.1051/0004-6361/202038246.
- CENARRO, A. J., MOLES, M., CRISTÓBAL-HORNILLOS, D., et al., 2019, “J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey”, *Astron. Astrophys.*, 622:A176. doi: 10.1051/0004-6361/201833036.
- CHAPMAN, C. R., MCCORD, T. B., JOHNSON, T. V., 1973, “Asteroid spectral reflectivities.” *Astron. J.*, v. 78 (fev.), pp. 126–140. doi: 10.1086/111388.

- CHAPMAN, C. R., MORRISON, D., ZELLNER, B., 1975, “Surface Properties of Asteroids: A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry”, *Icarus*, v. 25, n. 1 (maio), pp. 104–130. doi: 10.1016/0019-1035(75)90191-8.
- CHARNOZ, S., MORBIDELLI, A., 2007, “Coupling dynamical and collisional evolution of small bodies. II. Forming the Kuiper belt, the Scattered Disk and the Oort Cloud”, *Icarus*, v. 188, n. 2 (jun.), pp. 468–480. doi: 10.1016/j.icarus.2006.11.018.
- CORADINI, A., FULCHIGNONI, M., FANUCCI, O., et al., 1977, “A FORTRAN V program for a new classification technique: the g-mode central method”, *Computers and Geosciences*, v. 3, n. 1 (jan.), pp. 85–105. doi: 10.1016/0098-3004(77)90035-8.
- DEGEWIJ, J., VAN HOUTEN, C. J., 1979, “Distant asteroids and outer Jovian satellites.” In: Gehrels, T., Matthews, M. S. (Eds.), *Asteroids*, pp. 417–435.
- DEMEO, F. E., CARRY, B., 2013, “The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys”, *Icarus*, v. 226, n. 1 (set.), pp. 723–741. doi: 10.1016/j.icarus.2013.06.027.
- DEMEO, F. E., CARRY, B., 2014, “Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt”, *Nature*, v. 505, n. 7485 (jan.), pp. 629–634. doi: 10.1038/nature12908.
- DEMEO, F. E., BINZEL, R. P., SLIVAN, S. M., et al., 2009, “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”, *Icarus*, v. 202, n. 1 (jul.), pp. 160–180. doi: 10.1016/j.icarus.2009.02.005.
- DYAR, M. D., WALLACE, S. M., BURBINE, T. H., et al., 2023, “A machine learning classification of meteorite spectra applied to understanding asteroids”, *Icarus*, 406:115718. doi: 10.1016/j.icarus.2023.115718.
- EVERITT, B., LANDAU, S., LEESE, M., 2001, *Cluster Analysis*. A Hodder Arnold Publication. New York, Wiley. ISBN: 9780340761199. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=htZzDGlCnQYC>>.
- FRADES, I., MATTHIESEN, R., 2009, “Overview on techniques in cluster analysis”, *Bioinformatics methods in clinical research*, pp. 81–107.
- GAFFEY, M. J., MCCORD, T. B., 1977. “Asteroid surface materials: Mineralogical characterizations from reflectance spectra”. jan.

- GOIDET-DEVEL, B., RENARD, J. B., LEVASSEUR-REGOURD, A. C., 1995, “Polarization of asteroids. Synthetic curves and characteristic parameters”, *Planet. Space Sci.*, v. 43, n. 6 (jun.), pp. 779–786. doi: 10.1016/0032-0633(94)00140-M.
- GRADIE, J., TEDESCO, E., 1982, “Compositional Structure of the Asteroid Belt”, *Science*, v. 216, n. 4553 (jun.), pp. 1405–1407. doi: 10.1126/science.216.4553.1405.
- GRAV, T., JEDICKE, R., DENNEAU, L., et al., 2011, “The Pan-STARRS Synthetic Solar System Model: A Tool for Testing and Efficiency Determination of the Moving Object Processing System”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 123, n. 902 (abr.), pp. 423. doi: 10.1086/659833.
- GROSSMAN, L., LARIMER, J. W., 1974, “Early chemical history of the solar system.” *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 12 (jan.), pp. 71–101. doi: 10.1029/RG012i001p00071.
- HAPKE, B., 1971, “Inferences from Optical Properties Concerning the Surface Texture and Composition of Asteroids”. In: Gehrels, T. (Ed.), *NASA Special Publication*, v. 267, p. 67.
- JOHNSON, W. A., 1939, “Spectrophotometric Study of Three Asteroids”, *Harvard College Observatory Bulletin*, v. 911 (ago.), pp. 13–16.
- KITAMURA, M., 1959, “Photoelectric Study of Colors of Asteroids and Meteorites”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, v. 11 (jan.), pp. 79.
- KLIMCZAK, H., OSZKIEWICZ, D., CARRY, B., et al., 2022, “Comparison of machine learning algorithms used to classify the asteroids observed by all-sky surveys”, *Astron. Astrophys.*, 667:A10. doi: 10.1051/0004-6361/202243889.
- KLIMCZAK, H., KOTŁOWSKI, W., OSZKIEWICZ, D., et al., 2021, “Predicting asteroid types: importance of individual and combined features”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8:216. doi: 10.3389/fspas.2021.767885.
- KUIPER, G. P., FUJITA, Y., GEHRELS, T., et al., 1958, “Survey of Asteroids.” *Astrophys. J. Suppl.*, v. 3 (jul.), pp. 289–427. doi: 10.1086/190037.
- MAHLKE, M., CARRY, B., MATTEI, P.-A., 2022, “Asteroid taxonomy from cluster analysis of spectrometry and albedo”, *Astron. Astrophys.*, 665:A26. doi: 10.1051/0004-6361/202243587.
- MCCORD, T. B., CHAPMAN, C. R., 1975a, “Asteroids: spectral reflectance and other characteristics.” *Astrophys. J.*, v. 195 (jan.), pp. 553–562. doi: 10.1086/153355.

- MCCORD, T. B., CHAPMAN, C. R., 1975b, “Asteroids spectral reflectance and color characteristics. II.” *Astrophys. J.*, v. 197 (maio), pp. 781–790. doi: 10.1086/153565.
- MCCORD, T. B., ADAMS, J. B., JOHNSON, T. V., 1970, “Asteroid Vesta: Spectral Reflectivity and Compositional Implications”, *Science*, v. 168, n. 3938 (jun.), pp. 1445–1447. doi: 10.1126/science.168.3938.1445.
- MORATE, D., MARCIO CARVANO, J., ALVAREZ-CANDAL, A., et al., 2021, “J-PLUS: A first glimpse at the spectrophotometry of asteroids. The MOOJa catalog”, *Astron. Astrophys.*, 655:A47. doi: 10.1051/0004-6361/202038477.
- MOTHÉ-DINIZ, T., ROIG, F., CARVANO, J. M., 2005, “Reanalysis of asteroid families structure through visible spectroscopy”, *Icarus*, v. 174, n. 1 (mar.), pp. 54–80. doi: 10.1016/j.icarus.2004.10.002.
- PENTTILÄ, A., HIETALA, H., MUINONEN, K., 2021, “Asteroid spectral taxonomy using neural networks”, *Astron. Astrophys.*, 649:A46. doi: 10.1051/0004-6361/202038545.
- PENTTILÄ, A., FEDORETS, G., MUINONEN, K., 2022, “Taxonomy of Asteroids From the Legacy Survey of Space and Time Using Neural Networks”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9:816268. doi: 10.3389/fspas.2022.816268.
- REDDY, V., DUNN, T. L., THOMAS, C. A., et al., 2015, “Mineralogy and Surface Composition of Asteroids”. In: Michel, P., DeMeo, F. E., Bottke, W. F. (Eds.), *Asteroids IV*, pp. 43–63. doi: 10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch003.
- RIVKIN, A. S., THOMAS, C. A., HOWELL, E. S., et al., 2015, “The Ch-class Asteroids: Connecting a Visible Taxonomic Class to a 3  $\mu\text{m}$  Band Shape”, *Astron. J.*, 150 (6):198. doi: 10.1088/0004-6256/150/6/198.
- ROIG, F., GIL-HUTTON, R., 2006, “Selecting candidate V-type asteroids from the analysis of the Sloan Digital Sky Survey colors”, *Icarus*, v. 183, n. 2 (ago.), pp. 411–419. doi: 10.1016/j.icarus.2006.04.002.
- TEDESCO, E. F., WILLIAMS, J. G., MATSON, D. L., et al., 1989, “A Three-Parameter Asteroid Taxonomy”, *Astron. J.*, v. 97 (fev.), pp. 580. doi: 10.1086/115007.
- THOLEN, D. J., 1984, *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*.
- VAN HOUTEN-GROENEVELD, I., VAN HOUTEN, C. J., 1958, “Photometrics Studies of Asteroids. VII.” *Astrophys. J.*, v. 127 (mar.), pp. 253. doi: 10.1086/146459.

- VILAS, F., 1994, “A Cheaper, Faster, Better Way to Detect Water of Hydration on Solar System Bodies”, *Icarus*, v. 111, n. 2, pp. 456–467. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1156>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103584711560>>.
- WOOD, X. H. J., KUIPER, G. P., 1963, “Photometric Studies of Asteroids.” *Astrophys. J.*, v. 137 (maio), pp. 1279. doi: 10.1086/147603.
- ZELLNER, B., BOWELL, E., 1977, “Asteroid compositional types and their distributions.” In: Delsemme, A. H. (Ed.), *IAU Colloq. 39: Comets, Asteroids, Meteorites: Interrelations, Evolution and Origins*, pp. 185–195, jan.
- ZELLNER, B., GRADIE, J., 1976, “Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids.” *Astron. J.*, v. 81 (abr.), pp. 262–280. doi: 10.1086/111882.