

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Departamento de Astronomia do Observatório do Valongo



**Nova metodologia para associação de
fotometria do SDSS Moving Object
Catalog 4 e taxonomia de asteróides**

AUTOR: Pedro Henrique Aragão Hasselmann

ORIENTADORA: Daniela Lazzaro (Observatório Nacional)

CO-ORIENTADOR: Jorge Márcio Ferreira Carvano (Observatório Nacional)

Projeto de Conclusão de Curso para obtenção do título de Astrônomo

Rio de Janeiro, Brasil

Julho de 2009

à Fernanda, por que através do amor somos capazes de tudo

Agradecimentos

Agradeço com infinito amor a Fernanda Ostrovski, porque sem ela estes meus últimos três anos nunca teriam sido tão emocionantes e felizes. Dela recebi amor, carinho, sorrisos e conselhos para a vida inteira. A esta minha melhor amiga devo todo o suporte pela dificuldade deste trabalho.

Ao meu pai e a minha mãe, Murilo e Graça, pelo apoio a minha escolha profissional pouco comum e totalmente alienígena, além de cuidarem de mim. À minha irmã, Maria Laura, pela própria curiosidade em relação à astronomia, uma motivação que ela não tem nem idéia. À meu avô, Sérgio, por toda sabedoria e brincadeiras que astrônomos ouvem a vida inteira.

Agradeço muito especialmente, a minha orientadora, Daniela Lazzaro, pela sua inestimável paciência e conhecimento, com o qual espero continuar aprendendo. Há mais de quatro anos bati à sua porta para ser seu aluno, e desde então ela me proporcionou oportunidades que eu jamais imaginaria.

Ao Jorge Márcio Carvano, que com muita paciência e calma me ajudou em todo este trabalho, e que, com uma boa conversa há três anos, instigou meu interesse em ficção científica e especiarias.

Um grande obrigado aos demais integrantes do Grupo de Ciências Planetárias, em especial: à Thaís Mothé-Diniz, pela melhor expedição que o Valongo já teve, e pela amizade cunhada durante a participação no COSPAR e no Taller; ao Fernando Roig, a quem eu admiro muito, cujo humor é sem igual e que esteve sempre disposto a ajudar; ao Anderson, o mestre do L^AT_EX, pois sem ele a confecção desse trabalho teria sido muito mais árdua; e ao Alvaro Alvarez-Candal que pacientemente assistiu ao meu deslumbramento ao ver pela primeira vez o telescópio do LNA, e que me ensinou a operá-lo.

Ao grande amigo e professor, Hélio J. Rocha-Pinto, que nos momentos de desânimo não hesitou em puxar de sua gaveta os antigos Observadores com os sintomas dos alunos de cada período. Sem também esquecer as ótimas conversas durante as caronas, e das aulas planejadas.

Aos meus amigos do Valongo: ao Tales, pelas conversas, risadas e convites para jogar RPG; a Amanda, pela ajuda em todas as matérias que passamos juntos (e foram muitas!); e a Érica, Lara, Samantha, Eduardo e a todos os amigos de curso, por todos esses anos de provações, ajudas e Espanhol compartilhadas. Tudo que faz parte da vida “valongueana”.

A todos que fazem parte da magia que é o Valongo, principalmente seus professores, que contribuíram para minha formação e participaram do meu dia-dia. Devo ressaltar um obrigado a professora Lília Prado pelas inesquecíveis aulas de TIN I, cujas discussões e pensamentos foram a melhor introdução a quântica que se poderia ter.

Aos professores do IF como Felipe Canto e Takeshi Kodama, pelas aulas ricas em pensamento e conteúdo.

Ao CNpq, pelos 4 anos de bolsa pontual e inalterável.

E fora do contexto acadêmico, agradeço aos 11 anos de amizade do meu amigo Victor Yamasaki, a amizade coincidente do Thiago Gira e aos meus antigos amigos do ISERJ, pelas aventuras juntos, embaladas pelo bom e velho Heavy Metal.

Por ultimo, agradeço à família da Fernanda, por serem tão carinhosos e acolhedores comigo.

Resumo

O *Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog* (SDSS-MOC) é um sub-catálogo do SDSS contendo todos os objetos observados pelo projeto que são considerados não-fixos na esfera celeste. O sub-catálogo fornece magnitude aparente em cinco filtros , $u'-g'-r'-i'-z'$, para 471,569 observações das quais 220,101 correspondem a 104449 objetos identificados. Em virtude do grande número de objetos, o SDSS-MOC torna-se uma poderosa ferramenta para se analisar a distribuição composicional de asteróides.

Com os dados fotométricos das cinco bandas pode-se montar um espectro de refletância discreto, que quando devidamente calibrado, permite ser classificado taxonomicamente. As observações foram classificadas dentre 8 grupos taxonômicos: L, V, S, D, X, C, A e O, definidos a partir das taxonomias de Tholen e Bus, baseadas em parâmetros espectrofotométricos e espectroscópicos respectivamente. Para cada um dos grupos foi criado um espectro que representasse os valores mais frequentes de refletância e os intervalos de variação, para cada banda. O procedimento de classificação consistiu em determinar a quais grupos taxonômicos a observação assemelhava-se usando os intervalos. E ordená-los por menor resíduo no cálculo da distância euclidiana entre os valores de refletância da observação e do modelo.

Esta nova metodologia, mais simples e rápida que as anteriores, foi aplicada a algumas famílias de asteróides e a toda amostra do SDSS-MOC. Sua eficiência foi discutida, em particular, comparando-a com observações de asteróides já classificados taxonomicamente. Os resultados são apresentados através de uma análise da distribuição dos grupos no cinturão e da identificação de objetos singulares para uma futura observação espectroscópica.

PALAVRAS-CHAVE: ASTERÓIDES: CINTURÃO PRINCIPAL - ASTERÓIDES: TAXONOMIA - ASTERÓIDES: DISTRIBUIÇÃO DE COMPOSIÇÕES - SLOAN DIGITAL SKY SURVEY.

Abstract

The Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog (SDSS-MOC) is a sub-catalog of SDSS having all observed objects by the project considered non-fixed in the celestial sphere. The sub-catalog gives the observed magnitude in five filters, u'-g'-r'-i'-z', for 471,569 observations being 220,101 linked to 104,449 identified objects. because of the large number of objects, the SDSS-MOC is a powerful tool to analyse the compositional distribution of asteroids.

We set up a discreet reflectance spectra with the photometric data in five bands which, when properly calibrated, allow us to classify it taxonomically. The observations were classified among 8 taxonomic groups: L, V, S, D, X, C, A e O, defined using the Tholen and Bus taxonomies. For each group it was created a spectra representing the most frequent values of reflectance and the intervals of variation, for each band. The classification procedure consisted in determining which taxonomic groups the observation was more similar using the intervals, and ordering them by the least residue calculated through the euclidian distance between the reflectance values of the observation and of the model.

This new methodology, more fast and easy than previous ones, was applied to some asteroid families and all the SDSS sample. Its efficiency was discussed by comparing it with observations of asteroids with previous taxonomic classification. The results are given by the analysis of the distribution of the taxonomic groups in the Main Belt, and the identification of singular objects for future spectroscopic observations.

KEYWORDS: ASTEROIDS: MAIN BELT - ASTEROIDS: TAXONOMY - ASTEROIDS: COMPOSITIONAL DISTRIBUTION - SLOAN DIGITAL SKY SURVEY.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	O CINTURÃO DE ASTERÓIDES	2
1.3	PROPRIEDADES DE ASTERÓIDES	4
1.4	TAXONOMIAS	8
1.5	DISTRIBUIÇÃO DE COMPOSIÇÕES	13
2	OS DADOS	19
2.1	SLOAN DIGITAL SKY SURVEY	19
2.1.1	SDSS MOVING OBJECT CATALOG	20
2.2	CÁLCULO DAS REFLETÂNCIAS	22
2.3	AMOSTRAGEM	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	O OBJETIVO	27
3.2	ESPECTROS CARACTERÍSTICOS	27
3.2.1	A DEFINIÇÃO DOS GRUPOS TAXONÔMICOS	28
3.2.2	COMPOSIÇÃO DOS MODELOS	30
3.3	CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA	38
3.3.1	PROCEDIMENTOS DE CLASSIFICAÇÃO	39
3.3.2	CLASSIFICAÇÕES ESPECIAIS	43
3.3.3	TESTES	44
4	RESULTADOS	49
4.1	APLICAÇÃO À AMOSTRA DO SDSS-MOC	49
4.2	DISTRIBUIÇÃO DE GRUPOS NO CINTURÃO	50
4.3	CONCLUSÕES E PERPECTIVAS FUTURAS	52

Lista de Figuras

- 1.1 (a) Asteróides do cinturão e dos troianos visto do norte do Sistema Solar. (b) Distribuição
- 1.2 Famílias de Asteróides das regiões interna, intermediária e externa, respectivamente. Produ
- 1.3 Alguns dos asteróides visitados por sondas espaciais 5
- 1.4 Esquema de um asteróide diferenciado e indiferenciado e a disposição dos minerais na sua c
- 1.5 Espaço entre a primeira e segunda componente principal. Os asteróides pertencentes aos aq
- 1.6 Espectros discretos representativos das classes definidas por Tholen (*Tholen, 1984*). 10
- 1.7 Esquema de espectros médios das classes definidas por Bus reproduzindo as suas disposiçõe
- 1.8 Distribuição de taxonomias feita por Chapman a partir das classes de Tholen (*Chapman, 1*
- 1.9 Distribuição dos complexos taxonômicos S, C e X e das classes V, Ld+D+T produzida por
- 1.10 Fração relativa dos complexos taxonômicos definidos por Bus a partir de dados do SMASS

- 2.1 Diagrama da eficiência quântica dos filtros do SDSS. As curvas suavizadas representam a e
- 2.2 Distribuição de todos os asteróides com elementos orbitais computados pelo SDSS-MOC.A
- 2.3 Exemplo do espectro discreto de uma observação do SDSS-MOC. A componente vertical re

- 3.1 Exemplo de espectros de baixa resolução do SMASS II das principais classes Bus que comp
- 3.2 Exemplo de distribuição de uma amostra usando o método de *kernels* gaussianos. Onde f_c
- 3.3 As distribuições de densidade de probabilidade das amostra de cada grupo taxonômico no
- 3.4 Distribuição de densidade de probabilidade para os grupos S, L e D no espaço das refletânc
- 3.5 Distribuição de densidade de probabilidade para os grupos X e C. 38
- 3.6 Espectros caraterísticos do grupos taxonômicos deslocados para uma melhor visualização.
- 3.7 Os intervalos que definem os limites de cada grupo em cada banda SDSS. . 40
- 3.8 Exemplo do procedimento de cálculo da probabilidade relativa a uma região em uma banda
- 3.9 Exemplo que ilustra a diferença entre as refletâncias do modelo, em azul, e uma observação
- 3.10 Distribuição de densidade de probabilidade dos menores parâmetros de similaridade. 44
- 3.11 Gráficos com as contagens de classificações taxonômicas de cada amostra que foi usada par
- 3.12 Gráficos com as contagens das classificações das observações de membros das famílias de se

- 4.1 Distribuição de classificações para toda a amostra classificada do SDSS-MOC. Total de 51329 objetos.
- 4.2 Distribuição de asteróides da sub-amostra no espaço do seno da inclinação orbital própria contra

Lista de Tabelas

- 1.1 Principais minerais presentes em asteróides. 7
- 1.2 Summário comparativo entre as classes taxonômica dos quatro maiores sistemas de taxono
- 3.1 Grupos taxonômicos definidos pelo nosso método e as respectivas classes taxonômicas do B
- 3.2 Tabela com os erros relativos médios para as refletâncias de cada banda para a amostra de
- 3.3 O número da amostra para cada grupo e as respectivas razões após aplicadas as restrições.
- 3.4 Condições especiais para garantir que as observações possuem a forma espectral do grupo a

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos principais objetivos do estudo da composição de asteróides é compreender sua distribuição e quais processos físicos moldaram-na. Mapeamentos espectroscópicos e fotométricos como *Eight Color Asteroid Survey* (ECAS) (Zellner et al., 1985), *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey* (SMASS) I (Xu et al., 1995), SMASS II (Bus and Binzel, 2002) e *Small Solar System Objects Spectroscopic Survey* (S3OS2) (Lazzaro et al., 2004) ajudaram na melhor compreensão da forma desta distribuição. Entretanto suas amostras somam aproximadamente 2.500 asteróides, o que é menos de 1% do total de asteróides com órbitas identificadas. Isto torna qualquer estudo de composições influenciado pelas diversas tendências observacionais, como a predominância da observação de asteróides de um determinado tipo espectral, por exemplo. Além do mais, todos os mapeamentos tendem a observar os maiores asteróides.

Desta forma, é importante buscar formas de aumentar a amostra sem que esta esteja contaminada por qualquer tendência. Uma amostra representativa é aquela contendo dados de pequenos asteróides (< 30 km), já que estes que provem uma maior informação sobre as populações de fundo do cinturão de asteróides. Além disso, acredita-se que seus espectros sejam mais representativos de suas superfícies, sem efeitos de intemperismo espacial (seção 1.3).

O objetivo deste projeto foi realizar uma classificação taxonômica a partir das magnitudes em cinco filtros disponíveis pelo *SLOAN Digital Sky Survey Moving Objects Catalog* (SDSS-MOC). Enquanto os *surveys* espectroscópicos são compostos por dados de objetos de magnitude absoluta média de ~ 11 , o SDSS-MOC reúne observações de objetos de magnitude absoluta de até ~ 20 , provendo informação fotométrica de pequenos asteróides que só seria possível conseguir através de grandes telescópios. O uso do banco de dados do SDSS-MOC permite uma classificação taxonômica rápida, mas também bastante informativa sobre pequenos asteróides de quaisquer regiões ou famílias. Embora trabalhos já tenham sido feitos por outro autores com intuito similar (*Roig and Gil-Hutton, 2006; Gil-Hutton and Brunini, 2008; Misra and Bus, 2008; Bus, 2007*), será apresentada outra forma de realizar isso. O presente estudo também permite identificar objetos de composições peculiares para que sejam posteriormente observados espectroscopicamente.

1.2 O CINTURÃO DE ASTERÓIDES

A região de 2,06 a 3,27 UA, entre os planetas Marte e Júpiter, é povoada por asteróides, pequenos objetos remanescentes da formação do sistema solar (atualmente cerca de 350 mil objetos identificados pelo AstDys¹, cerca de 95% dos asteróides conhecidos), sendo chamada de cinturão de asteróides, ou Cinturão Principal. A figura 1.1 mostra os asteróides dentro da órbita de Júpiter, e um gráfico da sua distribuição em função da distância heliocêntrica. Nestas figuras é possível reconhecer diversos grupos e estruturas que serão melhor explicadas a seguir.

A distribuição dos asteróides no cinturão é moldada principalmente por ressonâncias de movimento médio com Júpiter. As ressonâncias de movimento médio são efeitos dinâmicos estáveis ou instáveis entre dois ou mais sistemas orbitando um corpo maior e interagindo gravitacionalmente. O efeito acontece quando a razão entre os períodos orbitais é uma fração de termos inteiros. Onde as ressonâncias se localizam é possível discernir uma densidade menor de asteróides, essas “falhas” segmentam três regiões principais dentro do cinturão: a interna, de 2,06 (4:1) à 2,5 (3:1) UA; a intermediária, de 2,5 à 2,82 (5:2) UA; e a externa, de 2,82 à 3,27 (2:1) UA.

¹Asteroid Dynamical Site. <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/> (02/07/09).

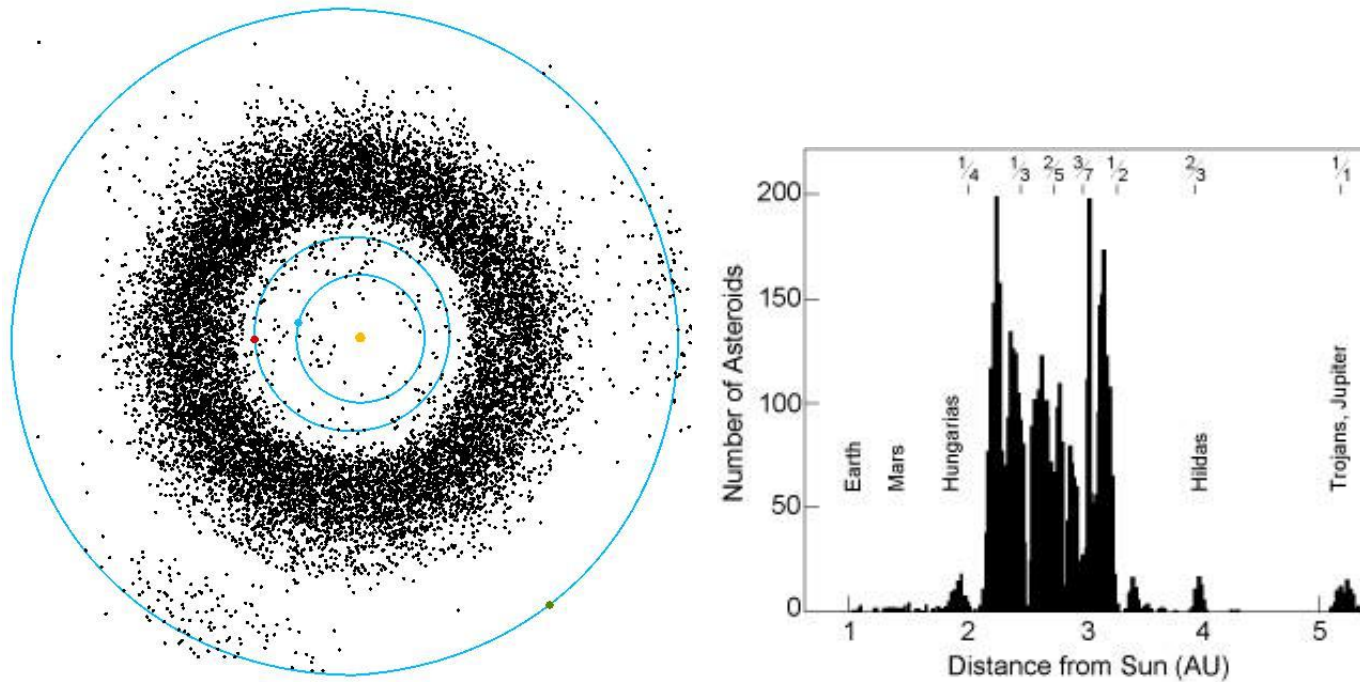


Figura 1.1: (a) Asteróides do cinturão e dos troianos visto do norte do Sistema Solar. (b) Distribuição heliocêntrica dos asteróides entre a Terra e Júpiter. A localização das ressonâncias com Júpiter estão marcadas na parte superior.

Outra formação dinâmica marcante no cinturão são as famílias de asteróides (Figura 1.2). Elas são agrupamentos de asteróides apenas discerníveis no espaço dos elementos orbitais próprios. As primeiras famílias, Eos, Themis e Koronis, foram identificadas por *Hirayama* (1918), e recebendo o nome do membro de maior diâmetro. Acredita-se que estes agrupamentos são originários da fragmentação de um corpo maior. Portanto, as famílias de asteróides são indicadores da estrutura e composição interna de corpos de vários quilômetros de diâmetro, e seu estudo é também um indicativo da evolução colisional do cinturão.

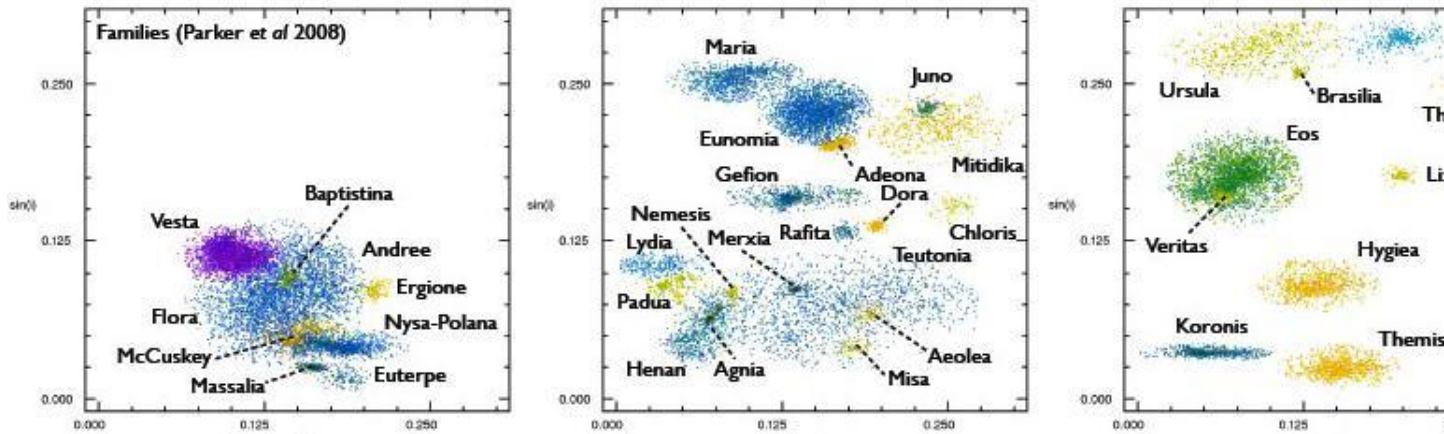


Figura 1.2: Famílias de Asteróides das regiões interna, intermediária e externa, respectivamente. Produzido a partir dos dados do SDSS-MOC4 (*Parker et al.*, 2008)

1.3 PROPRIEDADES DE ASTERÓIDES

Asteróides são os menores corpos do Sistema Solar. São objetos rochosos ou formados por aglomeração gravitacional de partículas rochosas. Sua forma é irregular e seu diâmetro pode variar de alguns metros a centenas de quilômetros. O maior é 1 Ceres, com cerca de 980 km, e que hoje é também denominado de um planeta-anão. Na figura 1.3 estão exemplos de alguns poucos asteróides fotografados por sondas espaciais.

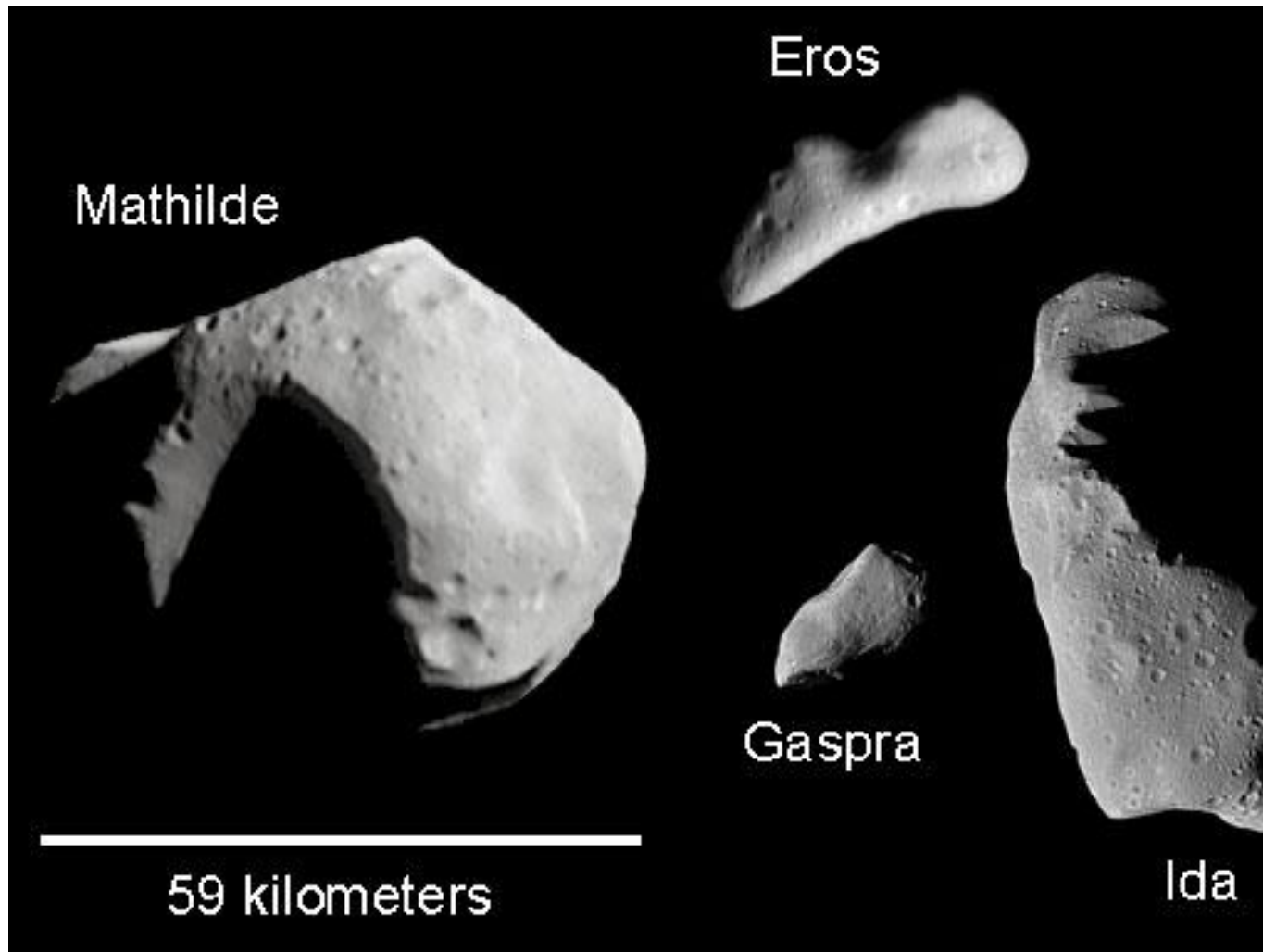


Figura 1.3: Alguns dos asteróides visitados por sondas espaciais .

A estimativa de sua forma física é normalmente feita por técnica radiométrica, que consiste em enviar um sinal de rádio ao asteróide e medir o efeito doppler na luz de retorno. Outro método é relacionar o albedo geométrico, razão de luz refletida por frequência sob ângulo de fase 0° , com o brilho e composição. A técnica mais precisa é a medida *in situ*, por sondas especiais. Para medir a densidade, existem duas técnicas: reconhecer os materiais que compõem o asteróide, ou através de medidas gravimétricas por sondas.

Como todos os demais corpos do Sistema Solar, os asteróides possuem rotação própria. A rotação é resultado dos momentos angulares iniciais de sua formação adicionado ou subtraído dos momentos decorrentes de colisões subsequentes com outros asteróides. Esta propriedade é medida fazendo fotometria do objeto ao longo de horas ou dias, e pode variar de alguns minutos até dois

dias. A maioria possui um período de cerca de 6 horas (*Pravec et al., 2008*). A rotação de um asteroide é indicador do seu cenário evolutivo.

A caracterização da mineralogia superficial destes corpos é obtida através de espectroscopia, ou através de fotometria em diversos filtros, da luz do Sol refletida pela superfície. O fluxo desta luz refletida em diferentes comprimentos de onda preserva informação sobre a composição e o estado físico-químico da matéria. Isto acontece por que a taxa de reflexão para cada material é diferente em alguns comprimentos de onda, formando bandas de absorção no contínuo. A interpretação mineralógica é feita comparando os espectros de reflexão asteroidais com espectros de laboratório de meteoritos, minerais terrestres e suas misturas. Outra abordagem é a modelagem que tenta reconstruir o espectro do asteroide reconhecendo as absorções causadas pelos materiais que o compõem.

Os principais fatores que moldam a forma de um espectro asteroidal na região do visível e próxima são (*Bus et al., 2002*):

1. a presença ou ausência da absorção no ultravioleta devido a transições no Fe^{2+} ;
2. o aclave além do comprimento de onda de $0.55 \mu m$, sua inclinação depende da presença ou falta do avermelhamento causado por metais níquel-ferrosos ou materiais orgânicos;
3. a presença ou ausência da banda de absorção além de $0.7 \mu m$ centrada em torno de $1 \mu m$ devido a existência de olivina e/ou piroxênio.

A maioria dos asteroides é composta por uma mistura de minerais podendo ter sofrido ou não ação de agentes externos ou processos internos. Os principais minerais identificados são piroxênios, olivinas, feldspatos e as ligas de níquel-ferro, com descrito na tabela 1.1. Por isso, as bandas de absorção encontradas nos espectros são uma combinação complexa das bandas individuais dos minerais (*Florczak, 1998*).

Agentes externos podem modificar a estrutura física de um asteroide, causando uma mudança de seu espectro de reflexão. Colisões causam enorme aquecimento e podem produzir um processo de mudança do estado de cristalização do asteroide (metamorfismo), liberação do material do interior do

Minerais	Classe Mineralógica	Fórmula	Encontrado em
Piroxênio	Silicato	$XY(Si, Al)_2O_6$	Rochas ígneas e metamórfica
Feldspato	Silicato	$KAlSi_3O_8,$ $KAlSi_3O_8,$ $CaAl_2Si_2O_8$	Rochas ígneas extrusivas e metamórfica
Olivina	Silicato	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Rochas ígneas máficas; manto
Níquel-Ferro	Liga	$FeNi$	Núcleos internos de corpos diferenciados

Tabela 1.1: Principais minerais presentes em asteróides.

corpo ou até fragmentação total. Outro fator é o intemperismo espacial, que abrange processos como colisão de micro-meteoritos, bombardeamento de raios cósmicos e impacto de íons carregados provenientes do vento solar. Todos esse processos provocam um avermelhamento do contínuo, redução do albedo geométrico e suavização das bandas de absorção. O intemperismo espacial é efeito lento e afeta todos os espectros asteroidais com maior ou menor intensidade.

Processos internos acontecem dentro da própria estrutura do asteróide e também modificam seu espectro. Podemos citar: a alteração aquosa, que modifica um mineral devido a reações com a água, e normalmente ocorre em uma mistura de silicatos anidros e gelo, quando aquecidos; e o aquecimento devido ao decaimento de radioisótopos (especialmente o ^{26}Al e o ^{60}Fe) que a longo prazo pode levar ao derretimento do corpo e à diferenciação. A diferenciação é um processo de estratificação de materiais com diferentes densidades causada pelo aquecimento. Os materiais mais densos submergem para o centro, e os mais leves sobem a superfície, levando à criação de núcleo de níquel-ferro e manto de olivina e as vezes uma crosta quimicamente distinta (figura 1.4).

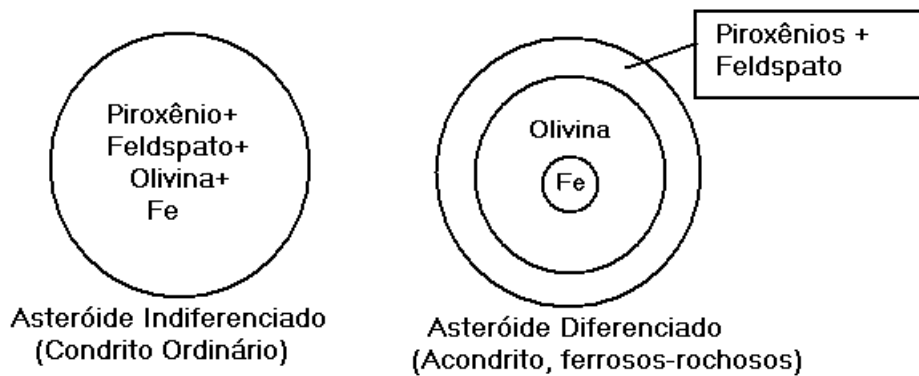


Figura 1.4: Esquema de um asteróide diferenciado e indiferenciado e a disposição dos minerais na sua estrutura interna e externa.

1.4 TAXONOMIAS

O primeiro método de classificação taxonômica utilizando reconhecimento de padrões entre dados asteroidais foi usado por *Chapman et al. (1975)*. Os autores introduziram letras para identificar asteróides com albedos e propriedades espectrofotométricas similares, dividindo-os em três categorias: S, C e U (de *unclassifiable*, inclassificável, para objetos que não fossem compatíveis com nenhuma das duas classes). Seu sistema foi desenvolvido com base em uma amostra espectrofotométrica de 110 asteróides. Chapman e colaboradores perceberam que, em sua amostra, 90% dos asteróides pertenciam às duas primeiras classes. E ao comparar as características espectrais destas classes com o espectro de meteoritos, sugeriram que os asteróides do tipo S possuíam uma composição similar aos meteoritos ferrosos-rochosos, e que os do tipo C eram similares aos meteoritos carbonáceos.

A taxonomia de *Chapman et al.* foi expandida utilizando-se amostras maiores. *Bowell et al. (1978)* demarcou contornos dentro dos três grupos de Chapman e definiu cinco novas classes taxonômicas. A partir de uma amostra espectrofotométrica de 523 asteróides, a antiga classe U foi desmembrada em M, E, R e uma “nova” classe U foi definida.

Após *Bowell et al. (1978)* os sistemas de taxonomias começaram a ser derivados usando técnicas estatísticas de análise multivariada, que consiste em analisar uma amostra correlacionando duas ou mais variáveis estatísticas ou

matemáticas independentes.

O sistema de taxonomia mais usado até hoje foi o proposto por *Tholen* (1984). Desenvolvido a partir dos dados das oito cores fotométricas do ECAS e de algumas medidas de albedo geométrico, Tholen usou o método das componentes principais (PC, *principal components*) para ampliar as taxonomias anteriores. Ele observou agrupamentos no espaço das PC (Figura 1.5) e definiu 14 classes independentes, cada uma denominada por uma letra. O espectro discreto médio de cada uma é mostrado na figura 1.6. Além das antigas classes S, C, E, M, e R, Tholen identificou seis novos grupos espectralmente distintos, chamando-os de classes A, D, T, G, P, B e F. As classes E, P e M são distinguíveis apenas através dos albedos geométricos. Quando esta informação não está disponível, tem-se a classe X, denominada “degenerada”. Por fim, Tholen criou as classes Q, R e V apenas para representar três asteróides que ele considerava possuírem espectros incomuns : 1862 Apollo, 249 Dembowska e 4 Vesta, respectivamente. Apesar da maioria dos asteróides do ECAS receber uma única classe, quando a classificação estivesse incerta entre mais de uma classe, múltiplas letras eram assinaladas.

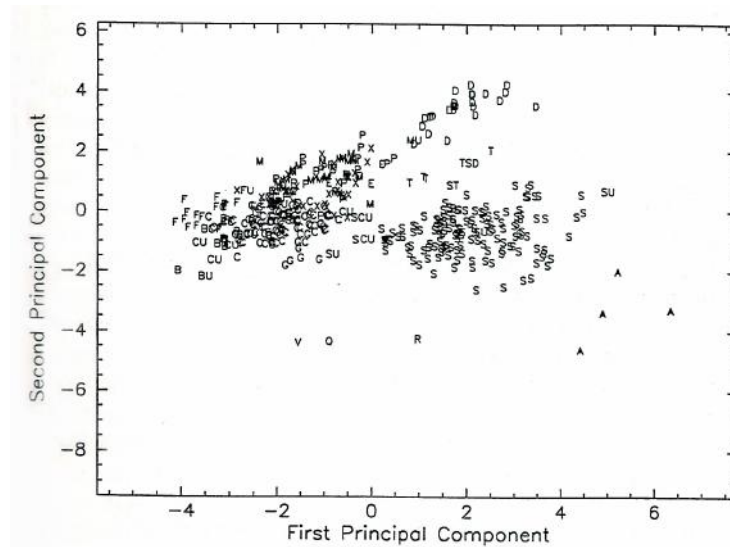


Figura 1.5: Espaço entre a primeira e segunda componente principal. Os asteróides pertencentes aos agrupamentos estão marcados pela letra de sua taxonomia (*Tholen*, 1984).

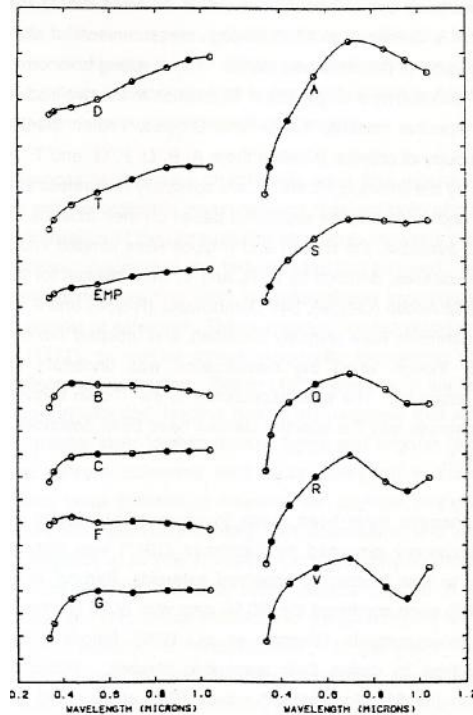


Figura 1.6: Espectros discretos representativos das classes definidas por Tholen (*Tholen*, 1984).

Três anos depois, *Barucci et al.* (1987) aplicou uma técnica de análise multivariada (*G-mode*) nos dados de asteróides do ECAS e medidas de albedo geométrico do IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) para definir seu próprio sistema taxonômico. Seu método distinguiu 18 aglomerações de objetos que foram usadas para definir as classes taxonômicas.

A primeira tentativa de identificar fronteiras entre grupos espectrais usando rede neural foi feita por *Howell et al.* (1994). *Howell* e colaboradores usando os dados do 52-colors survey (*Bell et al.*, 1988) combinado com o do ECAS verificaram que o sistema de Tholen era consistente, e definiram um novo sistema mais abrangente.

Nos anos subsequentes novas classes foram adicionadas ao sistema de Tholen baseadas em observações espectrais de alguns objetos. *Bell* (1988) propôs a adição da classe K para representar as propriedades espectrais incomuns de alguns membros da família de Eos. *Binzel et al.* (1993) definiu a classe O para representar o espectro do asteróide 3628 Boznemcová. *Binzel & Xu* (1993) ao analisar os espectros dos membros da família de Vesta, propuseram dividir o tipo V em duas, e introduziram a classe J.

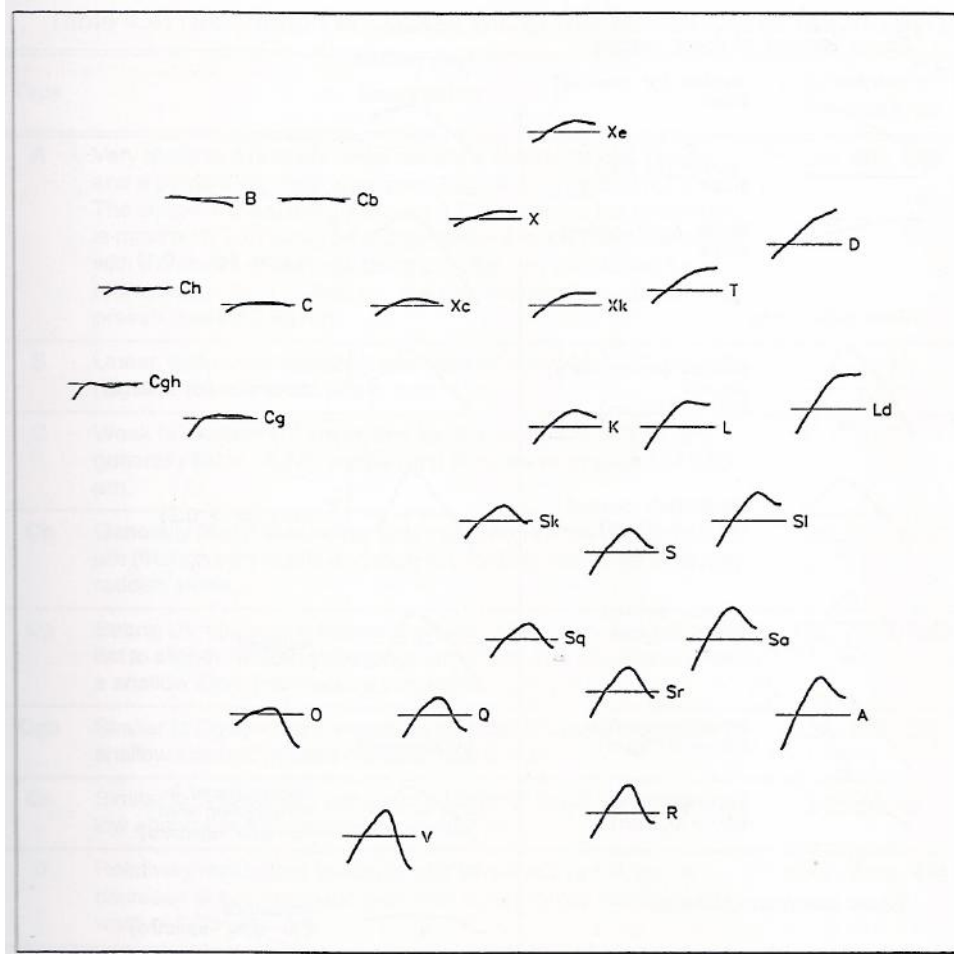


Figura 1.7: Esquema de espectros médios das classes definidas por Bus reproduzindo as suas disposições no espaço das componentes principais (*Bus*, 1999).

O sistema mais recente na faixa do visível, foi o proposto por Bus & Binzel (2002) usando os dados do mapeamento espectrocópico, SMASS II, baseado na análise de aclives, declives e de absorções (ou falta de) presentes nos espectros. O sistema de Bus consiste em 26 classes. Dentre elas, as classes Tholen A, Q, R, V, D e T mantiveram-se inalteradas, no entanto as classes S, C e X (agora chamadas de “complexos”) foram subdividas, para que representassem variações internas a cada classe. Para o complexo X não houve necessidade dos albedos, como na taxonomia de Tholen, pois a resolução espectral dos dados do SMASS II permitiu separá-lo em demais classes.

As classes de Bus e sua comparação com as taxonomias anteriores é dada na tabela 1.2. O perfil espectral de cada classes é mostrada na figura 1.7, e a disposição espacial imita suas posições no espaço PC.

Class. Tholen	Class. Barucci	Class. Howell	Class. Bus
B, F	B0-B3	B+F	B
			Cb
G	G0		Cg
		Cv, Cx	Cgh
C			C
	C0		Ch
			Xc
E, M, P		E, M, P	Xk
	E0, M0		X
			Xe
T	D0-D3	T	T
D		D	D
		K	K
			L
		So	Ld
			Sa
S	S0-S3		Sl
		S	S
			Sr
		Sp	Sk
			Sq
Q	-	-	Q
A	A0	A	A
R	V0	R	R
V		V	V
-	-	-	O

Tabela 1.2: Summário comparativo entre as classes taxonômica dos quatro maiores sistemas de taxonomia (*Bus et al.*, 2002).

1.5 DISTRIBUIÇÃO DE COMPOSIÇÕES

Os primeiros estudos (*Kitamura, 1959; Wood and Kuiper, 1963*) a fazerem fotometria em filtros UBV notaram que asteróides da região externa do cinturão possuíam cores significativamente mais azuladas que os da região interna. Entretanto estes resultados não puderam ser melhor avaliados devido ao pequeno número da amostra e a falta de conhecimento da composição asteroidal.

A principal forma de identificar a composição dos asteróides é estabelecendo uma relação entre as taxonomias e a mineralogia de meteoritos. Apesar deste procedimento ser deficiente, pois muitos meteoritos aparentemente não possuem nenhum análogo espectral entre os asteróides e vice-versa, ele permite melhor entender o panorama composicional.

A partir dessas relações, o estudo da distribuição das taxonomias é importante para inferir as condições térmicas iniciais do processo de formação e de evolução do Sistema Solar ao longo dos 4,6 bilhões de anos. As características meteoríticas fornecem informação sobre taxa de aquecimento e pressão sofrida por estes no meio interplanetário. Conhecendo-se a mineralogia dos meteoritos é também possível entender o interior dos asteróides.

Após o desenvolvimento da taxonomia de Tholen, *Chapman (1989)* tentou reproduzir a distribuição taxonômica para o cinturão principal usando uma amostra de 1.721 asteróides. O resultado foi a predominância da classe S na região interna, da classe C na região intermediária e das classes P e D na externa (Figura 1.8).

No mesmo ano, *Bell et al. (1989)*, baseado na relação com os meteoritos, tentou agrupar a taxonomia Tholen em três categorias em função da taxa de aquecimento que um asteróide possa ter experimentado na época de sua formação:

1. objetos primitivos que experimentaram nenhuma ou pouco aquecimento - Inclui as classes: D, P, C, K e Q;

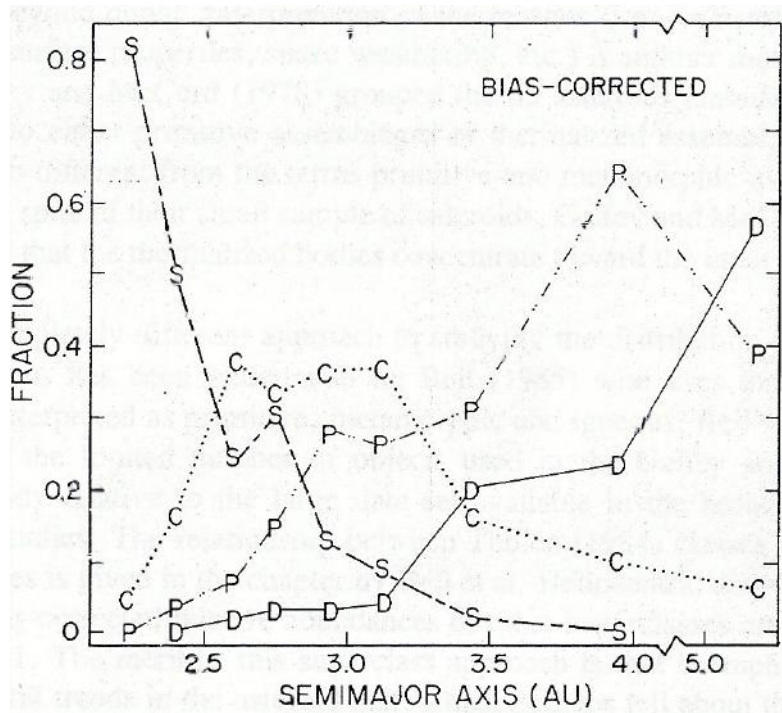


Figura 1.8: Distribuição de taxonomias feita por Chapman a partir das classes de Tholen (*Chapman, 1989*).

2. objetos metamórficos que foram aquecidos o suficiente para apresentar mudanças espectrais - T, B, G e F;
3. objetos ígneos cuja superfície experimentou total derretimento - V, R, E, A, M e S.

Bell e colaboradores assumiram que o tipo S é correlato aos meteoritos ferrosos-rochosos (*Chapman et al., 1975*), desconsiderando evidências estatísticas que relacionam esta classe com os meteoritos rochosos primitivos, os condritos ordinários. Estes meteoritos são 87% dos meteoritos que caem na Terra, enquanto a classe S é a mais abundante do cinturão interno, o que indicaria uma correlação, se não fosse a diferença espectral (*Feierberg et al., 1982*).

A hipótese que estava sendo proposta era de que os objetos ígneos e metamórficos são maioria até cerca de 2,8 UA, ponto a partir do qual objetos primitivos reinariam. Isso demonstraria um gradiente de maiores pressão e temperatura nas regiões internas e próximas ao Sol na época de formação. Mas isto dependeria da interpretação da composição do tipo S.

A partir dos 1.447 espectros do SMASS II e usando sua própria taxonomia, *Bus (1999)* calculou a distribuição para os complexos S, C e X e as classes V, Ld+D+T. O resultado mostrou a mesma preponderância dos tipos S na parte

interna como em *Chapman* (1989), entretanto após 3 UA identificou-se que os tipos C são os predominantes ao invés da classe P, do complexo X (Figura 1.9).

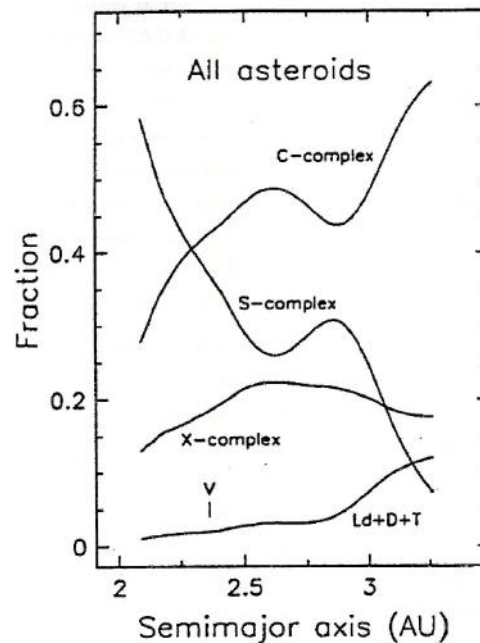


Figura 1.9: Distribuição dos complexos taxonômicos S, C e X e das classes V, Ld+D+T produzida por Bus (*Bus*, 1999).

O último trabalho atualizado da distribuição taxonômica foi feita por *Mothé-Diniz et al.* (2003) com a amostra espectrocópica de 2.026 asteroides dos *surveys* SMASS II + S3OS2. As distribuições dos complexos C, S e X, os mais abundantes, mostraram um cenário muito menos simples do que apresentado em trabalhos anteriores. As mesmas predominâncias são discernidas em relação aos três complexos, entretanto as distribuições apresentam algumas variabilidades e o complexo S parece ser mais frequente na região intermediária. (Figura 1.10).

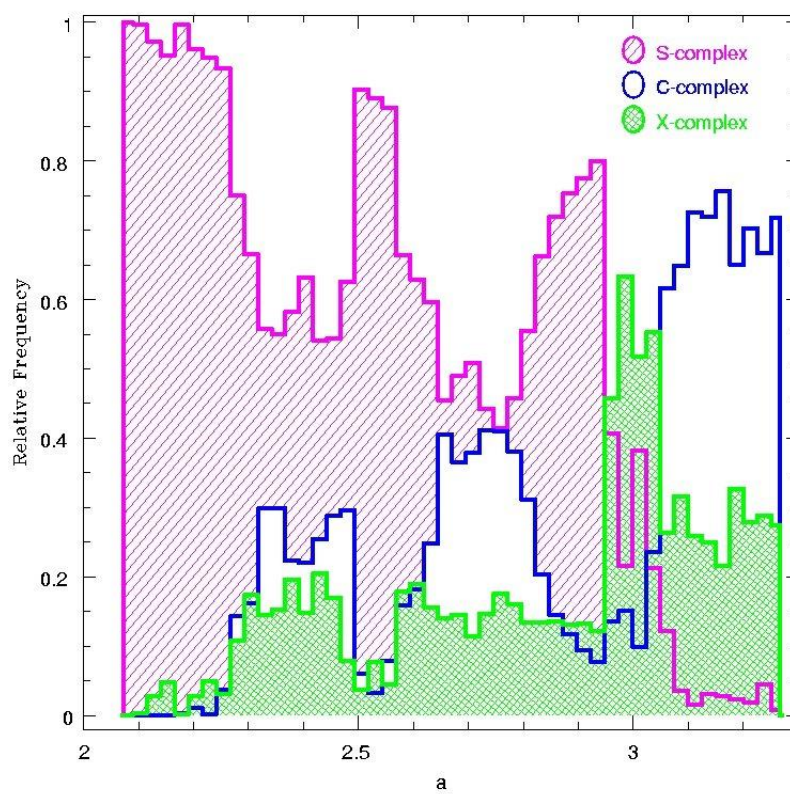


Figura 1.10: Fração relativa dos complexos taxonômicos definidos por Bus a partir de dados do SMASS II e do S3OS2 no Cinturão Principal (*Mothé-Diniz et al., 2003*).

Capítulo 2

OS DADOS

2.1 SLOAN DIGITAL SKY SURVEY

O *Sloan Digital Sky Survey*¹ (SDSS) é um dos maiores projetos de mapeamento do céu. Atualmente em sua sétima edição, possui um total de 357 milhões de objetos imageados e medições espectroscópicas de 929.555 galáxias, 121.363 quasares e 464.261 estrelas. Ele utiliza exclusivamente um telescópio Ritchey-Chrétien alto-azimutal de 2,5 metros situado no Observatório de Apache Point no Novo México, EUA. Possui a capacidade de coletar dados homogêneos em fotometria e espectrocópia dos mais diversos objetos celestes.

O instrumento é composto por uma câmera de 120-megapixels com uma sequência de CCDs capaz de produzir uma imagem de 1,5° do céu. Possui também um par de espectrógrafos alimentados por fibras óticas que pode medir o espectro de baixa resolução de mais de 640 objetos em uma única exposição.

Através dos oito anos de operações do projeto, foram cobertos no norte do hemisfério galático 45.000 graus quadrados do céu em fotometria e 9.380 graus quadrados para espectroscopia. A segunda campanha do SDSS abriga três grandes projetos: (1) o *Sloan Legacy Survey*, o projeto original que visa coletar dados fotométricos e espectroscópico de qualquer objeto fixo na esfera celeste; (2) o *SEGUE*, voltado para o estudo espectroscópico de populações de estrelas da Via láctea; e (3) o *Sloan Supernova Survey*, voltado para o estudo espectroscópico de todos os tipos de supernova.

¹ (<http://www.sdss.org/dr7>).

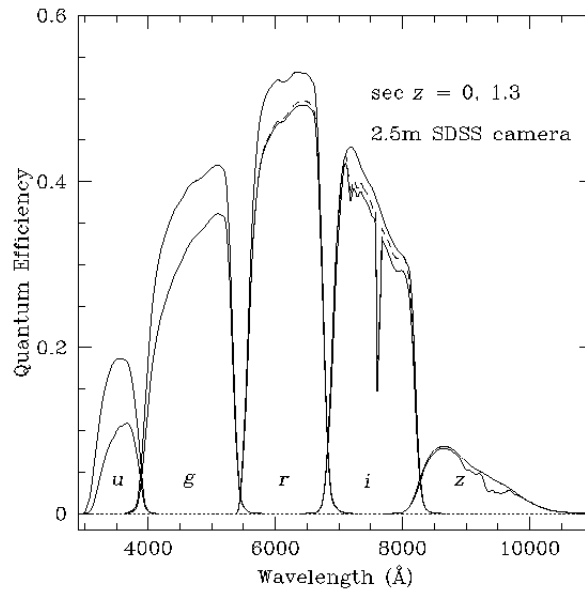


Figura 2.1: Diagrama da eficiência quântica dos filtros do SDSS. As curvas suavizadas representam a eficiência pura, sem extinção atmosférica. E a outra curva representa a eficiência modificada pela extinção à 1.3 massas de ar.

Os dados fotométricos do SDSS são composto por magnitudes aparentes coletadas quase simultaneamente em cinco filtros: u' , g' , r' , i' , z' centrados nos comprimentos de onda de 3.551 Å, 4.686 Å, 6.165 Å, 7.481 Å e 8.931 Å respectivamente. O gráfico da eficiência quântica dos filtros é apresentado na figura 2.1. A incerteza do ponto zero é 0,02-0,03 mag, que significa que a variação da qualidade fotométrica entre imagens de diferentes regiões do *survey* é baixa. O número total de objetos detectados pelo processamento de dados que são incluídos no catálogo, dividido pelo número total de objetos nas imagens, (Completeza) para fontes pontiformes é de $\sim 99,3\%$ e cai para 95% em magnitudes de 22,2, 22,4, 22,1, 21,2 e 20,3 para u' , g' , r' , i' , z' respectivamente. Além das magnitudes, o catálogo fornece dados astrométricos do instante das observações e intrínsecas ao objeto. A acurácia das posições astrométricas são melhores que 0,1 segundo de arco. por coordenada para objetos com $r < 20.5$ (*Pier et al.*, 2003).

2.1.1 SDSS MOVING OBJECT CATALOG

O *SDSS Moving Object Catalog*² é um sub-catálogo do SDSS que fornece os dados fotométricos para objetos não-fixos na esfera celeste.

²<http://www.astro.washington.edu/users/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>

O tempo de troca de filtros durante as observações do SDSS é de 72s, o que permite que objetos que se movem com velocidades angulares entre 0,05-0,5°/dia sejam detectados. O software do SDSS automaticamente reconhece e assinala uma *flag* para qualquer objeto que aparentemente se move na imagem. O SDSS-MOC re-analisou todas as imagens contendo estes objetos para identificá-los e conectá-los a algum objeto celeste movente previamente identificado. Foi então produzida uma lista com as informações destes objetos que estão no SDSS e em outros catálogos (*Ivezić et al.*, 2001).

O SDSS-MOC está em sua quarta edição e, adicionado com todas as outras edições, contém dados fotométricos e astrométricos de 471.569 observações de objetos realizadas até Março de 2007. Destes, 220.101 correspondem à 104.449 objetos listados no catálogo ASTORB³ (*Bowell et al.*, 2001). Considerando que um objeto pode possuir mais de uma observação (a maioria tem cerca de 2 observações), isto é cerca de 33% dos objetos presentes na lista do ASTORB.

Os objetos que são assinalados como móveis são asteróides do cinturão principal, asteróides troianos e cometas, por que apenas o movimento destes objetos é perceptível em diferenças de intervalos de tempo relativamente pequenos. Entretanto, devido o limite na velocidade angular, não é possível detectar objetos com órbita próxima a da Terra nem objetos transnetunianos.

O SDSS-MOC é um catálogo público de 291 MB (4^o versão) com uma linha de informação para cada elemento (*Ivezić et al.*, 2002). Os objetos são detectados no intervalo de magnitude entre 14 à 21,5 para a banda r' . O conteúdo é principalmente composto por:

- Códigos internos do SDSS;
- Dados Astrométricos com posições em coordenada equatorial celeste e valores de velocidades angulares;
- Fotometria SDSS em cinco bandas e suas incertezas;
- Magnitudes Johnson V e B, e magnitude absoluta;
- Numeração do objeto, código, nome e designação SDSS, se ele possuir;
- Informações orbitais como distâncias heliocêntricas e geocêntricas, elementos orbitais osculadores (ASTORB) e elementos orbitais próprios (*Knežević and Milani*, 1999; *Milani and Knežević*, 1994);

³<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>

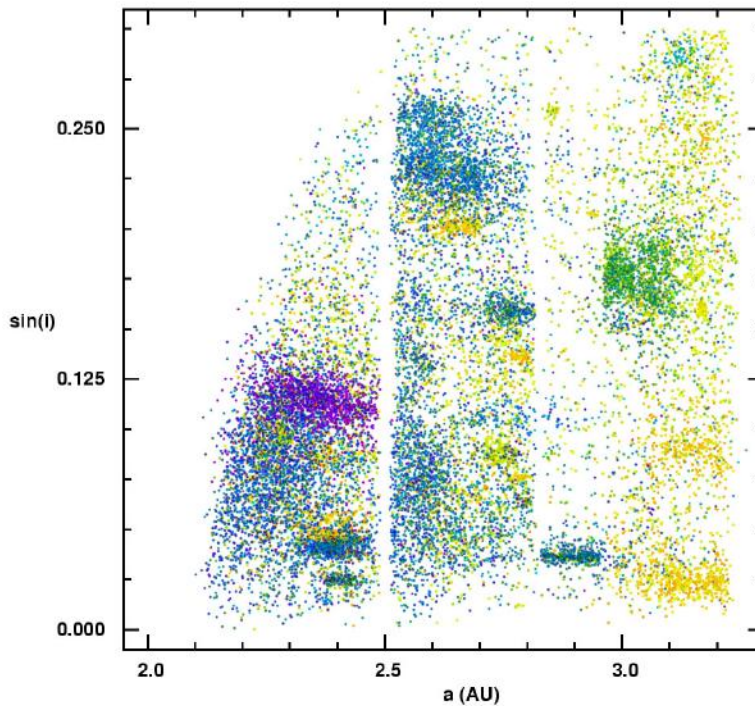


Figura 2.2: Distribuição de todos os asteróides com elementos orbitais computados pelo SDSS-MOC. As cores indicam objetos com fotometria similar (*Parker et al.*, 2008).

- 64 “*flags*” binárias que informam a qualidade e características da observação.

A completeza do catálogo é de cerca de 95% e a taxa de contaminação, razão de elementos que não são corpos moventes, ou seja, identificações errôneas pelo software do SDSS, é de cerca de 6% (*Jurić et al.*, 2002).

A figura 2.2 mostra a homogeneidade do catálogo. Nele estão todos os objetos do SDSS-MOC no espaço do semi-eixo maior pelo seno da inclinação, ambos osciladores. É possível identificar as aglomerações de asteróides e as falhas de Kirkwood.

2.2 CÁLCULO DAS REFLETÂNCIAS

Os astéroides são objetos sem luminosidade própria, e todo seu brilho é reflexão da luz proveniente do Sol. Por este motivo, é necessário subtrair a contribuição da cor solar no cálculo das cores dos asteróides para que possamos analisar apenas a contribuição da luz refletida pelo material da superfície, sem efeito do espectro solar. As cores são definidas como a diferença entre

duas magnitudes, e em cada observação são dadas por (Ivezić *et al.*, 2001):

$$c_{u-g} = (m_u - m_g)_{obs} - (1.32)_{sol} ,$$

$$c_{g-g} = (m_g - m_g)_{obs} - (0.00)_{sol} ,$$

$$c_{g-r} = (m_g - m_r)_{obs} - (0.45)_{sol} ,$$

$$c_{g-i} = (m_g - m_i)_{obs} - (0.55)_{sol} ,$$

$$c_{g-z} = (m_g - m_z)_{obs} - (0.59)_{sol} ,$$

onde m são as magnitudes aparentes fornecidas pelo SDSS-MOC, e “*obs*” significa observada.

Estabelecido c_{g-g} como o valor constante zero, se imaginarmos uma reta desceve o comportamento aproximado do espectro nas bandas u' , g' , r' e i' , a contribuição de uma variação da inclinação desta reta na banda u' será muito menor se ela estiver normalizada na banda g' do que na banda r' , por exemplo. Com este princípio em mente, as cores foram normalizadas em relação à banda g' , que foi escolhida para diminuir a contribuição da incerteza da banda u' no processo de classificação taxonômica.

As incertezas das cores são dadas por (fórmula padrão de propagação do erro):

$$\Delta c_{u-g} = \sqrt{(\Delta m_u)^2 + (\Delta m_g)^2} ,$$

$$\Delta c_{g-g} = \sqrt{2}(\Delta m_g) ,$$

$$\Delta c_{g-r} = \sqrt{(\Delta m_g)^2 + (\Delta m_r)^2} ,$$

$$\Delta c_{g-i} = \sqrt{(\Delta m_g)^2 + (\Delta m_i)^2} ,$$

$$\Delta c_{g-z} = \sqrt{(\Delta m_g)^2 + (\Delta m_z)^2} ,$$

onde Δm são as incertezas das magnitudes nas cinco bandas de passagem.

Fluxo de refletância, ou refletância, é o fluxo de luz do asteróide refletida do Sol. Esta é a unidade usada para espectros de baixa resolução, geralmente normalizados em $0.55 \mu\text{m}$. Trabalhar com as observações em refletância torna possível a comparação do espectro discreto, composto por cinco pontos, com os espectros de baixa resolução. Para isso, calcula-se as refletâncias através da lei de Pogson, que relaciona cor com fluxo:

$$(c_{k-j})_{obs} - (c_{k-j})_{sol} = -2.5 \log \left(\frac{(F_k)_{obs}}{(F_k)_{sol}} \frac{(F_j)_{sol}}{(F_j)_{obs}} \right) ,$$

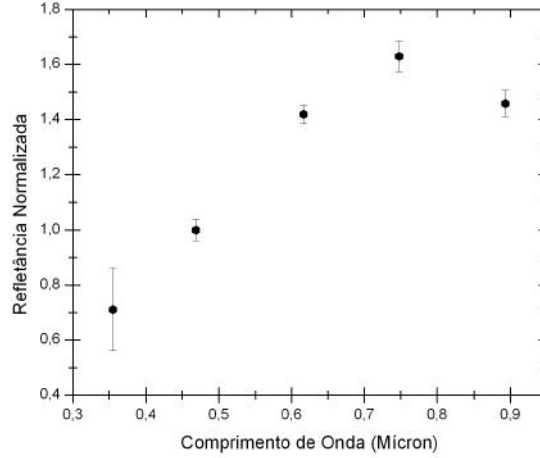


Figura 2.3: Exemplo do espectro discreto de uma observação do SDSS-MOC. A componente vertical representa a refletância normalizada, onde cada ponto é um valor de refletância na banda SDSS. E na componente horizontal está o comprimento de onda em mícrons, com os pontos nos valores centrais de comprimento de onda de cada banda dos filtros.

onde k e j são índices genéricos representando as bandas de passagem. Logo, manipulando a expressão acima temos as refletâncias normalizadas no fluxo da banda g' (Roig and Gil-Hutton, 2006):

$$F_u = 10^{0.4c_{u-g}} ,$$

$$F_g = 1.00 ,$$

$$F_r = 10^{-0.4c_{g-r}} ,$$

$$F_i = 10^{-0.4c_{g-i}} ,$$

$$F_z = 10^{-0.4c_{g-z}} .$$

Para estimar os erros relativos $\frac{\Delta F}{F}$ aplicou-se a segunda ordem da expansão de Taylor da função $F_{(c_j)} = 10^{0.4c_j}$ onde c é uma cor qualquer. Temos:

$$\frac{\Delta F_j}{F_j} = 0.9210\Delta c_j(1 + 0.4605\Delta c_n) .$$

Na figura 2.3 está o exemplo de um espectro discreto. O perfil gerado pela sequência de pontos permite visualizar a estrutura do espectro do asteroide, apesar de não conter a mesma informação que um espectro de baixa resolução.

A partir deste ponto, todas as magnitudes do catálogo do SDSS-MOC foram convertidas em refletância.

2.3 AMOSTRAGEM

O catálogo do SDSS-MOC possui várias observações em diversas datas, um número muito maior de qualquer mapeamento espectroscópico. Entretanto, por estes objetos não serem o foco principal do SDSS, a qualidade de algumas observações não é muito boa. Isso significa que pode haver no catálogo falsos objetos móveis, observações com grandes incertezas ou erro em alguma magnitude, observações inviabilizadas por erro instrumental, entre outros. Apenas alguns desses problemas podem ser identificados nos parâmetros no catálogo, enquanto para outros seria necessário restrições cuidadosas ou até análise das próprias imagens do SDSS.

Na 4^o edição do SDSS-MOC foram incluídas observações consideradas em condições não-fotométricas, que provavelmente poderiam conter magnitudes de baixa qualidade, *i.e.*, valores errados ou com altas incertezas. Algumas dessas observações, feitas durante a campanha de busca de eventos de supernovas, haviam sido produzidas com condições de baixa acurabilidade fotométrica. Outras foram feitas durante mapeamentos através do plano galático que devido á alta densidade estelar as informações fotométricas e astrométricas necessitam de cuidado especial.

Para que os problemas acima não afetassem a construção dos modelos dos grupos taxônomicos ou que provocassem resultados falsos na análise dos dados, um programa em linguagem FORTRAN foi escrito para excluir observações sob os seguintes parâmetros:

- $|DEC| < 1.26^o$ e latitudes galáticas negativas (eliminando as observações da campanha de supernovas);
- latitudes galáticas $< 15^o$ (Observações no plano galático);
- magnitudes com valores 99.99 ou com incertezas com 9.99 (valores inviabilizados);
- “flag” de identificação com valor 0 (Observações de asteróides sem identificação);

Os parâmetros acima foram apenas aplicados a observações exclusivas da 4^o edição do SDSS-MOC. O catálogo é acumulativo, logo todas as observações

que fossem das edições anteriores foram deixadas inalteradas. A amostra que restou contém 103,626 observações de 70,240 asteróides.

Capítulo 3

METODOLOGIA

3.1 O OBJETIVO

O objetivo principal deste projeto foi desenvolver um método de classificação taxonômica baseado na comparação de perfil espectrofotométrico que fosse rápida e informativa dos dados do SDSS-MOC. Apesar de toda classificação ser algo intrinsecamente restritivo, ela é vantajosa para identificar asteróides com características comuns. As taxonomias não possuem nenhuma relação direta com mineralogia, entretanto são capazes de impor algumas restrições à possível composição de um asteróide.

No caso dos dados do SDSS-MOC, a classificação taxonômica torna-se fundamental, pois a informação composicional que pode ser obtida através de um espectro discreto em cinco bandas é limitado. Apesar de alguns trabalhos procurarem variabilidades nas refletâncias das bandas do SDSS-MOC devido a inhomogeneidades na superfície do asteróide (*Szabó et al., 2004*), a ordem da incertezas dos dados do SDSS só permite que sejam diferenciadas os principais fatores que definem um espectro asteroidal no visível (seção 1.2).

3.2 ESPECTROS CARACTERÍSTICOS

Os espectros característicos são modelos que reproduzem as refletâncias comuns e intervalos de variação à um determinado grupo taxonômico. O propósito é ter uma base de comparação para que os dados sejam classificados, e portanto, modelos representativos são uma chave para o êxito do procedimento de classificação taxonômica deste método.

3.2.1 A DEFINIÇÃO DOS GRUPOS TAXONÔMICOS

A principal meta ao definir os grupos foi representar os tipos taxonômicos mais abundantes e evidentes do cinturão principal (S, C, X) e alguns tipos que despertassem algum interesse especial no estudo da distribuição de composições de asteróides (V, L, A, D, O). Classes definidas por Tholen e Bus foram separadas em 8 grupos por princípio de semelhança espectral (Tabela 3.1).

Ao compor os grupos se considerou se seria possível resolvê-los entre si nas regiões espectrais dos filtros do SDSS. Não adiantaria inserir um determinado grupo taxonômico cientificamente interessante se não fosse possível distinguí-lo dos demais usando apenas os dados do SDSS-MOC.

Grupo Taxonômico	Classes componentes	Abundância no Cinturão (> 13km)
L	L, Ld	< 1%
A	A, Sa	< 1%
S	S, Sl, Sk, Sq, Sr	~20%
V	V, R, J	< 1%
O	O	< 1%
D	D, T	~1%
X	X, M, P, E, Xe, Xk, Xc	~24%
C	C, B, F, Cb, Cgh, Cg, Ch, Caa	~56%

Tabela 3.1: Grupos taxonômicos definidos pelo nosso método e as respectivas classes taxonômicas do Bus e do Tholen que as compõem. As porcentagem de abundância no cinturão para asteróides com diâmetro acima de 13 km (*Mothé-Diniz et al., 2003*).

A seguir, tem-se uma breve descrição de cada grupo taxonômico:

O grupo C representa o complexo C, o tipo taxonômico mais abundante do cinturão, preponderante na região externa. Este complexo é relacionado aos objetos de composição mais primitiva do cinturão, aqueles que sofreram pouca

ou nenhuma alteração na sua mineralogia devido ao aquecimento e pressão durante a fase de formação. Seu espectro é associado aos meteoritos condritos carbonáceos (*Johnson and Fanale, 1973*).

O grupo S é composto pelas classes do complexo S, o segundo mais abundante do cinturão, preponderante na região interna. Não existe uma associação meteorítica única a este complexo. Alguns espectros tipo S parecem-se com os meteoritos ígneos ferrosos-rochosos, mas a abundância de queda dos primitivos condritos ordinários torna-os uma direta associação a este tipo, apesar das diferenças espectrais. As variações espectrais entre as classes são provavelmente devido à processos de intemperismo espacial, que atenuariam as bandas de absorção (*Pieters and McFadden, 1994; Chapman, 1996*).

O grupo X representa o diversificado complexo X, o terceiro mais abundante. A que tipo de mineralogia o complexo X pode ser relacionado ainda é questionado, especula-se que membros deste complexo possam ser fragmentos de corpos que foram submetidos a altas temperaturas (*Rivkin et al., 1995*). Asteróides tipo X não apresentam nenhuma preponderância em qualquer região do cinturão.

O grupo V representa basicamente a classe espectral V. Seu perfil espectral é condizente com o basalto (*McCord et al., 1970*), um tipo de rocha que foi intensivamente aquecida até seu derretimento e depois rapidamente esfriada. Esse material é encontrado na crosta terrestre devido a processos de vulcanismo, e é intrinsecamente relacionado ao material da crosta de um corpo diferenciado (*Larson and Fink, 1975*). Por muito tempo asteróides do tipo-V eram apenas encontrados na família de Vesta, um asteróide diferenciado, ou nas vizinhanças, na região interna. Entretanto esse paradigma foi quebrado com a descoberta superfície basáltica de 1459 Magnya na região externa do Cinturão Principal (*Lazzaro et al., 2000*).

O grupo L representa as classes L e Ld. Análises de espectros deste tipo indicam uma composição dominada pela presença de piroxênios (*Cloutis et al., 1986*). É um grupo taxonômico incomum no cinturão.

O grupo A representa as classes A e Sa. Seu perfil espectral é geralmente relacionado a meteoritos acondritos ricos em olivina (*Burbine, 1994*). É bastante raro em todo cinturão.

O grupo D representa os tipos espectrais T e D. São relacionados a objetos primordiais, ricos em materiais orgânicos e gelo (*Howell and Lebofsky, 1991; Andronico et al., 1987*). Esse tipo é comum entre asteróides troianos, objetos transnetunianos e núcleos cometários.

O grupo O representa a classe Bus O. Este tipo espectral se assemelha aos primitivos meteoritos condritos ordinários L6 e LL6 na região espectral do visível. Entretanto, os condritos ordinários são os meteoritos mais comumente encontrados na Terra, e apenas foi observado um tipo-O pelo SMASS I, o 3628 Boznemcová, há cerca de 15 anos atrás. Atualmente mais asteróides deste tipo foram encontrados, mas mesmo assim seu número continua baixo em relação a outros tipos espectrais. Devido a este aparente paradoxo tem-se especulado que este tipo deve ser muito mais abundante, mas com uma população de objetos muito menores. Especula-se também que asteróides do tipo O represente uma população mais jovem, e que por isso sua superfície não tenha sido intensivamente afetada pelo intemperismo espacial (*Binzel et al., 1993*).

Os espectros das classes A, L, S, V, O, D, X e C da taxonomia Bus estão na figura 3.1 para ilustrar as principais classes componentes do grupos taxonômicos.

3.2.2 COMPOSIÇÃO DOS MODELOS

O primeiro passo para calcular os modelos foi escolher uma amostra de objetos pertencentes as classes taxonômicas de cada grupo. Preferiu-se usar os próprios dados fotométricos do SDSS-MOC para compor esta amostra, pois dessa forma qualquer característica observacional ou incerteza instrumental poderia ser diminuída ou cancelada.

Para isso, foram selecionadas observações de asteróides já taxonomicamente classificados. Estes objetos são encontrados em um catálogo do Planetary Data System¹, que possui as classificações taxonômicas de 2583 asteroides dos mapeamentos ECAS, SMASS I, SMASS II e S3OS2 nos sistemas do Tholen, Barucci, Tedesco (*Tedesco et al., 1989*), Howell e Bus. A interseção deste catálogo e o SDSS-MOC é composto por 624 observações. Deve ser ressaltado

¹Neese, C., Ed., Asteroid Taxonomy. EAR-A-5-DDR-TAXONOMY-V5.0. NASA Planetary Data System, 2005 (<http://www.psi.edu/pds/resource/taxonomy.html>).

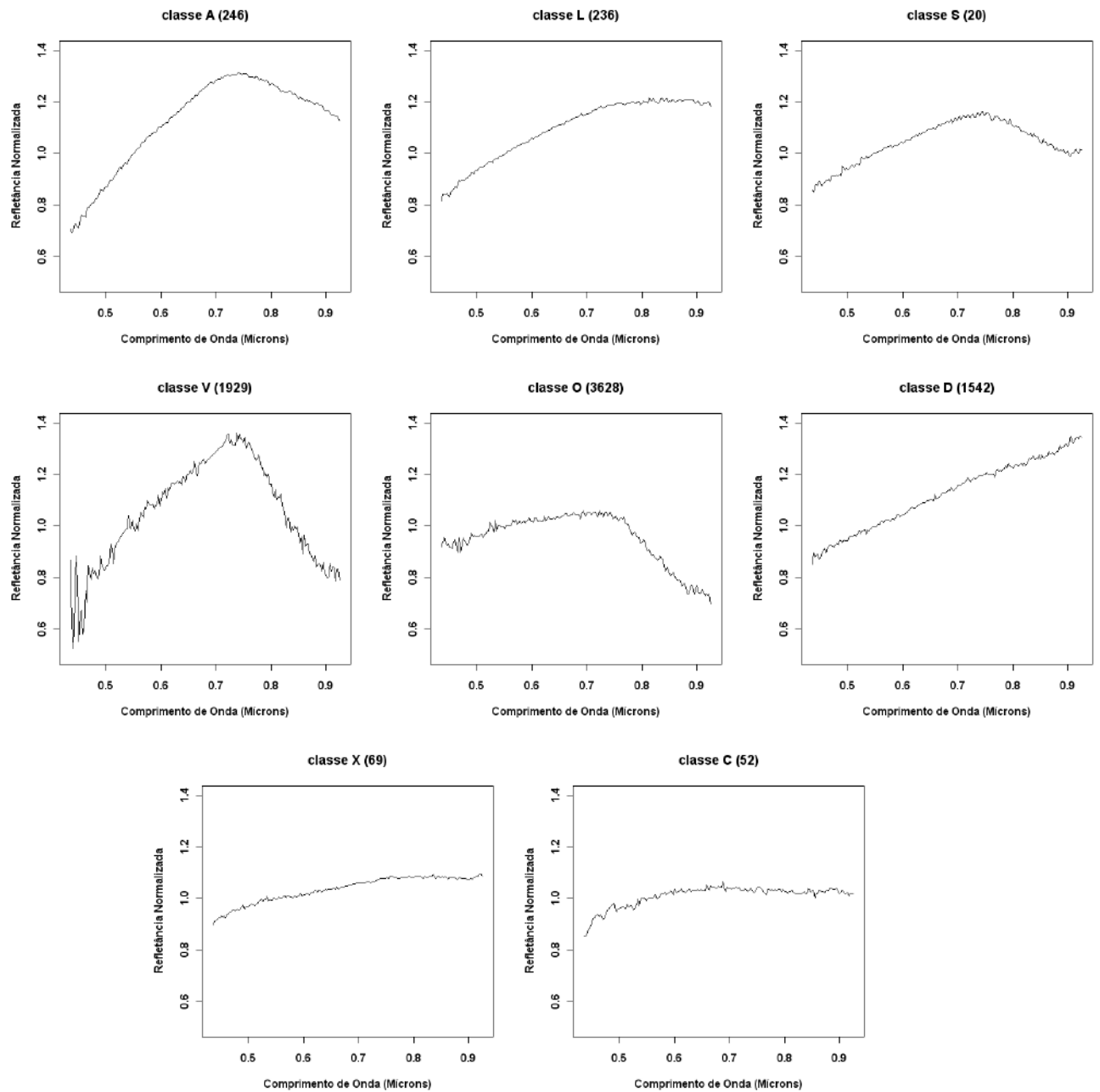


Figura 3.1: Exemplo de espectros de baixa resolução do SMASS II das principais classes Bus que compõem os grupos taxonômicos. Todos normalizados em $0.550 \mu\text{m}$.

que a partir deste momento as observação foram consideradas, individualmente, elementos da amostra. Cogitou-se representar cada objeto por uma média entre as suas observações, entretanto ao se fazer isto, observações de altas incertezas poderiam distorcer observações que se encaixassem nas características de seu grupo. Além disso, asteróides são capazes de apresentar uma variação em sua composição superficial, e ao se fazer uma média, observações com estas informações poderiam ser perdidas.

A etapa seguinte foi selecionar as amostras de observações de asteróides que permitissem ter alguma confiança sobre sua classe espectral. Essa confiança não foi definida pela incerteza nas refletâncias, mas sim se havia ou não ambiguidade na classificação taxonômica do asteróide a partir de dados de diferentes mapeamentos espectroscópicos. Para isso foram usadas apenas observações de asteróides que foram observados por pelos mapeamentos do ECAS, SMASS I, SMASS II e S3OS2 que tivessem classificações nas taxonomias Tholen e/ou Bus. Os erros relativos médios, número de elementos das amostras são dados na tabela 3.2.

Grupo Tax.	$\sum \Delta F_u / \sum F_u$	$\sum \Delta F_g / \sum F_g$	$\sum \Delta F_r / \sum F_r$	$\sum \Delta F_i / \sum F_i$	$\sum \Delta F_z / \sum F_z$	N	$\frac{N_{sem-ambuidade}}{N_T}$
L	0.0450	0.0465	0.0369	0.0371	0.0398	11	21.6%
V	0.0361	0.0211	0.0210	0.0201	0.0292	15	18.1%
S	0.0504	0.0349	0.0300	0.030	0.0352	221	24.8%
D	0.0337	0.0281	0.0258	0.0252	0.0286	36	29.8%
X	0.0543	0.0578	0.0494	0.0505	0.0420	90	24.1%
C	0.0362	0.0292	0.0266	0.0271	0.0304	125	24%

Tabela 3.2: Tabela com os erros relativos médios para as refletâncias de cada banda para a amostra de cada grupo; número de elementos; e a razão entre os número de objetos sem ambiguidade taxonômica sob o número total de objeto pertencentes as taxonomias que compõem um dado grupo.

Não foi encontrada nenhuma observação não-ambígua de asteróides dos grupos A e O. Por este motivo, foi necessário aplicar outra forma de calcular os modelos para estes grupos. O tipo O na região espectral do visível assemelha-se aos meteoritos condritos ordinário L6 e LL6. Logo decidiu-se usar espectros destes meteoritos para obter uma representação das refletâncias. Foi usado

o modelo de O da taxonomia do Bus para procurar nos dados do RELAB² espectros de meteoritos similares a esta classe. Cada espectro foi convoluído com as bandas de passagem dos filtros do SDSS para que fosse obtida os fluxos de refletância (*Carvano et al. 2009*, comunicação privada).

O procedimento acima não pôde ser aplicado para asteróides do tipo A, pois não existe nenhum meteorito análogo aos espectros desta classe. Entranto, é estabelecido que sua composição é basicamente composta de olivina, variando entre ricos em magnésio ou em ferro (*Burbine, 1994*). Para obter as refletâncias nas bandas de passagem do SDSS foi adotado o seguinte método: Para cada um dos 16 espectros no visível do SMASS II, classificados sem ambiguidade como Tipo A, foi implementado o Modelo Gaussiano Modificado (*Sunshine et al., 1990*) descrito em *Mothé-Diniz et al. (2008)* para modelagem de bandas de olivina. Esse procedimento recriou as absorções de olivina no espectro visível para que fosse possível produzir 5 espectros sintéticos compatíveis com a composição de meteoritos FO_{10} , FO_{20} , FO_{50} , FO_{70} e FO_{90} para cada espectro tipo A no visível. Onde FO_x é a nomenclatura para meteoritos ricos em olivina, onde x corresponde à porcentagem de olivina presente na amostra. No final, estes espectros sintéticos foram convoluídos com as bandas de passagem dos filtros SDSS, como feito anteriormente.

Para os grupos L, V, S, D, X e C, as distribuições de densidade de probabilidade das amostras foram calculadas para cada banda de passagem no espaço dos fluxos de refletância. Dessa forma, poderiam-se checar as sobreposições entre as classes e decidir os limites e valores necessários para modelação (figura 3.3). Considerou-se que os erros dos refletâncias eram gaussianos, e que por isso, seria possível substituir cada observação por uma gaussiana (*York et al., 2000*). As distribuições foram estimadas usando o método dos *kernels* gaussianos (*Parzen, 1962*) com erros heteroscedásticos, que consiste simplesmente em somar várias gaussianas com diferentes desvios padrões, onde cada uma representa a distribuição de densidade de uma dado observado. Na figura 3.2 é dado um exemplo. As vantagens deste método são que a distribuição apresenta-se uma forma suavizada e que observações com grandes incertezas são espalhadas no espaço dos refletâncias, e contaminam muito menos a distribuição. O estimador é dado por:

$$\hat{f}_n(x) = \frac{1}{N\sqrt{2\pi}} \sum_i^N \frac{1}{\sigma_i} \exp \left[-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma_i^2} \right],$$

²<http://www.planetary.brown.edu/rellab/>

onde N é o número de observações, x_i e σ_i é o fluxo e a incerteza da refletância em uma banda qualquer da i -ésima observação, respectivamente. Cada gaussiana foi normalizada para que sua área interna fosse unitária.

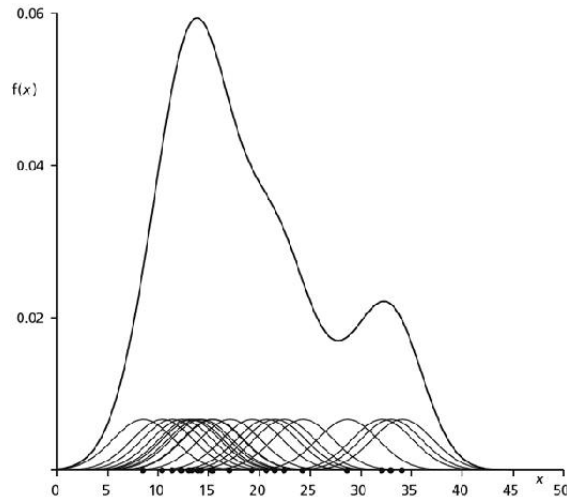


Figura 3.2: Exemplo de distribuição de uma amostra usando o método de *kernels* gaussianos. Onde $f(x)$ é a frequências de ocorrência de um determinado valor em x .

Na figura 3.3, é aparente que as sobreposições entre os grupos é marcante, mas isto é esperado e inevitável. Espectroscopicamente, classes como X e D ou S e L são partes de uma variedade que forma uma variedade contínua, e que são apenas separada por razões de classificação. Além disso, as sobreposições também são causadas pelas incertezas e variações das observações, que alargam a distribuição.

As distribuições mostram que nas bandas u' , r' , i' os grupos taxonômicos com presença da absorção de $1 \mu\text{m}$ (com estrutura) S, L e V, e grupos sem presença da absorção (sem estrutura), X e C, aglomeram-se em duas distintas regiões. Isto torna classificações ambíguas entre os grupos S, L e V e os grupos X e C, muito menos prováveis. O grupo D, nas bandas r' e i' , ocupa uma região de fronteira entre os demais grupos. As distribuições na banda z' podem parecer confusas, mas é esta banda e a banda i' que principalmente definem a separação entre os grupos individualmente.

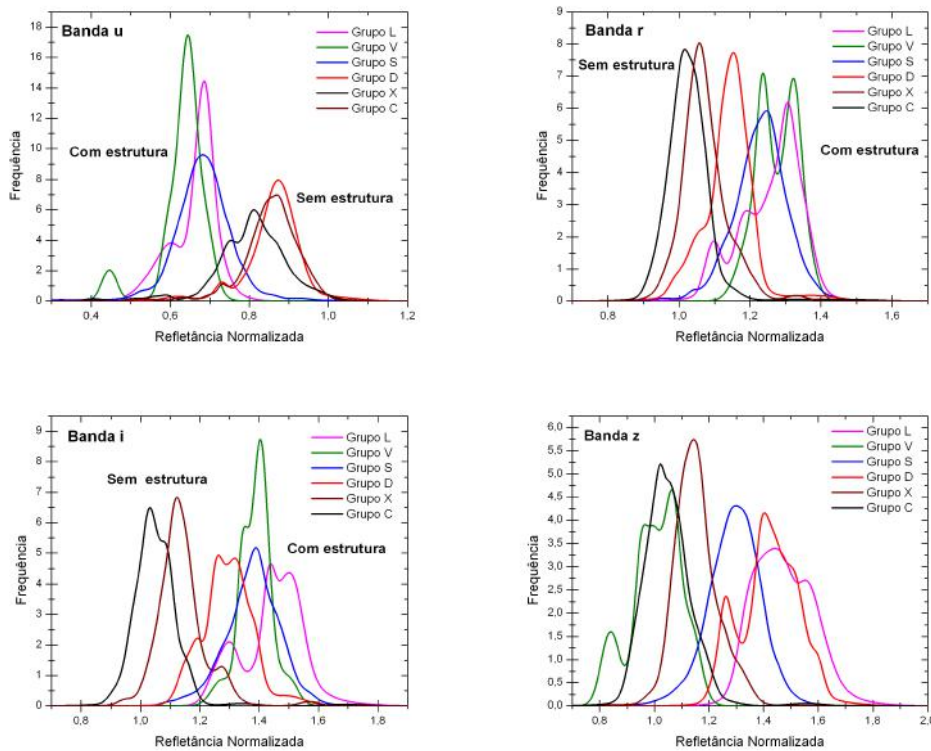


Figura 3.3: As distribuições de densidade de probabilidade das amostra de cada grupo taxonômico no espaço das refletâncias para cada banda SDSS.

A análise da figura 3.3 mostra que as sobreposições entre os grupos S e L e os grupos X e C é alta, e poderia dificultar a produção de um modelo acurado. É perceptível que algumas observações problemáticas nos grupos D e L estão distorcendo significativamente as distribuições nas bandas r' , i' e z' . Enquanto alguns elementos das amostras de X e C com valores muito altos e baixos nas bandas i' e z' estão alargando estas distribuições.

Inspecionando visualmente as amostras de S e L é possível ver que vários asteróides classificados como tipo S apresentam espectro discreto similar a tipo L e tipo K, com um certo achatamento após $0.75 \mu\text{m}$. O inverso é visto em duas observações na amostra do grupo L, que são similares a um tipo-S. O mesmo acontece com as amostras do grupo X e C, onde algumas observações no grupo X apresentam perfil de tipo-C e vice-versa.

A solução foi aplicar algumas restrições às amostras para diminuir as regiões de interseção, as quais estão explícitadas na tabela 3.3. O resultado dessas restrições produziu uma separação significativa entre os grupos S e L e os grupos D e S nas regiões espectrais do r' e i' (Figura 3.4). Para os grupos X e C a separação foi menor, mas as restrições ajudaram a definir melhor as

Grupo Tax.	Restrições	N	$\frac{N_{sem-ambiguidade}}{N_T}$
L	$F_i \geq 1.3$	9	17.6%
V	$F_z < F_i$	15	18.1%
S	$F_r < F_i$, $F_z \leq F_i$, $F_z < 1.5$, $1.2 < F_i < 1.6$ e $F_r < 1.05$	205	23%
D	$F_i \geq 1.2$, $F_z \geq 1.3$ e $F_z > F_i$	31	25.6%
X	$F_i \leq 1.25$ e $F_z \geq 1.05$	78	20.9%
C	$F_z < 1.2$ e $F_i < 1.2$	120	23%

Tabela 3.3: O número da amostra para cada grupo e as respectivas razões após aplicadas as restrições.

distribuições (figura 3.5).

Mesmo com as restrições impostas, as sobreposições continuam, mas como dito antes, isto é inerente. Seria necessário excluir mais da metade da amostra para que não houvesse sobreposição. O objetivo principal deste procedimento foi que as modas das distribuições não estivessem inseridas em outras distribuições em pelo menos duas bandas. Pois a diferenciabilidade entre os modelos deve ser a maior possível.

As modas são os máximos das distribuições. Elas definirão os valores de refletância mais frequentes que representarão os espectros característicos de cada grupo. Uma ressalva deve ser feita quanto à determinação da refletância da banda r' do grupo V. Devido ao pico duplo da distribuição nessa banda, a refletância da banda r' foi determinada através da média aritmética da

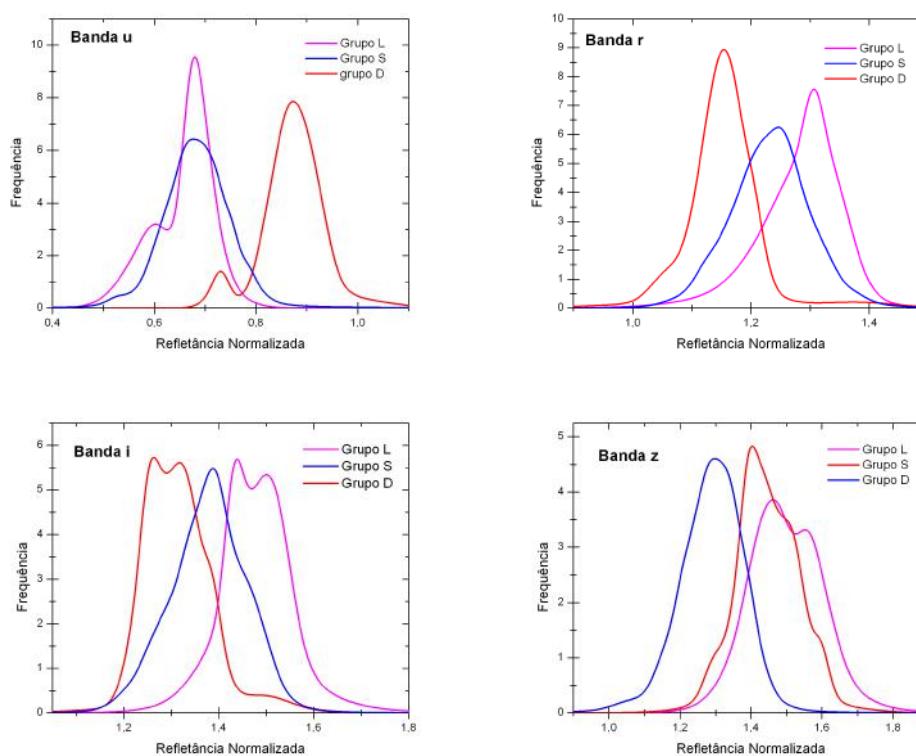


Figura 3.4: Distribuição de densidade de probabilidade para os grupos S, L e D no espaço das refletâncias para cada banda SDSS.

amostra. Os espectros característicos podem ser vistos na figura 3.6. Os pontos representam as modas das distribuições no espaço das refletâncias, e estão situados no valor central de comprimento de onda das bandas.

Por último, as distribuições de densidade resultantes definiram os intervalos de cada modelo em cada banda. Estes limites foram determinados por cada região no espaço das refletâncias que contivesse 90% de probabilidade das distribuições. As probabilidades foram calculadas integrando as distribuições até que completassem 90% de sua área total (que estava normalizada, logo era unitária). Os limites inferiores e superiores foram aqueles que englobassem essas áreas, e podem ser vistos na figura 3.7. Utilizou-se a regra dos trapézios repetidos como método de integração (*Burden and Faires, 2000*).

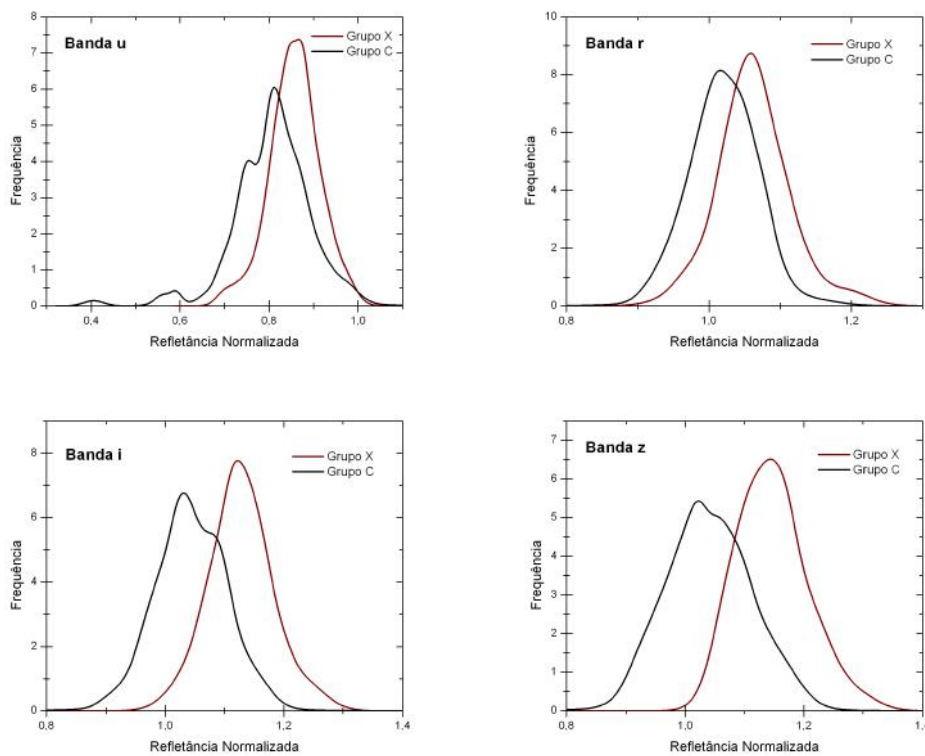


Figura 3.5: Distribuição de densidade de probabilidade para os grupos X e C.

3.3 CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA

Uma vez definidos os modelos que representam os grupos taxonômicos, a semelhança entre o espectro discreto da observação e os espectros característicos é parametrizada.

A classificação é feita analisando os parâmetros através de uma série de condições que decidirão por que uma observação pertence a um grupo e não a outro, ou se há mais de um, e quais são suas confianças. Mesmo que uma observação seja compatível a mais de um grupo, os parâmetros de similaridade dificilmente serão iguais. E, por isso, mostrarão a qual grupo a observação se assemelha mais, apesar das condições não distinguirem isso.

Classificações com maior confiabilidade mostram que a semelhança de uma observação em relação a um modelo é maior do que entre os outros. Para estas observações, um sinal diferencial foi adicionado à classificação.

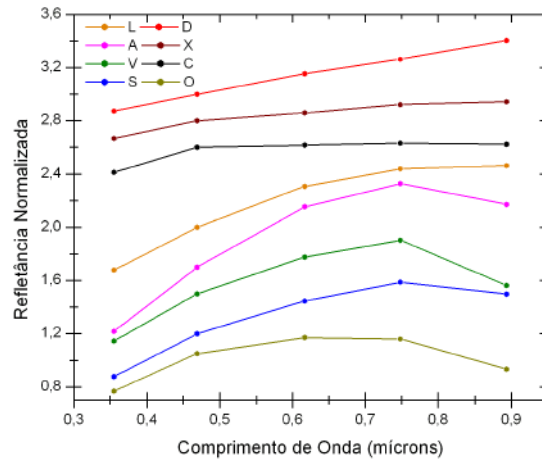


Figura 3.6: Espectros característicos dos grupos taxonômicos deslocados para uma melhor visualização.

3.3.1 PROCEDIMENTOS DE CLASSIFICAÇÃO

Uma observação pode ser compatível a mais de um grupo taxonômico devido às interseções dos limites dos modelos. Para verificar isso, calculou-se a distribuição de probabilidade no espaço das refletâncias para cada observação, em cada banda de passagem. Considerando que o erro seja gaussiano, as distribuições calculadas foram a normal, onde as médias eram os valores de refletância e o desvio padrão sendo a incerteza da medida de refletância. A probabilidade da refletância de uma observação encontrar-se dentro dos limites de um modelo, em uma banda qualquer, (chamemos de P_k , onde $k = \{u, g, r, i, z\}$) é dada pela área da distribuição de densidade presente naqueles limites (A figura 3.8 exemplifica o procedimento). E a probabilidade total (P_T) de que uma observação seja compatível a um grupo taxonômico é:

$$P_T = P_u \cdot P_g \cdot P_r \cdot P_i \cdot P_z = \prod_j^5 P_j .$$

Nota-se que a soma das probabilidades totais da observação em relação a cada grupo não será unitária, mais uma vez por causa das sobreposições entre os modelos.

A observação que possuir probabilidades totais acima de 8%, será reconhecida como compatível aos grupos que estas probabilidades representam. Essa condição foi escolhida por que é o valor probabilístico médio para que uma

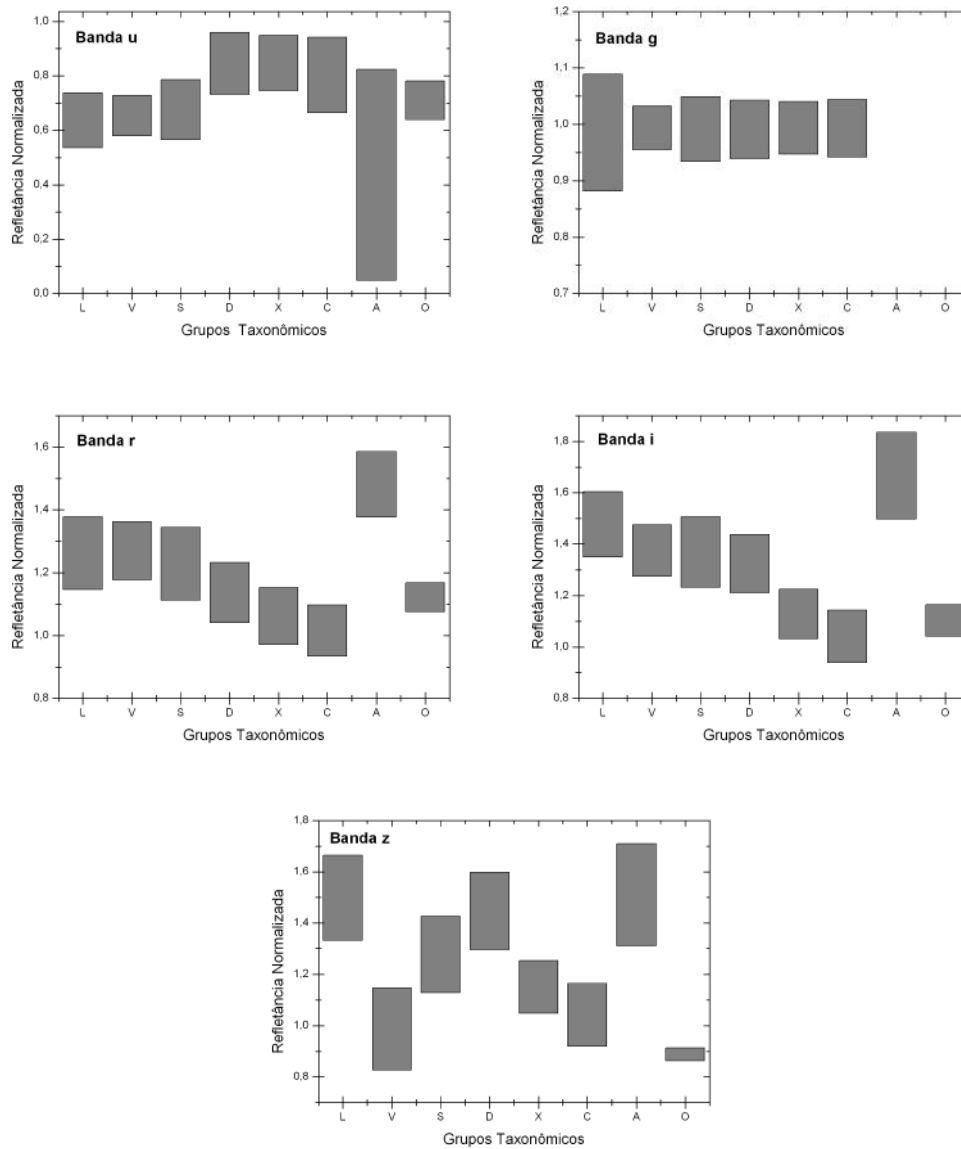


Figura 3.7: Os intervalos que definem os limites de cada grupo em cada banda SDSS.

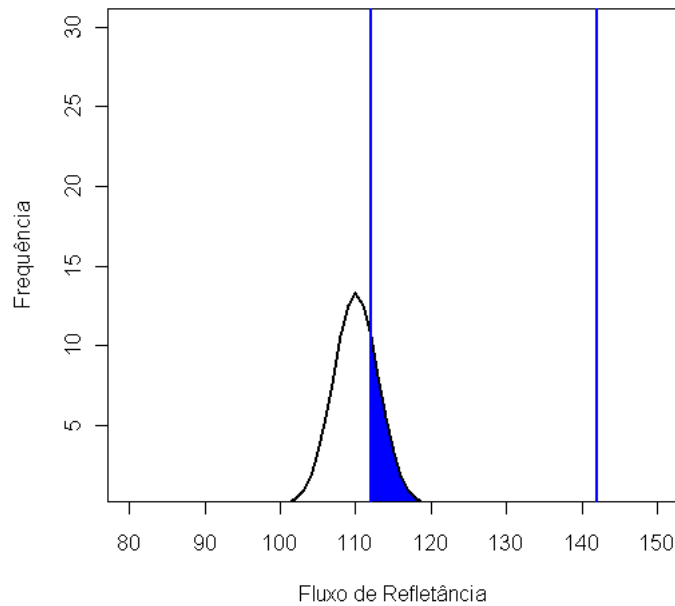


Figura 3.8: Exemplo do procedimento de cálculo da probabilidade relativa a uma região em uma banda qualquer. A probabilidade é dada pela área que intercede os limites.

observação possua 60% da área de suas distribuições dentro do limite de qualquer um dos modelos nas cinco bandas ($0.6^5 \simeq 0.08$). Qualquer observação abaixo deste valor foi desconsiderada.

A vantagem deste procedimento é que observações com altas incertezas em mais de uma banda terão distribuições de densidade mais espalhadas. E portanto com porções de sua área dentro do intervalo de mais de um grupo taxonômico. Isto tornará possível identificar observações mais problemáticas, pois elas serão classificadas como sendo contidas em múltiplos grupos, ou às vezes, nem sendo classificadas.

Designados os grupos aos quais uma observação é compatível, organizamo-los por ordem de similaridade. Para este propósito, o parâmetro de similaridade foi definido como distância euclidiana ponderada entre o modelo e a observação no espaço vetorial das bandas, de cinco dimensões. Este procedimento é baseado no método apresentado por *Gil-Hutton and Brunini (2008)*. E é descrito pela equação:

$$d_i^2 = \frac{\sum_k^n (R_{ik} - R_{0k})^2 (\sigma_{ik}^2 - \sigma_{0k}^2)^{-1}}{\sum_k^n (\sigma_{ik}^2 - \sigma_{0k}^2)^{-1}},$$

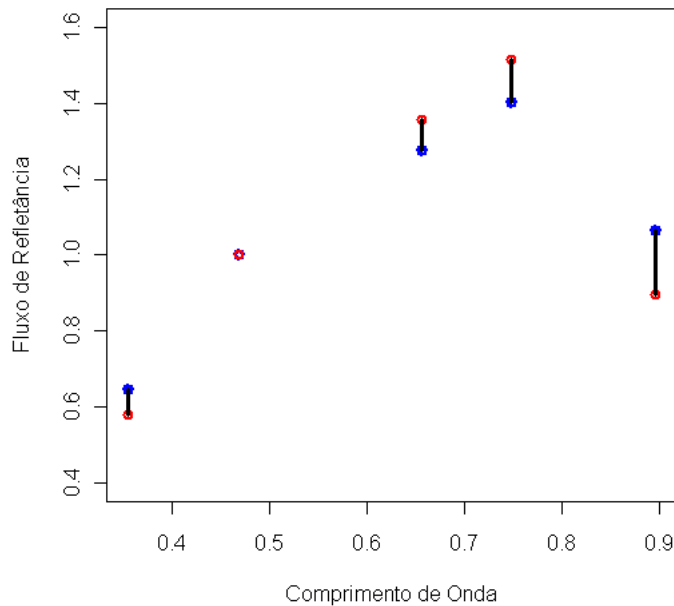


Figura 3.9: Exemplo que ilustra a diferença entre as refletâncias do modelo, em azul, e uma observação qualquer, em vermelho. A soma dessas diferenças ao quadrado representa o parâmetro de similaridade.

onde d_i é o resíduo entre i -ésima observação e um modelo, R_i e R_0 são as refletâncias da observação e do modelo, σ_i e σ_0 são as incertezas e k é o índice representativo do número n de bandas. No entanto, como $\sigma_0 < 10^{-3} \ll \sigma_i$, a incerteza do modelo pode ser desconsiderado da fórmula. d_i pode variar de zero a infinito, mas o máximo valor alcançado na nossa análise foi cerca de 6. A figura 3.9 ilustra como é calculada a distância euclidiana entre dois espectros discretos.

O parâmetro de similaridade (d_i) corresponde a taxa que a forma do espectro discreto da observação é semelhante à forma dos espectros característicos, onde um resíduo igual a zero significaria espectros perfeitamente semelhantes. Este é o principal parâmetro classificatório, que mostra a qual grupo uma observação realmente se assemelha. As probabilidades não funcionam para isto por que os intervalos dos modelos são geralmente muito largos. Por isso não preservam a informação sobre a semelhança entre as formas.

Além de todos os procedimentos anteriores, as relações entre refletância foram condicionadas para garantir que o espectro que fosse classificado a algum grupo

Grupo Taxonômico	Condições
L	$F_u < F_g < F_r < F_i$
V	$F_u < F_g < F_r < F_i$ e $F_i > F_z$
S	$F_u < F_g < F_r < F_i$ e $F_i > F_z$
D	$F_u < F_g < F_r < F_i < F_z$
X	$F_u < F_g$
C	-
A	$F_u < F_g < F_r < F_i$ e $F_i > F_z$
O	$F_i > F_z$

Tabela 3.4: Condições especiais para garantir que as observações possuem a forma espectral do grupo a que está sendo classificado.

possuisse a mesma forma do modelo. A tabela 3.4 mostra as condições para cada grupo.

3.3.2 CLASSIFICAÇÕES ESPECIAIS

Apenas reconhecer a compatibilidade dos elementos da amostra aos grupos taxonômicos não é o bastante para o que se pode fazer no procedimento de classificação. É preciso identificar também as observações que melhor se ajustam aos modelos. Logo, condições especiais foram definidas para separar esses elementos da amostra geral.

Para determinar um limite de semelhança, os parâmetros de similaridade foram calculados para toda a amostra do SDSS-MOC. Os parâmetros relativos ao grupo ao qual as observações fossem mais semelhantes (*i.e.*, os menores valores) foram selecionados para que sua distribuição de densidade (Figura 3.10) fosse calculada. O valor de resíduo superior que englobou 90% da área da distribuição definiu a primeira condição. Esse valor ficou em aproximadamente 2. Isto foi feito para garantir que nenhuma observação de baixa semelhança fosse classificada como especial.

A primeira condição foi que todas as observações “especiais” devem ter seu menor parâmetro menor que 2. A segunda condição, e mais representativa,

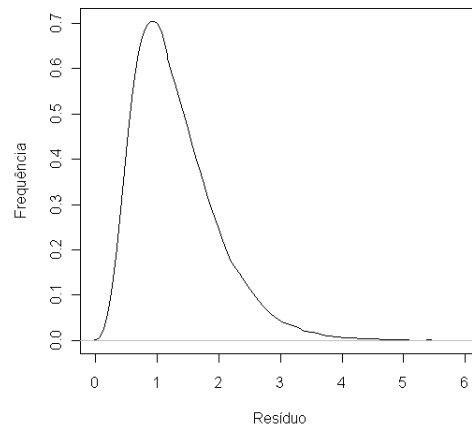


Figura 3.10: Distribuição de densidade de probabilidade dos menores parâmetros de similaridade.

identifica quais observações são mais compatíveis aos modelos. Ela determina que a probabilidade total deve ser maior que 0.6 ($\simeq 0.90^5$).

Uma observação que satisfaz ambas condições recebe a classificação especial, que é caracterizada por um asterisco (*) antes da classificação taxonômica.

3.3.3 TESTES

Dois testes foram criados para verificar a confiança das classificações pelo método. Isto foi feito classificando uma seleta amostra com objetos aos quais podemos saber ou inferir sua taxonomia espectrocópica, e então comparar o que é esperado com os resultados.

No primeiro teste, classificou-se as amostras do SDSS-MOC usadas para calcular os espectros característicos (descartou-se os grupos A e O). Espera-se que, por exemplo, as observações da amostra do grupo V sejam, em sua maioria, classificados como V, e assim por diante. Os resultados do teste são apresentados nos gráficos em colunas na figura 3.11.

A maioria das observações receberam classificações de acordo com sua taxonomia Tholen ou Bus. Entretanto, para o grupo X, a maioria recebeu classificação XC, provavelmente devido a sobreposição entre os modelos dos dois grupos. O mesmo motivo explica as classificações SL, LS e CX. Importante

resaltar a grande ocorrência de classificações especiais dentre todos os grupos, isto significa uma grande parte, cerca de 50%, das amostras é composta por observações de baixa incerteza. As discrepâncias de classificações foram causadas principalmente por observações com alta incerteza na banda z.

No segundo teste, aplicou-se a metodologia para famílias apenas uma taxonomia predominante e bem caracterizadas espectroscopicamente. O objetivo foi testar a compatibilidade das classificações e se existe alguma tendência ou ambiguidade frequente entre os modelos. As famílias escolhidas foram as de Vesta, Themis, Agnia, Dora, Padua e Minerva e as taxonomias predominantes são respectivamente V, C+B, Sq, Ch, X e S (*Mothé-Diniz et al., 2005*). Foram usadas nessa amostra as observações presente no SDSS-MOC de membros das famílias citadas acima. Os resultados são apresentados nos gráficos da figura 3.12.

O teste com as famílias apresentou resultados similares ao teste anterior e confirmou uma configuração de grupos taxonômicos similar aos dados espectroscópicos. A ambiguidade XC é muito presente, principalmente com a família de Padua, onde é maioria. As classificações discrepantes possuem duas explicações: podem ser devido a incertezas nas bandas ou possíveis intrusos nas famílias. Intrusos são asteróides que situam-se dentro dos limites dinâmicos de uma família, mas que possivelmente não tiveram sua origem da quebra do corpo progênitor.

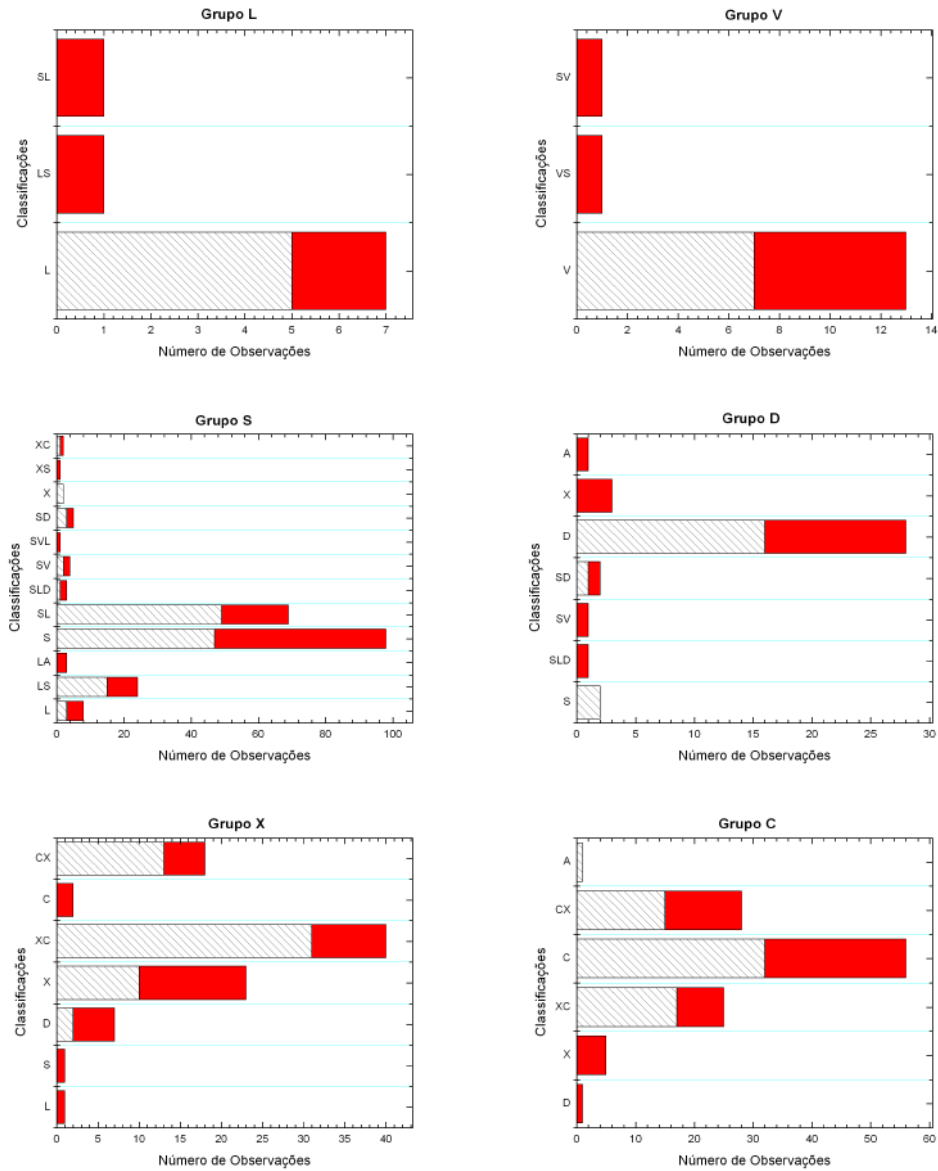


Figura 3.11: Gráficos com as contagens de classificações taxonômicas de cada amostra que foi usada para criar os espectros característicos. As colunas vermelhas, da base até o fim, representam o número total de observações com a classificação acentuada. E as colunas internas em branco e hachuradas, que sobrepõem as vermelhas, representam o número de observações com classificação especial.

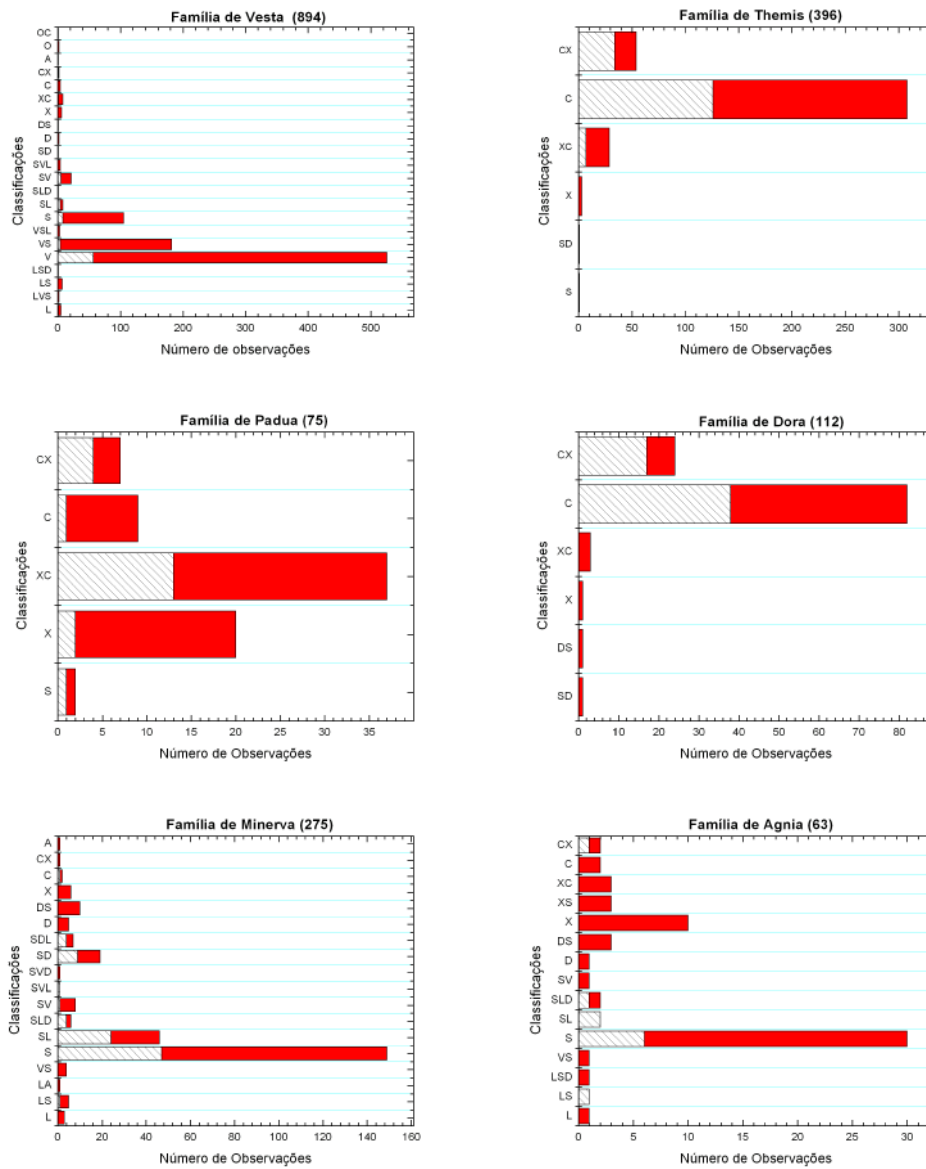


Figura 3.12: Gráficos com as contagens das classificações das observações de membros das famílias de selecionadas. O significado das cores das colunas é idem a da figura 3.11.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 APLICAÇÃO À AMOSTRA DO SDSS-MOC

Ao aplicar-se o método, 50%, ou 51.329 observações (relacionadas à 37.883 asteróides), da amostra total (seção 2.3) puderam ser classificadas. A maioria das observações desclassificadas possuíam altas incertezas na banda z, mas uma pequena parte parece não pertencer a nenhum grupo. O gráfico em colunas na figura 4.1 mostra os resultados.

O grupo S recebeu a maior parte das observações, cerca de 36%. A explicação pode ser devido ao maior número de observações de objetos do cinturão interno ou de asteróides menores possivelmente do tipo Q ou Sq. Este grupo também apresentou a maior taxa de sobreposição, principalmente entre os grupos D e L.

Os grupos A, L e O continuam mostrando serem bastante incomuns mesmo entre asteróides menores, especialmente o grupo O dos quais foram identificadas apenas 5 observações de 5 asteróides (34341, 20477, 3628, 2004_FE22), incluindo o 3628 Boznemcová, o único asteróide O observado pelo SMASS I.

Em relação ao grupo X, a ambiguidade XC mostrou-se mais abundante que a classificação X apenas. A mesma explicação da subseção 3.3.3 se aplica neste caso.

Deve ser notado que as classificações múltiplas não inviabilizam a determinação de qual grupo a observação pertence, que é definida pela primeira letra.

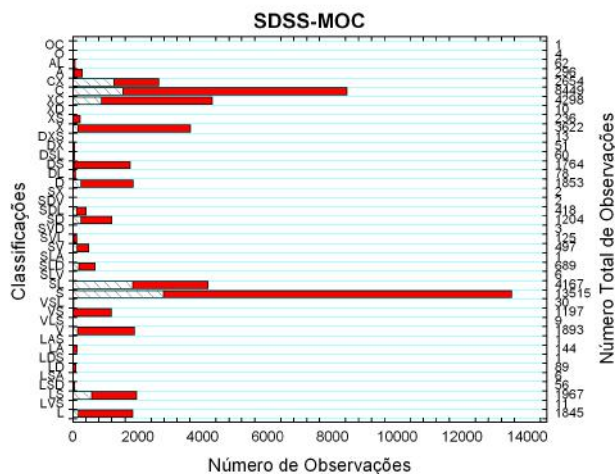


Figura 4.1: Distribuição de classificações para toda a amostra classificada do SDSS-MOC. Total de 51329 observações. O significado das cores das colunas é idem a da figura 3.11.

Muitas observações possuem classificações múltiplas e mesmo assim receberam um asterisco. Além disso, 61,3% das observações foram classificadas com apenas uma letra.

4.2 DISTRIBUIÇÃO DE GRUPOS NO CINTURÃO

Com a amostra do SDSS-MOC classificada, decidiu-se investigar a distribuição dos grupos taxonômicos no cinturão. Uma sub-amostra de asteróides com múltiplas observações pertencentes ao mesmo grupo e de asteróides com classificação especial foi selecionada para a análise. Foi escolhida essa condição para que fossem diminuídas as chances de asteróides com observações de baixa qualidade classificadas erroneamente fossem incluídas na análise. Esta sub-amostra foi composta por 9.884 asteróides, o que é um número maior do que a soma de todos os asteróides observados pelos grandes mapeamentos espectrocópicos.

As distribuições são dadas no espaço do seno da inclinação orbital próprio ($\sin(i_p)$) contra semi-eixo maior próprio (a_p).

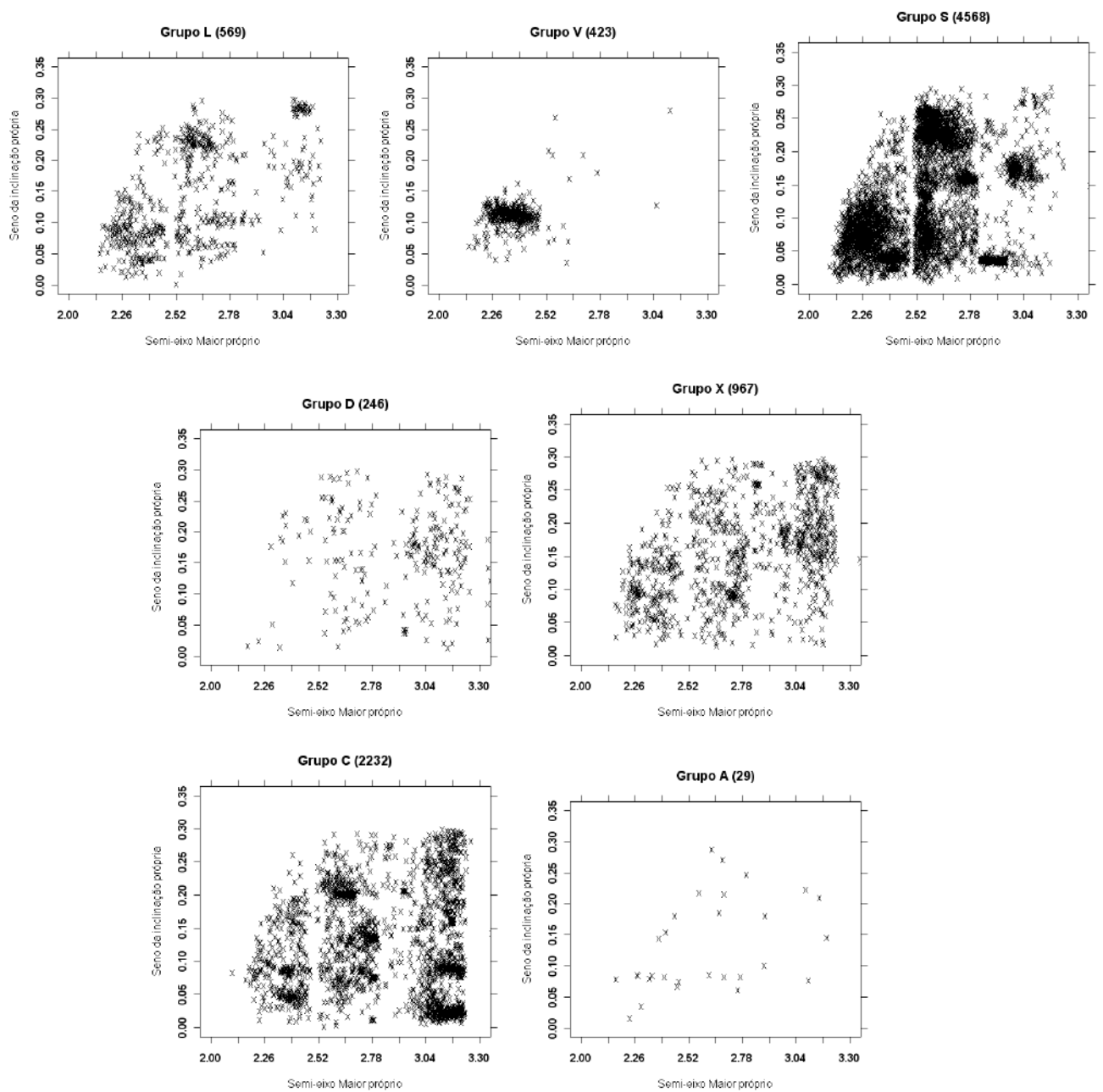


Figura 4.2: Distribuição de asteróides da sub-amostra no espaço do seno da inclinação orbital própria contra o semi-eixo maior próprio para cada grupo.

Analisando a figura 4.2 é possível perceber alguns agrupamentos relacionados as famílias de asteróides, isto é principalmente evidente nas distribuições dos grupo S e C. O grupo S são aparentemente mais abundantes nas regiões interna e intermediária, e o grupo D nas regiões intermediária e externa. As falhas de Kirkwood também são evidentes. Nenhum asteróide do grupo O foi encontrado na amostra.

Os resultados mais interessantes aparecem nas distribuições dos grupos V e A:

O grupo V aglomera-se no cinturão interno na região da única família tipo-V do cinturão, a do asteróide (4) Vesta. Entretanto é interessante perceber alguns asteróides próximos da região da ressonância 3:1, oito na região intermediária e dois asteróides na externa. Estes dois últimos (97502, 14562) não foram identificados pelo último trabalho em busca de candidatos do tipo-V no cinturão usando dados do SDSS-MOC (*Roig and Gil-Hutton, 2006*).

Apenas 9 asteróides do grupo A são identificados na sub-amostra, e nenhum tipo de aglomeração ou estrutura é discernível. No entanto é interessante encontrar 4 asteróides (29581, 59917, 114677, 126986) deste grupo na região externa, pois o tipo-A é relacionado aos meteoritos acondritos, que experimentaram um certo tipo de aquecimento.

4.3 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O método desenvolvido e aplicado ao dados do SDSS-MOC obteve resultados satisfatórios na classificação das observações de asteróides. A maioria das observações foram compatíveis a apenas um grupo taxonômico apesar das sobreposições entre os modelos. Os testes também mostraram que uma boa concordância entre a classificação taxonômica por este método e as produzidas a partir dados de grandes mapeamentos espectroscópicos e espectrofotométricos. Entretanto não foram satisfatórios os resultados relacionados ao grupo O, que obteve poucos asteróides identificados. Talvez fosse necessário dados em maiores magnitudes para encontrar mais objetos deste grupo.

Dentro das perspectivas futuras, espera-se aplicar esta metodologia extensivamente às famílias de asteróides e regiões específicas dentro do cinturão. E também trabalhar com a parte da amostra que não foi possível ser classificada para tentar encontrar algum tipo de padrão usando alguma técnica de análise multivariada, como o método das componentes principais.

Os resultados da aplicação ao SDSS-MOC apresentam apenas a contabilização das observações, e encontra-se em estado preliminar. O próximo passo seria selecionar, dentre as várias observações de um único asteróide, o grupo

taxonômico mais comum, e fazer uma estatística voltada para a contabilização individual de asteróides.

Por fim, um artigo científico está sendo finalizado para publicação.

Referências Bibliográficas

- Andronico, G., G. A. Baratta, F. Spinella, and G. Strazzulla (1987), Optical evolution of laboratory-produced organics - Applications to Phoebe, Iapetus, outer belt asteroids and cometary nuclei, *Astronomy and Astrophysics*, *184*, 333–336.
- Barucci, M. A., M. T. Capria, A. Coradini, and M. Fulchignoni (1987), Classification of asteroids using G-mode analysis, *Icarus*, *72*, 304–324, doi:10.1016/0019-1035(87)90177-1.
- Bell, J. F. (1988), A Probable Asteroidal Parent Body for the CV or CO Chondrites, *Meteoritics*, *23*, 256–257.
- Bell, J. F., P. D. Owensby, B. R. Hawke, and M. J. Gaffey (1988), The 52-Color Asteroid Survey: Final Results and Interpretation, in *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, vol. 19, pp. 57–+.
- Bell, J. F., D. R. Davis, W. K. Hartmann, and M. J. Gaffey (1989), Asteroids - The big picture, in *Asteroids II*, edited by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, pp. 921–945.
- Binzel, R. P., and S. Xu (1993), Chips off of asteroid 4 Vesta - Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites, *Science*, *260*, 186–191, doi:10.1126/science.260.5105.186.
- Binzel, R. P., S. Xu, S. J. Bus, M. F. Skrutskie, M. R. Meyer, P. Knezek, and E. S. Barker (1993), Discovery of a Main-Belt Asteroid Resembling Ordinary Chondrite Meteorites, *Science*, *262*, 1541–1543.
- Bowell, E., C. R. Chapman, J. C. Gradie, D. Morrison, and B. Zellner (1978), Taxonomy of asteroids, *Icarus*, *35*, 313–335, doi:10.1016/0019-1035(78)90085-4.
- Bowell, E., K. Muinonen, and J. Virtanen (2001), Applications of Statistical Ranging, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 33, pp. 1148–+.

- Burbine, T. H. (1994), Where are the olivine asteroids in the main belt?, *Meteoritics*, *29*, 453–+.
- Burden, R. L., and J. D. Faires (2000), *Numerical Analysis*, 7th ed., Brook/Cole, doi: ISBN0-534-38216-9.
- Bus, S. J. (1999), Compositional structure in the asteroid belt: Results of a spectroscopic survey, Ph.D. thesis, AA (Massachusetts Institute of Technology).
- Bus, S. J. (2007), Preliminary Search for Spectro-Dynamical Asteroid Families in the SDSS Moving Object Catalog, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 38, pp. 483–+.
- Bus, S. J., and R. P. Binzel (2002), Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey A Feature-Based Taxonomy, *Icarus*, *158*, 146–177, doi:10.1006/icar.2002.6856.
- Bus, S. J., F. Vilas, and M. A. Barucci (2002), Visible-Wavelength Spectroscopy of Asteroids, *Asteroids III*, pp. 169–182.
- Chapman, C. R. (1989), Structure of the asteroid belt: compositions, sizes, families., in *3. International Symposium on Asteroids, Comets, Meteors, Abstr. 26*, pp. 26–+.
- Chapman, C. R. (1996), S-Type Asteroids, Ordinary Chondrites, and Space Weathering: The Evidence from Galileo's Fly-bys of Gaspra and Ida, *Meteoritics and Planetary Science*, *31*, 699–725.
- Chapman, C. R., D. Morrison, and B. Zellner (1975), Surface properties of asteroids - A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry, *Icarus*, *25*, 104–130, doi:10.1016/0019-1035(75)90191-8.
- Cloutis, E. A., M. J. Gaffey, T. L. Jackowski, and K. L. Reed (1986), Calibrations of phase abundance, composition, and particle size distribution for olivine-orthopyroxene mixtures from reflectance spectra, *Journal of Geophysical Research*, *91*, 11,641–+, doi: 10.1029/JB091iB11p11641.
- Feierberg, M. A., H. P. Larson, and C. R. Chapman (1982), Spectroscopic evidence for undifferentiated S-type asteroids, *Astrophysical Journal*, *257*, 361–372, doi:10.1086/159995.
- Florczak, M. A. (1998), Asteróides: Um Estudo de Suas Propriedades Físico-Químicas, Ph.D. thesis, Observatório Nacional.
- Gil-Hutton, R., and A. Brunini (2008), Surface composition of Hilda asteroids from the analysis of the Sloan Digital Sky Survey colors, *Icarus*, *193*, 567–571, doi:10.1016/j.icarus.2007.08.026.

- Hirayama, K. (1918), Groups of asteroids probably of common origin, *Astrophysical Journal*, *31*, 185–188, doi:10.1086/104299.
- Howell, E. S., and L. A. Lebofsky (1991), Near-infrared observations of primitive asteroids and a possible extinct comet, in *Resources of Near-Earth Space*, pp. 15–+.
- Howell, E. S., E. Merenyi, and L. A. Lebofsky (1994), Classification of asteroid spectra using a neural network, *Journal of Geophysical Research*, *99*, 10,847–+, doi:10.1029/93JE03575.
- Ivezić, Z., M. Juric, R. H. Lupton, S. Tabachnik, and T. Quinn (2002), Asteroids Observed by The Sloan Digital Survey, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 4836, edited by J. A. Tyson and S. Wolff, pp. 98–103, doi:10.1117/12.457304.
- Ivezić, Ž., et al. (2001), Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data, *Astrophysical Journal*, *122*, 2749–2784, doi:10.1086/323452.
- Johnson, T. V., and F. P. Fanale (1973), Optical Properties of Carbonaceous Chondrites and Their Relationship to Asteroids, *Journal of Geophysical Research*, *78*, 8507–8518, doi:10.1029/JB078i035p08507.
- Jurić, M., Ž. Ivezić, and R. H. Lupton (2002), The Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog, in *Bulletin of the American Astronomical Society, Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 34, pp. 1172–+.
- Kitamura, M. (1959), Photoelectric Study of Colors of Asteroids and Meteorites, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, *11*, 79–+.
- Knežević, Z., and A. Milani (1999), Synthetic proper elements of asteroids., in *Bulletin of the American Astronomical Society, Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 31, pp. 1106–+.
- Larson, H. P., and U. Fink (1975), Infrared spectral observations of asteroid 4 Vesta, *Icarus*, *26*, 420–427, doi:10.1016/0019-1035(75)90109-8.
- Lazzaro, D., C. A. Angeli, J. M. Carvano, T. Mothé-Diniz, R. Duffard, and M. Florczak (2004), S^3OS^2 : the visible spectroscopic survey of 820 asteroids, *Icarus*, *172*, 179–220, doi:10.1016/j.icarus.2004.06.006.
- Lazzaro, D., et al. (2000), Discovery of a Basaltic Asteroid in the Outer Main Belt, *Science*, *288*, 2033–2035, doi:10.1126/science.288.5473.2033.

- McCord, T. B., J. B. Adams, and T. V. Johnson (1970), Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications, *Science*, *178*, 745–747.
- Milani, A., and Z. Knežević (1994), Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt, *Icarus*, *107*, 219–254, doi:10.1006/icar.1994.1020.
- Misra, A., and S. J. Bus (2008), Artificial Neural Network Classification of Asteroids in the Sloan Digital Sky Survey, in *Bulletin of the American Astronomical Society, Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 40, pp. 508–+.
- Mothé-Diniz, T., J. M. Á. Carvano, and D. Lazzaro (2003), Distribution of taxonomic classes in the main belt of asteroids, *Icarus*, *162*, 10–21, doi:10.1016/S0019-1035(02)00066-0.
- Mothé-Diniz, T., F. Roig, and J. M. Carvano (2005), Reanalysis of asteroid families structure through visible spectroscopy, *Icarus*, *174*, 54–80, doi:10.1016/j.icarus.2004.10.002.
- Mothé-Diniz, T., J. M. Carvano, S. J. Bus, R. Duffard, and T. H. Burbine (2008), Mineralogical analysis of the Eos family from near-infrared spectra, *Icarus*, *195*, 277–294, doi:10.1016/j.icarus.2007.12.005.
- Parker, A., Ž. Ivezić, M. Jurić, R. Lupton, M. D. Sekora, and A. Kowalski (2008), The size distributions of asteroid families in the SDSS Moving Object Catalog 4, *Icarus*, *198*, 138–155, doi:10.1016/j.icarus.2008.07.002.
- Parzen, E. (1962), On estimation of a probability density function and mode, *Ann. Math. Stat.*, *33*, 1065–1076.
- Pier, J. R., J. A. Munn, R. B. Hindsley, G. S. Hennessy, S. M. Kent, R. H. Lupton, and Ž. Ivezić (2003), Astrometric Calibration of the Sloan Digital Sky Survey, *Astrophysical Journal*, *125*, 1559–1579, doi:10.1086/346138.
- Pieters, C. M., and L. A. McFadden (1994), Meteorite and Asteroid Reflectance Spectroscopy: Clues to Early Solar System Processes, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *22*, 457–497, doi:10.1146/annurev.ea.22.050194.002325.
- Pravec, P., et al. (2008), Spin rate distribution of small asteroids, *Icarus*, *197*, 497–504, doi:10.1016/j.icarus.2008.05.012.
- Rivkin, A. S., E. S. Howell, D. T. Britt, L. A. Lebofsky, M. C. Nolan, and D. D. Branston (1995), Three-micron spectrometric survey of M- and E-class asteroids., *Icarus*, *117*, 90–100, doi:10.1006/icar.1995.1144.

- Roig, F., and R. Gil-Hutton (2006), Selecting candidate V-type asteroids from the analysis of the Sloan Digital Sky Survey colors, *Icarus*, *183*, 411–419, doi:10.1016/j.icarus.2006.04.002.
- Sunshine, J. M., C. M. Pieters, and S. F. Pratt (1990), Deconvolution of mineral absorption bands - An improved approach, *Journal of Geophysical Research*, *95*, 6955–6966, doi:10.1029/JB095iB05p06955.
- Szabó, G. M., Ž. Ivezić, M. Jurić, R. Lupton, and L. L. Kiss (2004), Colour variability of asteroids in the Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *348*, 987–998, doi:10.1111/j.1365-2966.2004.07426.x.
- Tedesco, E. F., J. G. Williams, D. L. Matson, G. J. Weeder, J. C. Gradie, and L. A. Lebofsky (1989), A three-parameter asteroid taxonomy, *Astrophysical Journal*, *97*, 580–606, doi:10.1086/115007.
- Tholen, D. J. (1984), Asteroid taxonomy from cluster analysis of Photometry, Ph.D. thesis, AA(Arizona Univ., Tucson).
- Wood, X. H. J., and G. P. Kuiper (1963), Photometric Studies of Asteroids., *Astrophysical Journal*, *137*, 1279–+, doi:10.1086/147603.
- Xu, S., R. P. Binzel, T. H. Burbine, and S. J. Bus (1995), Small main-belt asteroid spectroscopic survey: Initial results, *Icarus*, *115*, 1–35, doi:10.1006/icar.1995.1075.
- York, D. G., et al. (2000), The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary, *Astrophysical Journal*, *120*, 1579–1587, doi:10.1086/301513.
- Zellner, B., D. J. Tholen, and E. F. Tedesco (1985), The eight-color asteroid survey - Results for 589 minor planets, *Icarus*, *61*, 355–416, doi:10.1016/0019-1035(85)90133-2.