



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

M51-Finder: Um método automático para a busca de galáxias do Tipo-M51

Rogério Gomes Matias

Feira de Santana

2018



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

Rogério Gomes Matias

M51-Finder: Um método automático para a busca de galáxias do Tipo-M51

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Brescansin de Amôres

Feira de Santana

2018

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

Matias, Rogério Gomes

M38m M51-Finder: um método automático para a busca de galáxias do
Tipo-M51./Rogério Gomes Matias. – 2018.

81f.: il.

Orientador: Eduardo Brescansin de Amôres

Dissertação (mestrado) –Universidade Estadual de Feira de
Santana. Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2018.

1.Galáxias. 2. Levantamentos astronômicos. 3.Mineração de
dados. I.Amôres, Eduardo Brescansin de, orient. II.Universidade
Estadual de Feira de Santana. III.Título.

CDU: 004: 524.6

Rogério Gomes Matias

**M51-Finder: Um método automático para a busca de galáxias do
Tipo-M51**

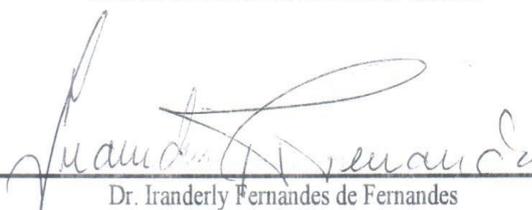
Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Feira de Santana como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Computação Aplicada.

Feira de Santana, 08 de agosto de 2018

BANCA EXAMINADORA



Dr. Eduardo Brescansin de Amôres (Orientador)
Universidade Estadual de Feira de Santana



Dr. Iranderly Fernandes de Fernandes
Universidade Estadual de Feira de Santana



Dra. Ana Carla Peixoto Bitencourt
Universidade Estadual de Feira de Santana

Abstract

In this work, it is presented an automatic tool (M51-Finder) to identify new M51-type galaxies, which are constituted by a main spiral galaxy and its companion, a galaxy with size at least 50% less than the main galaxy. The primary dataset is based on the catalogues of Arp & Madore (1987), Jokimäki et al. (2008) and HyperLeda. The M51-Finder's tool uses as its criteria to identify new M51-type galaxies, some of the ones established in the literature as well as the ones obtained in this Dissertation. The Method was applied for whole Southern Hemisphere for a sample approximately equal to one million of galaxies from HyperLeda database. It is obtained the identification of 53 new candidates of M51-type galaxies, which need further confirmation, for instance by spectroscopic observations. The relevance of this work can be highlighted comparing with the previous confirmed M51-type galaxies as well as its candidates which totalizes 232 and 435 M51-type galaxies, respectively.

Keywords: M51-type galaxies, pattern recognition, Large Astronomical Surveys.

Resumo

Na presente Dissertação foi elaborado um Método, o *M51-Finder*, para a identificação de forma automática de galáxias do Tipo-M51, ou Sistemas do Tipo-M51, os quais são formados por uma galáxia principal do tipo espiral e uma companheira, a qual deve ter um diâmetro inferior à 50% do diâmetro da galáxia principal. O conjunto de dados utilizado teve como base os catálogos de Arp & Madore (1987), Jokimäki et al. (2008) e HyperLeda. O *M51-Finder* utiliza alguns critérios estabelecidos na literatura para identificar Sistemas do Tipo-M51, assim como outros próprios derivados na Dissertação. O Método foi aplicado para todo o Hemisfério Sul para uma amostra de aproximadamente um milhão de galáxias. Foram identificados 53 novos candidatos a Sistemas do Tipo-M51, os quais podem ser confirmados em estudos posteriores, como por exemplo, espectroscópicos. A relevância de tal estudo deve ser ressaltada, tendo-se em vista que atualmente existem 232 Sistemas do Tipo-51 confirmados e outros 430 candidatos.

Palavras-chave: Galáxias do Tipo-M51, Reconhecimento de Padrões, Grandes Levantamentos Astronômicos, Mineração de dados.

Prefácio

Essa Dissertação de mestrado foi submetida a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada.

A Dissertação foi desenvolvida dentro do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PGCA) tendo como orientador o Dr. Eduardo Brescansin de Amôres.

Agradecimentos

Ao ilustre orientador professor Dr. Eduardo Brescansin de Amôres, por todas contribuições, orientações, atenção, cuidado e dedicação.

A banca examinadora, aos professores Dra. Ana Carla Peixoto Bitencourt, e o professor Dr. Iranderly Fernandes de Fernandes, pelas fundamentais contribuições nesta Dissertação.

Ao PGCA, por contribuir para minha formação acadêmica, a secretária e ao colegiado, especialmente ao Coordenador do Colegiado, professor Dr. Iranderly Fernandes de Fernandes, por toda atenção aos alunos do Curso.

A minha família, vocês são a razão por qual estudo. Ao meu Deus, por me conceder vida e saúde para a concretização deste trabalho.

This research has made use of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

This research has made use of the SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France, “The SIMBAD astronomical database”.

We acknowledge the usage of the HyperLeda database (<http://leda.univ-lyon1.fr>).

This research has made use of “Aladin sky atlas” developed at CDS, Strasbourg Observatory, France.

The Digitized Sky Surveys were produced at the Space Telescope Science Institute under U.S. Government grant NAG W-2166. The images of these surveys are based on photographic data obtained using the Oschin Schmidt Telescope on Palomar Mountain and the UK Schmidt Telescope. The plates were processed into the present compressed digital form with the permission of these institutions.

The National Geographic Society - Palomar Observatory Sky Atlas (POSS-I) was made by the California Institute of Technology with grants from the National Geographic Society.

The Second Palomar Observatory Sky Survey (POSS-II) was made by the California Institute of Technology with funds from the National Science Foundation, the

National Geographic Society, the Sloan Foundation, the Samuel Oschin Foundation, and the Eastman Kodak Corporation.

The Oschin Schmidt Telescope is operated by the California Institute of Technology and Palomar Observatory.

The UK Schmidt Telescope was operated by the Royal Observatory Edinburgh, with funding from the UK Science and Engineering Research Council (later the UK Particle Physics and Astronomy Research Council), until 1988 June, and thereafter by the Anglo-Australian Observatory. The blue plates of the southern Sky Atlas and its Equatorial Extension (together known as the SERC-J), as well as the Equatorial Red (ER), and the Second Epoch [red] Survey (SES) were all taken with the UK Schmidt.

A todos, Muito Obrigada.

Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Prefácio	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	vii
Lista de Abreviações	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	xii
1 Introdução	1
1.1 Classificação e identificação automática de galáxias	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Aspectos de originalidade	6
1.4 Organização da Dissertação	6
2 Revisão da literatura sobre galáxias	8
2.1 Galáxias e Morfologia	8
2.2 As galáxias peculiares	13
2.3 As galáxias do Tipo-M51	15
3 O Conjunto de dados	18
3.1 O Catálogo de Galáxias do Tipo-M51 e Associações (CGM51A)	18
3.2 Obtendo os dados do Catálogo CGM51A	26
3.3 O Catálogo HyperLeda	28
4 O Método para a identificação de Sistemas do Tipo-M51	34
4.1 Obtenção da distância mínima entre as galáxias de Sistemas do Tipo-M51	34

4.2	Os critérios para a identificação automática de Sistemas do Tipo-M51	39
4.3	Aplicação do Método para uma região de teste	40
4.3.1	Análise das propriedades dos dados para a região	40
4.3.2	Aplicação do Método	44
5	Discussão dos resultados	48
5.1	Aplicação do Método para o Hemisfério Sul	48
5.2	Análise das propriedades dos candidatos a Sistemas do Tipo-M51 . . .	52
6	Conclusão e Perspectivas	57
A	Propriedades do Catálogo CGM51A	60
	Referências Bibliográficas	63

Lista de Abreviações

Abreviação	Descrição
CDS	<i>Centre de Données Astronomiques de Strasbourg</i>
CGM51A	<i>A Catalogue of M51 type Galaxy Associations</i>
NED	<i>NASA/IPAC Extragalactic Database</i>
NGC	<i>New General Catalogue</i>
SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
SIMBAD	<i>Set of Identifications Measurements and Bibliography for Astronomical Data</i>
2MASS	<i>Two Microns All Sky Survey</i>
VVV	<i>VISTA Variables in the Via Láctea</i>

Lista de Tabelas

3.1	Distribuição da amostra de casos das galáxias catalogadas do CGM51A. Fonte: CGM51A.	23
3.2	Comparação entre antigos e novos Sistemas do Tipo-M51. Fonte: CGM51A.	25
3.3	Distribuição morfológica dos principais tipos de galáxias do Catálogo CGM51A. Fonte: CGM51A.	25
3.4	Contagem do número de braços das galáxias principais do Catálogo CGM51A. Fonte: CGM51A.	25
3.5	Parâmetros de alguns objetos astrofísicos do Catálogo HyperLeda e usados no presente trabalho.	29
3.6	Código numérico dos tipos morfológicos das galáxias do Catálogo HyperLeda com as suas respectivas descrições. Fonte: Catálogo HyperLeda.	30
5.1	Total de galáxias por tipo morfológico (galáxia principal).	53
5.2	Total de galáxias por tipo morfológico (galáxia companheira).	54
A.1	Descrição das tabelas do Catálogo CGM51A. Fonte: Catálogo CGM51A.	60

Lista de Figuras

1.1	Imagem em falsa cor de M51. Tamanho do campo de dois minutos de por dois minutos de arco. Fonte: <i>DSS</i>	2
2.1	Esquema de Hubble. Fonte: http://hendrix2.uoregon.edu/~imamura/123/lecture-3/lecture-3.html	9
2.2	Galáxias espirais normais do tipo Sa, Sb e Sc, respectivamente. Fonte: http://www.castlerock.wednet.edu/HS/stello/Astronomy/TEXT/CHAISSON/BG315/HTML/BG31501.hm	10
2.3	Galáxias espirais barradas do tipo <i>SBa</i> , <i>SBb</i> e <i>SBc</i> , respectivamente. Fonte: http://www.castlerock.wednet.edu/HS/stello/Astronomy/TEXT/CHAISSON/BG315/HTML/BG31501.hm	11
2.4	Galáxias irregulares, esquerda: Grande Nuvem de Magalhães, direita: NGC 6822. Fonte: http://www.astro.puc.cl/~pireact/Menanteau-PUC-Mar-07-lect1.pdf	12
2.5	Galáxia peculiar NGC 4038-4039. Fonte: http://hubblesite.org/image/1995/news_release/2006-46	13
2.6	Galáxia peculiar anelada do Tipo de Hoag. Fonte: Hubble Space Telescope/NASA/ESA	14
3.1	Galáxias classificadas como Sistemas do Tipo-M51 no Catálogo CGM51A.	20
3.2	Galáxias classificadas como possíveis Sistemas do Tipo-M51 no Catálogo CGM51A.	22
3.3	Galáxias rejeitadas do Catálogo CGM51A.	24
3.4	Distribuição em coordenadas equatoriais (J2000) da amostra usada no presente trabalho de galáxias do Tipo-M51 (cruzes azuis), possíveis candidatas (losangos em laranja) e rejeitadas (asteriscos em verde).	26
3.5	Query para obtenção dos dados no Catálogo HyperLeda.	28
3.6	Distribuição em Ascensão Reta (painel superior) e Declinação (painel inferior) das galáxias do Catálogo HyperLeda obtidas por meio da seleção de pesquisa indicada no texto.	31
3.7	Código do tipo morfológico do Catálogo HyperLeda (ver Tabela 3.6).	32
3.8	Distribuição do tamanho da galáxia, $\log d_{25}$, que representa o tamanho do eixo principal (ver Tabela 3.5).	33

3.9	Distribuição do tamanho da galáxia, $\log r_{25}$, que representa a razão dos comprimentos do maior para o menor eixo da galáxia (ver Tabela 3.5).	33
4.1	Distribuição em coordenadas equatoriais, em projeção aitoff dos 232 Sistemas do Tipo-M51 do Catálogo CGM51A.	35
4.2	Exemplos de imagens do <i>DSS</i> de alguns Sistemas do Tipo-M51 obtidos por meio do <i>Aladin</i>	36
4.3	Imagens em falsa cor no óptico do <i>DSS</i> de dois Sistemas do Tipo-M51 na qual as linhas vermelhas representam a distância entre a galáxia principal e a sua companheira. Os números são as respectivas distâncias em segundos de arco. Na imagem da direita é mostrado um exemplo da contaminação. No caso considera-se a distância para a galáxia companheira localizada na parte inferior da imagem que está à uma distância angular de 1.675'.	38
4.4	Distância angular em minutos de arco entre a galáxia principal e a sua companheira.	38
4.5	Distribuição em Ascensão Reta (painel superior) e Declinação (painel inferior) das galáxias do Catálogo Hyperleda obtidas por meio da seleção de pesquisa indicada no texto.	41
4.6	Código do tipo morfológico do Catálogo Hyperleda (ver Tabela 3.6).	42
4.7	Distribuição do tamanho da galáxia, $\log d_{25}$ (ver Tabela 3.5).	42
4.8	Distribuição do tamanho da galáxia, $\log r_{25}$, que representa a razão dos comprimentos do maior para o menor eixo da galáxia.	43
4.9	Distribuição das 268 candidatas a galáxias do Tipo-M51 obtidas pelo método.	44
4.10	Candidatos a possíveis Sistemas do Tipo-M51 obtidos pelo Método.	45
4.11	Galáxias rejeitadas pelo método. Imagens do <i>DSS</i>	46
4.12	Galáxias rejeitadas pelo método. Imagens do <i>DSS</i>	47
5.1	Distribuição das 819 candidatas à galáxias do Tipo-M51 obtidas pelo método sem a inspeção visual.	49
5.2	Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do <i>DSS</i>	49
5.3	Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do <i>DSS</i>	50
5.4	Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do <i>DSS</i>	51
5.5	Distribuição dos tipos morfológicos dos 1087 candidatos a Sistemas do Tipo-M51 sem inspeção visual.	52
5.6	Distribuição em coordenadas equatoriais dos 53 candidatos a Sistemas do Tipo-M51.	53
5.7	Relação entre o tipo morfológico da galáxia principal e o de sua companheira.	54

5.8 Razão entre o tamanho da galáxias principal e de sua companheira. . 55

Capítulo 1

Introdução

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

– Albert Einstein

O Universo é a base fundamental da Astronomia, que contém um imenso número de objetos a serem observados, descobertos e catalogados, além dos já observados e analisados. Historicamente, o homem sempre foi fascinado por descobertas, desvendando enigmas e relacionar fenômenos, solucionar problemas, foi continuamente o combustível que impulsionou a humanidade, a intuir e a inferir sobre a origem e destino desde os tempos mais remotos.

O Universo sempre foi o grande laboratório para as vastas descobertas da Astronomia, e estudar a distribuição de objetos se faz necessária para compreender também a estrutura de um dos seus principais objetos que são as galáxias.

Existe na Astronomia um grande volume de dados provenientes de observações de grandes áreas do céu, em vários comprimentos de onda, quer seja, no formato de catálogos ou de imagens. Apesar de inúmeros trabalhos terem sido feitos com esses dados, ainda existe uma grande possibilidade para o estudo de determinados tipos de objetos, assim como da separação entre estrelas e galáxias, como por exemplo, o realizado por Amôres et al. (2012) tendo como base, o grande levantamento *VISTA Variables in the Via Láctea (VVV)*.

Por outro lado, a classificação e identificação de galáxias é um tema bastante amplo na Astronomia, e cresceu de forma significativa nas últimas décadas (ver a próxima seção), devido principalmente aos avanços tecnológicos em instrumentos que obtêm imagens de vastas regiões do céu, em diversos comprimentos de onda, e também ao grau de sofisticação de softwares que manipulam tais imagens.

Há vários critérios, parâmetros e esquemas de classificação de galáxias e estruturas, dos quais elas podem formar por meio de interação com outras galáxias e/ou objetos, que os grandes astrônomos como Hubble, Morgan, Van den Bergh, entre outros, fizeram uso para classificar as galáxias de acordo com as suas características.

Tal classificação, de maneira geral, vai desde a forma estrutural até a concentração de luminosidade dessas galáxias. A obtenção de informações sobre o seu surgimento, formação ou processo evolutivo, está associada diretamente ao tipo de galáxia, ou seja, a estrutura morfológica que elas possuem atualmente, ou para quais formas as mesmas evoluíram ou evoluirão.

Há uma pequena porcentagem de galáxias, que apresentam uma forma muito rara e exótica, que não se encaixa no esquema de classificação de Hubble (ver Capítulo 2), essas galáxias são denominadas de galáxias peculiares. Devido à sua forma peculiar, acredita-se que tais galáxias foram originadas das interações entre galáxias, entre outras possibilidades.

Particularmente, as galáxias peculiares são objetos relativamente pouco estudados, sendo que o principal catálogo, consiste no *Atlas of Peculiar Galaxies* (Arp 1966), *Catalogue of Southern Peculiar Galaxies e Associations* (Arp & Madore 1987, daqui por diante AM87).

Na presente Dissertação, o principal objeto de estudo são os sistemas de galáxias peculiares do Tipo-M51 que correspondem à Categoria 9 do Catálogo AM87, e representam aproximadamente 2% do total de galáxias peculiares. As galáxias do Tipo-M51, possuem essa denominação devido ao astrônomo Charles Messier que catalogou mais de 100 objetos com aspecto nebuloso, dentre os quais, a galáxia M51.



Figura 1.1: Imagem em falsa cor de M51. Tamanho do campo de dois minutos de por dois minutos de arco. Fonte: *DSS*.

A característica principal desse tipo de sistema, consiste em uma galáxia principal com formato espiral e uma galáxia companheira de tamanho inferior (com tamanho 50% inferior) à principal, localizada predominantemente na extremidade de um dos braços espirais da galáxia principal. A galáxia companheira pode ser uma galáxia com uma estrutura regular ou irregular. Devido à essa característica de possuírem uma galáxia companheira, que também podemos chamar de Sistemas do Tipo-M51, ou galáxias do Tipo-M51.

Tendo como base os trabalhos desenvolvidos por AM87, Arp (1966), Vorontsov & Velyaminov (1959), Vorontsov & Velyaminov (1977) e Klimanov & Reshetnikov (2001) foi elaborado o *Catálogo de Galáxias do Tipo-M51 e Associações*, daqui por diante, Catálogo CGM51A elaborado por Jokimäki et al. (2008).

Na compilação desse trabalho, várias das galáxias catalogadas por AM87 foram rejeitadas, tendo em vista verificações mais cuidadosas e detalhadas. Dentre as razões para a rejeição desses sistemas (maiores detalhes serão vistos no Capítulo 3) pode-se destacar:

1. o fato da galáxia principal não ser uma galáxia espiral;
2. algumas das galáxias companheiras não serem uma galáxia, mas uma estrela, provavelmente um objeto de *foreground*, ou seja, um objeto de primeiro plano;
3. a galáxia companheira não estar localizada exatamente na extremidade do braço espiral da galáxia principal.

As análises estatísticas feitas para essa classe de galáxias nos catálogos de AM87 e Jokimäki et al. (2008) apresentam uma quantidade de galáxias, com uma regularidade em suas estruturas como a posição dos braços, seus *pitch angles* (ou ângulos de inclinação) e ao tipo de galáxias companheiras que são localizadas nas extremidades dos braços da galáxia principal.

As galáxias analisadas por Jokimäki et al. (2008) foram divididas de maneira a extrair informações, a partir dos seus aspectos morfológicos, pautados em critérios bem estabelecidos para as galáxias do Tipo-M51 (Seção 3.1). A análise de Sistemas candidatos ao Tipo-M51, também possibilita compreender o processo de interação gravitacional no sistema, devido à interação entre a galáxia principal, e a sua companheira que podem evoluir para um autêntico Sistema do Tipo-M51.

1.1 Classificação e identificação automática de galáxias

A classificação de galáxias tem como base principal os seus aspectos morfológicos. Os métodos de categorização de galáxias são feitos convencionalmente, por astrónomos por meio de uma análise visual, assim como métodos automáticos, que catalogam os seus diversos tipos em relação às suas principais características e forma.

Peng et al. (2002) elaboraram um algoritmo *GALFIT* para analisar imagens de galáxias em duas dimensões observadas pelo Telescópio Espacial Hubble. Segundo os autores, esse algoritmo é um aprimoramento de técnicas anteriores; ocorrido devido ao processo de otimização computacional para a análise de galáxias. Banerji et al. (2010) apresentaram um algoritmo de classificação, baseado no uso de redes neurais para milhares de imagens, anteriormente classificadas de forma manual do Grande Levantamento Astronômico *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)*.

Shamir et al. (2013) apresentam uma análise morfológica por meio do algoritmo *WndChrm*, que classifica de forma quantitativa a morfologias de galáxias em fusão com um número elevado de imagens. Os esforços no treinamento de máquinas e no desenvolvimento de algoritmos, para otimizar o processo de classificação morfológica das galáxias são feitos usando a base de dados do *Galaxy Zoo*, a qual é um exemplo de projeto de cidadão envolvido na ciência (Kuminski et al., 2014).

Shamir & Wallin (2014) apresentaram uma ferramenta que automatiza o processo de classificação de sistemas de galáxias peculiares, seguido de um algoritmo não supervisionado, *Chloe*, com a proposta de detecta a peculiaridade em um conjunto de galáxias.

Os métodos desenvolvidos por Schutter & Shamir (2015) de classificação automática analisam as semelhanças morfológicas de um grande número de galáxias sem supervisão, dispensando os métodos manuais.

Em estudos posteriores, com o *Galaxy Zoo2*, Kuminski & Shamir (2015) concluíram que apesar do método apresentar um bom rendimento, ele acaba desprezando algumas características morfológicas das galáxias, como por exemplo os números de braços.

Os últimos avanços mostram como o processo de classificação morfológica tem se automatizado, a maneira de desenvolver uma categorização de objetos em alto nível. Segundo Dieleman et al. (2015) em seu modelo de rede neural de classificação, que filtra de maneira apropriada um grande volume de imagens a um elevado nível de confiança, minimizando os esforços dos especialistas na compilação dos catálogos.

Por sua vez, o Grupo de Astrofísica de Grandes Levantamentos da UEFS, cujo Coordenador é o orientador da presente Dissertação, tem desenvolvido trabalho na identificação automática de galáxias peculiares.

Tendo como base o uso do *WndChrm*, Cerqueira (2016) elaborou um método para a identificação automática de galáxias interagentes usando os dados no infravermelho próximo do *Two Microns All Sky Survey* (2MASS). O autor encontrou aproximadamente 1500 pares (Cerqueira et al., 2018, em preparação) de galáxias interagentes das categorias 1 e 2 de AM87.

Em outro trabalho, Santos et al. (2018, em preparação) abordam um método para a identificação automática de galáxias peculiares, tendo como base o uso de uma Rede Neural Artificial (RNA).

Além dos trabalhos de identificação de galáxias peculiares, pesquisa vem sendo desenvolvida, na tentativa de identificação de galáxias em campos com alto povoamento de estrelas no Levantamento VVV (Amôres et al., 2018, em preparação).

1.2 Objetivos

O objetivo principal da Dissertação é o desenvolvimento de um método automático, para a identificação de novos Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Os objetivos específicos são descritos a seguir.

Objetivos específicos:

- O manuseio e a obtenção de imagens astronômicas;
- a ampliação do estudo das propriedades conhecidas dos Sistemas do Tipo-M51;
- a obtenção e a manipulação de grande volume de dados em Astrofísica.

1.3 Aspectos de originalidade

Apesar dos Sistemas do Tipo-M51 representarem apenas 2% das galáxias do Catálogo de AM87, novas identificações desses sistemas são extremamente importantes, para a compreensão da formação e evolução de galáxias espirais, entre outros aspectos.

A amostra de novos sistemas pode, por exemplo, ser usada em simulações astrofísicas, que visam reproduzir a evolução desses pares de galáxias interagentes. Esses sistemas fornecem características que ainda podem ser melhores estudadas, tais como a quantidade de braços de uma galáxia espiral, a morfologia das galáxias companheiras e a sua interação com a galáxia principal.

Jokimäki et al. (2008) incluíram em sua análise novos Sistemas do Tipo-M51, tendo como base artigos individuais que identificaram tais sistemas, em estudos específicos sobre esses objetos, e não em um estudo em grande escala, tendo como base dados gerais de qualquer tipo de galáxia. Pretende-se realizar no presente trabalho, ou seja, partindo de dados de grandes levantamentos astronômicos realizar a identificação de sistemas de galáxias interagentes, do Tipo-M51.

Além de ser computacionalmente custoso, o uso de imagens para toda essa região, torna extremamente complexa a sua análise, tendo em vista que esse sistema de galáxias, tem uma ocorrência muito menor do que outros tipos de galáxias do Esquema de Hubble, e mesmo de galáxias peculiares como um todo, conforme discutido anteriormente, essa categoria de galáxias representa 2% do conjunto de galáxias peculiares.

Para tal, será feito uso dos dados do Catálogo Hyperleda de galáxias, com uma amostra de aproximadamente um milhão de galáxias, por meio de técnicas de mineração de dados e reconhecimento de padrões. O método desenvolvido poderá ser aplicado, em qualquer outra base de dados de grandes levantamentos que tenham as propriedades necessárias (ver Capítulo 3).

1.4 Organização da Dissertação

A Dissertação está dividida em seis capítulos. O Capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica sobre aspectos gerais de galáxias, galáxias peculiares, assim como os Sistemas do Tipo-M51, que são conforme mencionado anteriormente, um tipo particular de galáxias peculiares. O Capítulo 3 apresenta os aspectos gerais do Catálogo de Jokimäki et al. (2008), o qual é o principal, e o mais atualizado catálogo de Sistemas do Tipo-M51 disponível. Nesse capítulo também é apresentada, a forma como foi realizada a leitura desse catálogo, bem como foram obtidos os dados para os quais foi efetuada a mineração de dados, com o intuito de identificar Sistemas do Tipo-M51. O Capítulo 4 apresenta o método elaborado e utilizado para identificar os referidos

sistemas. O Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as Considerações Finais e as Perspectivas da Dissertação.

Capítulo 2

Revisão da literatura sobre galáxias

O presente capítulo faz uma revisão sobre galáxias, as suas principais propriedades e características, assim como de galáxias peculiares. Esse tipo de galáxia representa uma pequena fração da quantidade total de galáxias existentes, algo em torno de 0.01% (Nahim & Lahav, 1997). Por sua vez, os Sistemas do Tipo-M51 representam uma categoria de galáxias peculiares, e também terão os trabalhos principais sobre o tema apresentados na Revisão da Literatura.

2.1 Galáxias e Morfologia

O nome galáxia tem origem no grego *galaktikos*, que significa branco leitoso, daí a origem do nome de nossa Galáxia¹, a Via Láctea. A principal composição das galáxias são estrelas, gás, poeira e matéria escura (Robin et al., 2003; Robin et al., 2012; Robin et al., 2014), entre outros.

Em seus estudos, os astrônomos do século XVIII identificaram a presença de vários objetos distintos, alguns classificados de nebulosas, nome esse dado, justamente pelo comportamento difuso que apresentavam. Entretanto, apenas no século XX, esses objetos foram distinguidos de objetos com aspecto nebuloso, que estão em nossa Galáxia, dos de fato, galáxias que obviamente não estão dentro de nossa Galáxia (Oliveira & Saraiva, 2014).

A visão errônea até essa época deveu-se às limitações em instrumentos utilizados pelos astrônomos, e ao pouco conhecimento sobre os pontos em questão. Uma classificação mais precisa e bastante simples foi desenvolvida em 1923 por Edwin

¹Por convenção escrevemos a palavra galáxia com *G* maiúsculo para nos referir à nossa Galáxia, distinguindo dessa forma de outras galáxias.

Powell Hubble (1889 - 1953), que classificou diversos objetos de acordo com a sua aparência, levando em conta os seus aspectos morfológicos.

A Figura 2.1 apresenta o Esquema de Hubble, que classifica as galáxias em três grupos principais: galáxias elípticas, espirais com ou sem barras, e irregulares que são galáxias sem uma forma definida. Esse esquema proposto por Hubble não é uma sequência evolutiva, no processo de formação das galáxias, como chegou a ser proposto pelo próprio inicialmente, mas uma forma estruturada de classificar as galáxias morfológicamente.

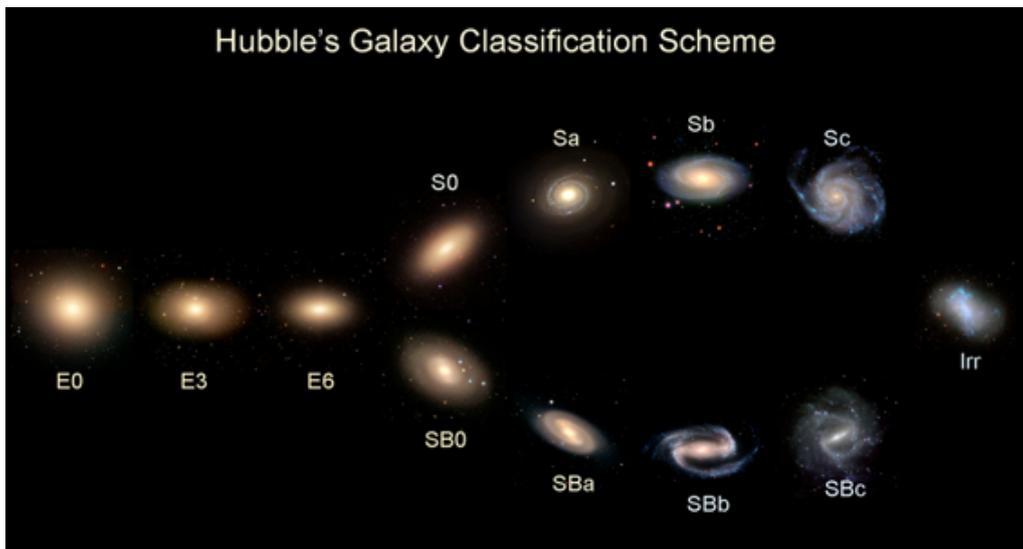


Figura 2.1: Esquema de Hubble. Fonte: <http://hendrix2.uoregon.edu/~imamura/123/lecture-3/lecture-3.html>

As galáxias elípticas possuem diversos tamanhos, e um formato semelhante à uma elipsoide sem nenhum braço. Tais galáxias foram subdivididas por Hubble em outros pequenos grupos em relação ao grau de deformação de uma esfera, variando de E_0 a E_7 , sendo definido por meio da fórmula do produto entre 10 e a razão da diferença entre os semieixos, maior (a) e menor (b), sobre o semieixo maior (a), conforme apresentado na Equação 2.1:

$$E = 10\left(\frac{a-b}{a}\right) \quad (2.1)$$

A abordagem realizada sobre o Esquema de Hubble, no atual parágrafo e no posterior, é uma adaptação do conteúdo de Oliveira & Saraiva (2014). O esquema elaborado por Hubble apresenta uma bifurcação nas classificações das galáxias, as

espirais normais (S) (Figura 2.2), galáxias com braços partindo do núcleo esférico e as espirais barradas (SB) (Figura 2.3), galáxias que apresentam uma barra que atravessa o núcleo com braços partindo de suas extremidades.

As galáxias espirais são classificadas como Sa , Sb e Sc , da mesma forma que as espirais barradas (SB) também são, SBa , SBb e SBc , essas subdivisões levam em consideração o tamanho do núcleo e envolvimento dos seus braços.

As galáxias espirais são visivelmente reconhecidas pela sua estrutura em formato espiral, apresentando uma estrutura com núcleo, discos, halos, braços e algumas, com uma barra. A nossa Galáxia é uma típica espiral, que possui disco, bojo, barra, halo e provavelmente quatro braços espirais (Lépine et al. 2001; Amôres & Lépine, 2005; entre outros), e portanto, classificada como uma galáxia espiral barrada do tipo SBb (Amôres et al., 2013; entre outros).

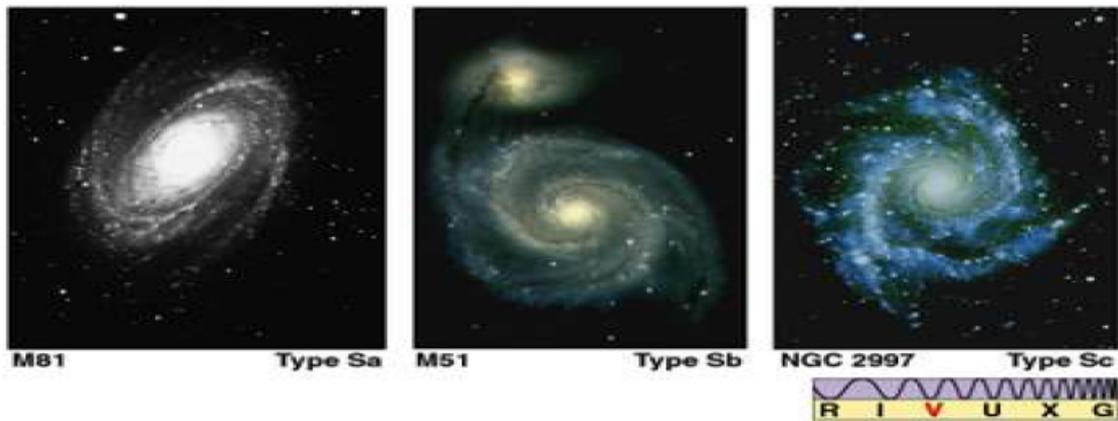


Figura 2.2: Galáxias espirais normais do tipo Sa , Sb e Sc , respectivamente. Fonte: <http://www.castlerock.wednet.edu/HS/stello/Astronomy/TEXT/CHAISSON/BG315/HTML/BG31501.hm>

As galáxias Sa ou SBa têm a característica de apresentarem braços menores e mais definidos, e um núcleo grande. As galáxias Sc e SBc apresentam braços maiores e mais abertos e um núcleo pequeno, já as galáxias Sb e SBb apresentam um formato intermediário quanto ao “desenrolar” dos braços e o tamanho do núcleo.

Para as galáxias espirais existem ainda as que apesar de não apresentarem braços, são classificadas também como espirais, devido à presença de um disco e um núcleo. Porém, elas recebem um nome especial, as galáxias lenticulares, sendo representadas por $S0$ ou $SB0$.

As galáxias irregulares (Figura 2.4) são um tipo de galáxia, que não apresentam qualquer simetria circular, ou ainda uma simetria rotacional. A estrutura dessas galáxias não é bem definida, sendo que exemplos bem representativos são as Nuvens de Magalhães. A Figura 2.4 apresenta dois exemplos de galáxias irregulares.

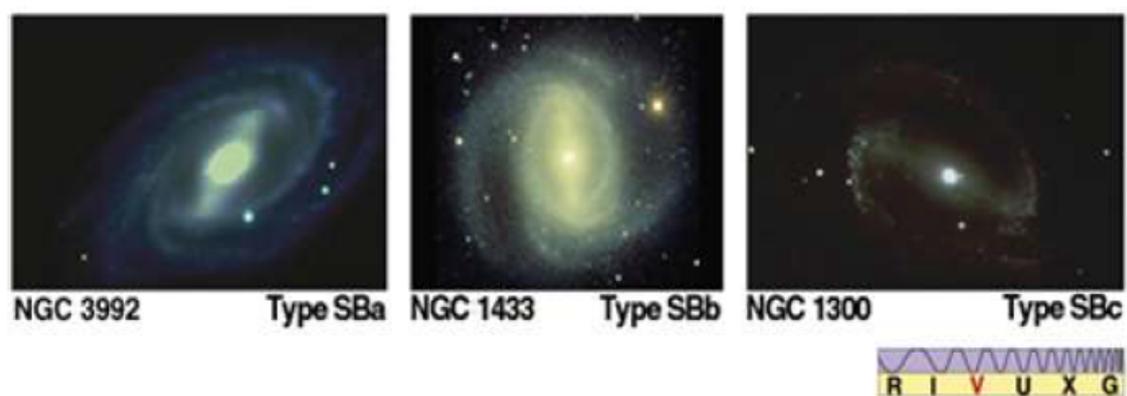


Figura 2.3: Galáxias espirais barradas do tipo *SBa*, *SBb* e *SBc*, respectivamente. Fonte: <http://www.castlerock.wednet.edu/HS/stello/Astronomy/TEXT/CHAISSON/BG315/HTML/BG31501.hm>

Figura 2.4: Galáxias irregulares, esquerda: Grande Nuvem de Magalhães, direita: NGC 6822. Fonte: <http://www.astro.puc.cl/~pireact/Menanteau-PUC-Mar-07-lect1.pdf>

2.2 As galáxias peculiares

Existem diversas formas de interações entre galáxias, uma delas é o que chama-se de canibalismo galáctico, ou seja, quando um sistema binário de galáxias relativamente próximas uma da outra, de modo que uma das galáxias tenha dimensões muito maiores do que outra, e araste a galáxia de menor dimensão, absorvendo-a por meio do efeito de maré gravitacional (Oliveira & Saraiva, 2014).

Um outro caso de interação consiste na fusão de um par de galáxias, com duas galáxias de dimensões semelhantes, em que a maré gravitacional de ambas arrasta matéria uma da outra até se fundirem. Casteels et al. (2012) classificam esses sistemas como instáveis, devido ao fato da atração gravitacional de ambas, o que ocasiona grandes distúrbios, produzindo uma outra galáxia, de outro tipo morfológico. A Figura 2.5 apresenta a galáxia de Antena, e mostra o resultado das duas galáxias espirais após a sua colisão.

Por outro lado, não existe uma classificação para esses tipos de galáxias dentro do Esquema de Hubble. Segundo Naim & Lahav (1997) não existe uma concordância geral, entre os especialistas, sobre a definição mais aceita para galáxias peculiares, ou seja, não existe um conjunto de características morfológicas que possam ser identificadas.



Figura 2.5: Galáxia peculiar NGC 4038-4039.
http://hubblesite.org/image/1995/news_release/2006-46

Fonte:

Entretanto, partindo de um referencial de classificação quantitativo, como assimetria em 180° e ângulos dependentes, Naim & Lahav (1997) fizeram uma análise do

Catálogo de AM87, chegando à definição de dois tipos de classificações peculiares, as “leves” que são desvios dos padrões normais e as peculiares “fortes”, que se diferenciam pelas grandes perturbações na estrutura geral das galáxias, de tal forma que a classificação normal de Hubble torna-se inconclusiva.

Dessa forma, apenas uma pequena parcela das galáxias não podem ser classificadas segundo o Esquema de Hubble, pois apresentam características peculiares, a exemplo de galáxias que apresentam um núcleo ativo como as Seyferts. Estima-se, também que aproximadamente 1% das galáxias em formato espiral são Seyfert (Oliveira & Saraiva, 2014), ou seja, 1% das galáxias espirais apresentam alguma peculiaridade.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de uma galáxia peculiar, essas galáxias podem surgir a partir da colisão de galáxias com uma certa velocidade moderada (Toomre & Toomre, 1972; Toomre, 1974). Por outro lado, o Objeto de Hoag é um exemplo de galáxia peculiar em forma de um anel, ou seja, uma galáxia anelada, porém não sabe-se se seu formato originou-se de colisões, devido ao núcleo vazio.



Figura 2.6: Galáxia peculiar anelada do Tipo de Hoag. Fonte: Hubble Space Telescope/NASA/ESA

2.3 As galáxias do Tipo-M51

Conforme mencionado no capítulo anterior, os Sistemas do Tipo-M51 (ou galáxias do Tipo-M51) são sistemas compostos por uma galáxia principal com formato espiral, com tamanho relativamente grande, e com uma galáxia companheira de massa relativamente baixa na extremidade de um de seus braços (Klimanov & Reshetnikov, 2001, daqui por diante, K&R). As análises desse tipo de sistemas fornecem importantes informações, acerca da dinâmica gravitacional das mesmas, o que pode esclarecer algumas questões ainda em aberto sobre o surgimento dessas galáxias (Fuentes et al., 2007).

Toomre & Toomre (1972) desenvolveram um trabalho pioneiro no estudo de interações entre galáxias, por meio de simulações numéricas. Afirmam que em Sistemas do Tipo-M51 podem ocorrer grandes transformações em suas morfologias, devido às fortes forças de maré ou colisões entre as correntes de marés, os discos galácticos podem ser afetados, esse fato é reafirmado por Balland et al. (1998), ao analisar as caudas e pontes entre objetos interagentes.

AM87 fez um levantamento do Hemisfério Sul, com o objetivo de catalogar objetos que interagissem entre si e que produzissem algum tipo de característica peculiar. As demais categorias do catálogo foram originadas na medida que os objetos eram encontrados e apresentassem peculiaridade distintas. A compilação realizada por AM87 dividiu a amostra de galáxias peculiares, em 25 categorias, sendo que dessas categorias, a Categoria 9, é destinada somente ao estudo de galáxias do Tipo-M51, o que representa um percentual de 2% de toda a amostra.

A Categoria 9 das galáxias do Tipo-M51, também analisada por Arp (1966) levando em consideração os aspectos morfológicos das galáxias do Tipo-M51, bem como, o tamanho relativo da companheira, abertura do braço espiral na qual a companheira aparece, o tipo de espiral central e tipo de galáxia complementar.

Elmegreen et al. (1990) verificaram por meio da frequência relativa de barras, entre galáxias que foram classificadas no Esquema de Hubble, as evidências de que galáxias que possuem uma galáxia satélite ao interagirem podem provocar uma mudança em suas morfologias, como por exemplo, o aparecimento de uma barra ou ainda a dissipação de massa para outros objetos intergalácticos.

Laurikainen & Salo (2000, 2001) abordam a protuberância fotométrica nos discos de galáxias, a partir de uma amostra de 61 sistemas binários, analisando a distribuição das estrelas pelo disco galáctico, buscando analisar as taxa de brilho superficial das galáxias, de modo a verificar a deformação da matéria no disco galáctico, pois para galáxias que apresentam um alto brilho superficial, os sistemas seriam mais propícios a terem galáxias satélites (ou companheiras) próximos do que as que apresentam baixas concentração superficial de brilho (Knežek 1993).

Em média as galáxias interagentes apresentam uma protuberância maior em relação ao brilho, do que as galáxias que não apresentam uma companheira, como relatado

anteriormente em Laurikainen & Salo (2000, 2001) que afirmam ainda sobre as interações da galáxia principal com a sua companheira, que por menor que seja, desempenha um importante papel em sua evolução.

Diversas análises observacionais realizadas por meio de estudos no infravermelho, têm encontrado um número elevado de galáxias com uma alta taxa de luminosidade, galáxias interagem entre si, ou fundem-se apresentando uma mudança radical em sua estrutura morfológica (Smith et al., 1987; Hancock et al., 2007). Essas mudanças são provenientes de grandes fusões entre galáxias luminosas o que evidencia possíveis candidatas a galáxias do Tipo-M51 em sistema que apresentam altas taxas de luminosidade.

As análises estatísticas das galáxias do Tipo-M51, em que as galáxias principais da amostra são predominantemente barradas, com dois braços espirais bem definidos feitas por K&R, estimam a magnitude aparente na banda B para as galáxias companheiras, sugerindo assim um critério para galáxias do Tipo-M51. Em outra definição desse tipo de sistemas, os autores mencionam que as galáxias do Tipo-M51 são sistemas binários com uma galáxia companheira, relativamente fraca (com luminosidade entre $1/30$ e $1/3$ da galáxia principal) e perto do final do braço espiral da galáxia principal.

Ao levar em consideração alguns aspectos cinemáticos, como por exemplo, as massas individuais das galáxias do sistema binário, relacionando a razão entre as massas da galáxia principal, e de sua companheira para que seja igual a $1/3$ dentro dos seus critérios, a taxa de formação das estrelas e a distância entre as galáxias do sistema, Klimanov et al. (2002) procuraram encontrar mais informações para as interações entre os objetos do sistemas binários do Tipo-M51 e relacioná-los com estudos anteriores.

A luminosidade das galáxias de um sistema binário também é analisada por Reshetnikov & Klimanov (2003), daqui por diante R&K, de maneira inversamente proporcional à sua velocidade, ou seja, quanto maior for o brilho da galáxia companheira, menor será a velocidade relativa entre as galáxias do sistema. R&K fez essa análise por meio da relação de *Tully-Fisher*, Courteau (1997), a qual relaciona a luminosidade da galáxia com a sua velocidade angular. Dessa forma a intensidade do brilho emitido por essas galáxias possibilitam calcular a distância entre a galáxia principal e a sua companheira.

Por outro lado, existe um grande interesse em entender a dinâmica das galáxias por meio de estudos de sistemas binários, pois sistemas desse tipo fornecem importantes informações (Rampazzo et al., 2005). As grandes concentrações de gás em uma galáxia, que está ligada diretamente à sua taxa de formação estelar, produz uma alta atividade galáctica no núcleo, de forma a deformar a estrutura da galáxia principal do sistema, sendo essa galáxia ou não do Tipo-M51, essa atividade apresenta uma maior frequência em galáxias do tipo espiral, pois possuem uma alta concentração de gás e poeira. Domingue et al. (2003) analisaram essa dinâmica entre duas galáxias que estão interagindo por meio do fluxo de gás.

Günthardt et al. (2016) em suas observações sobre objetos interagentes realizaram uma análise cinemática das galáxias do Tipo-M51, por meio da distribuição da velocidade radial por diversos ângulos, relacionando galáxia principal à sua companheira, e da mesma forma de maneira recíproca, com o objetivo de compreender a dinâmica das galáxias do Tipo-M51.

Seguindo com a discussão sobre os Sistemas binários do Tipo-M51, R&K afirmam que tais sistemas podem ser originados da absorção de uma galáxia companheira (ou galáxia satélite) por uma galáxia espiral com alta massa. Em estudos similares, K&R (2001, 2002) e R&K fizeram análises de seus objetos, a partir de dados observacionais, com o objetivo de estudar a origem e evolução de galáxias binárias do Tipo-M51.

Os principais catálogos desse trabalho (maiores detalhes são apresentados no Capítulo 3), a exemplo dos trabalhos de Arp (1966), Vorontsov & Velyaminov (1959) e Vorontsov & Velyaminov (1977), evidenciam em suas amostras as interações entre os seus objetos analisados, que possuem diversos aspectos que garantem essas interações como pontes, caudas e o distorcimento de espirais.

Casteels et al. (2012) identificaram prováveis pares de galáxias interagentes, que estavam potencialmente vinculadas, devido a proximidade entre os objetos e que eventualmente podem se fundir. As observações desses objetos foram feitas no *Galaxy Zoo*, que buscavam comprovar as interações entre galáxias por meio de classificações visuais.

Capítulo 3

O Conjunto de dados

No presente capítulo são abordados os aspectos concernentes do conjunto de dados usados na Dissertação. Em uma primeira etapa é descrito o Catálogo CGM51A (Jokimäki et al., 2008), as suas principais características e propriedades, assim como os critérios que os autores utilizaram para classificar uma galáxia como pertencendo à Categoria do Tipo-M51.

Posteriormente, apresentamos a forma como foram obtidos os dados desse catálogo. Por sua vez, a busca de galáxias do Tipo-M51 foi feita por meio do uso dos dados HyperLeda, o qual é descrito na Seção 3.3. Os procedimentos adotados para a obtenção de seus dados também são descritos, e as principais características oriundas desses dados referente a classificação de Sistemas do Tipo-M51, que compõe a fonte principal da amostra de dados usada, a qual, levando-se em conta as características do presente trabalho, contém um conjunto de aproximadamente 1 milhão de galáxias para todo o Hemisfério Sul.

3.1 O Catálogo de Galáxias do Tipo-M51 e Associações (CGM51A)

O Catálogo de Sistemas de Galáxias do Tipo-M51 e suas Associações (Jokimäki et al., 2008) contém uma amostra com 232 pares de galáxias interagentes do Tipo-M51, além de uma lista com outros 430 sistemas adicionais que são classificados como possíveis Sistemas do Tipo-M51.

Os dados desse catálogo estão disponíveis em duas tabelas¹. As tabelas contém diversas propriedades de cada galáxias, desde a designação do tipo morfológico da galáxia principal até a razão da incerteza, do sistema ser de fato um Sistema do Tipo-M51; dentre várias outras propriedades, as quais estão descritas de forma detalhada no artigo dos autores.

¹<http://www.jorcat.com>

O CGM51A tem como base outros catálogos fundamentais, mencionados nos capítulos anteriores, os quais contém informações sobre interações entre galáxias. Os catálogos fundamentais para a elaboração do Catálogo CGM51A são:

1. *New General Catalogue* (Dreyer 1888);
2. *The catalogue of interacting galaxies* (Vorontsov & Velyaminov, 1959, 1977; Velyaminov et al., 2001), daqui por diante VV;
3. *Atlas of peculiar galaxies* (Arp 1966);
4. *A Catalogue of Southern peculiar galaxies and associations* (AM87).

Tendo em vista os dados desses catálogos, Jokimäki et al. (2008) definiram alguns critérios de classificação, de modo a identificar quais pares de galáxias oriundos desses catálogos eram de fato Sistemas do Tipo-M51, ou apenas possíveis Tipo-M51, ou seja, que não podem ser descartados em uma primeira análise e necessitam de mais observações para validar tal sistema como de fato do Tipo-M51.

Dessa forma, os sistemas nesse catálogo são denominados de possíveis M51, constituído dos que não tiveram uma conclusão definitiva, com base nos dados existentes. Esses sistemas foram compilados nas perspectivas de uma análise futura por parte dos autores ou da própria comunidade. A definição de Jokimäki et al. (2008) para um sistema ser classificado como do Tipo-M51, deve atender aos seguintes critérios:

- i) a galáxia principal do sistema deve ser uma galáxia do tipo espiral;
- ii) a galáxia companheira não pode ter um diâmetro angular maior, ou igual que 50% do diâmetro angular da galáxia principal;
- iii) um dos braços da galáxia principal está conectado com término na companheira da galáxia principal;
- iv) um dos braços da galáxia principal pode não se conectar com a galáxia companheira, mas o seu braço deverá está apontando para ela.

No Catálogo CGM51A são descritos os casos de galáxias, que foram analisadas dos principais catálogos de ARP, AM87 e VV, discriminando-as como do Tipo-M51, possíveis M51 e rejeitadas, como mostra a Tabela 3.1. Esses catálogos apresentam um grande número de casos de galáxias, que foram classificadas equivocadamente, como sendo do Tipo-M51. A Tabela 3.2 apresenta uma comparação entre os sistemas antigos e novos Sistemas do Tipo-M51, com 81 novos casos de galáxias do Tipo-M51.

Na Figura 3.1 são apresentados alguns objetos representativos, dos 232 Sistemas do Tipo-M51 compilados no Catálogo CGM51A. São galáxias em sua totalidade de tipo morfológico de Sa a Sc como mostra a Tabela 3.3, sendo que mais de dois terços

desses sistemas possuem apenas 2 braços (ver Tabela 3.4). Esses pares de galáxias interagentes, segundo Jokimäki et al. (2008), são excelentes objetos de estudos no que se trata de interações e processo evolutivos das galáxias (Fuentes et al., 2007).

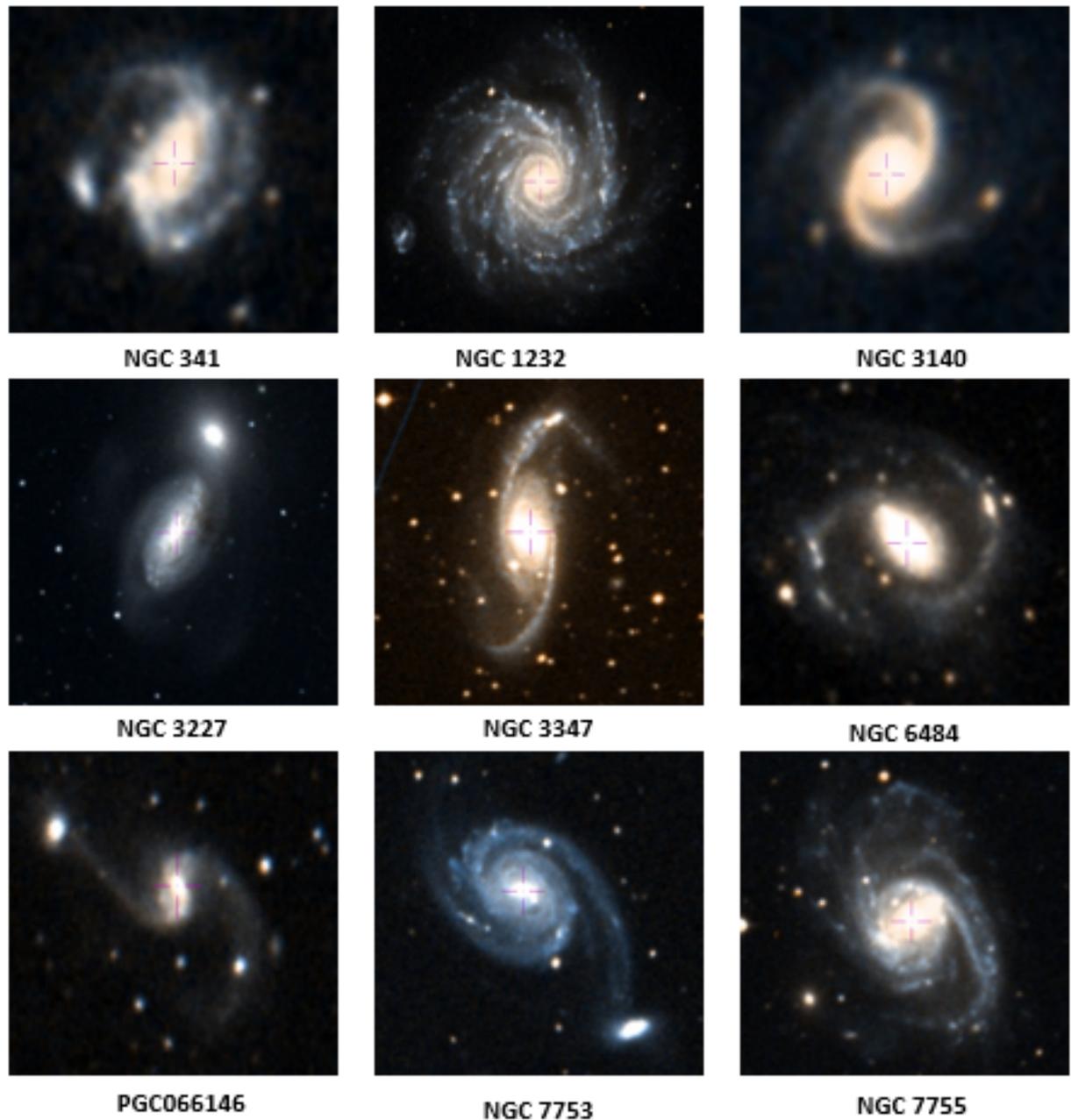


Figura 3.1: Galáxias classificadas como Sistemas do Tipo-M51 no Catálogo CGM51A.

Na Figura 3.2 são apresentados alguns exemplos de possíveis candidatos a Sistemas do Tipo-M51 compilados por K&R, e classificados também dessa forma por Jokimäki et al. (2008). A classificação dos mesmos em sistemas desse tipo, deve-se ao fato de

possuírem algumas características presentes no critério de classificação de Sistemas do Tipo-M51, mas outras ou estarem ausentes ou não serem evidentes. Dentre as características que estão ausentes, podemos destacar:

- i) a existência de uma provável interação entre a galáxia principal e a galáxia companheira;
- ii) o braço da galáxia principal se aproxima da galáxia companheira;
- iii) o braço se estende após a galáxia companheira.

Além dos 430 casos analisados como possíveis Sistemas do Tipo-M51, Jokimäki et al. (2008) rejeitaram vários pares de objetos por diversas razões, das quais podemos destacar:

- i) formas distintas da estrutura principal de um Sistema do Tipo-M51;
- ii) galáxias companheiras fora das extremidades dos braços.

Caso uma dessas características fossem notadas, os sistemas eram imediatamente rejeitados pelos autores, sem nenhuma inspeção mais minuciosa. A rejeição para tais casos segue também alguns critérios (ver Tabela 4 dos autores), bem como:

- i) A galáxia principal não ser uma galáxia espiral;
- ii) a galáxia companheira não está localizada na extremidade de um dos braços da galáxia principal;
- iii) a candidata a companheira da galáxia principal não é uma galáxia, mas sim uma estrela;
- iv) não existe nenhuma galáxia companheira óbvia;
- v) o sistema não foi encontrado;
- vi) o diâmetro angular da galáxia de companheira não é inferior a 50% do diâmetro angular da galáxia principal;
- vii) a ponte de conexão entre a galáxia principal e a companheira não é um braço espiral.

Na Figura 3.3 os respectivos objetos VV029, ARP043, AM0456-264, ARP099, ARP040 e ARP087, VV089, AM 0244-612 e VV382 foram rejeitados, por não atenderem aos seguintes critérios de classificação: a “galáxia” companheira não é uma

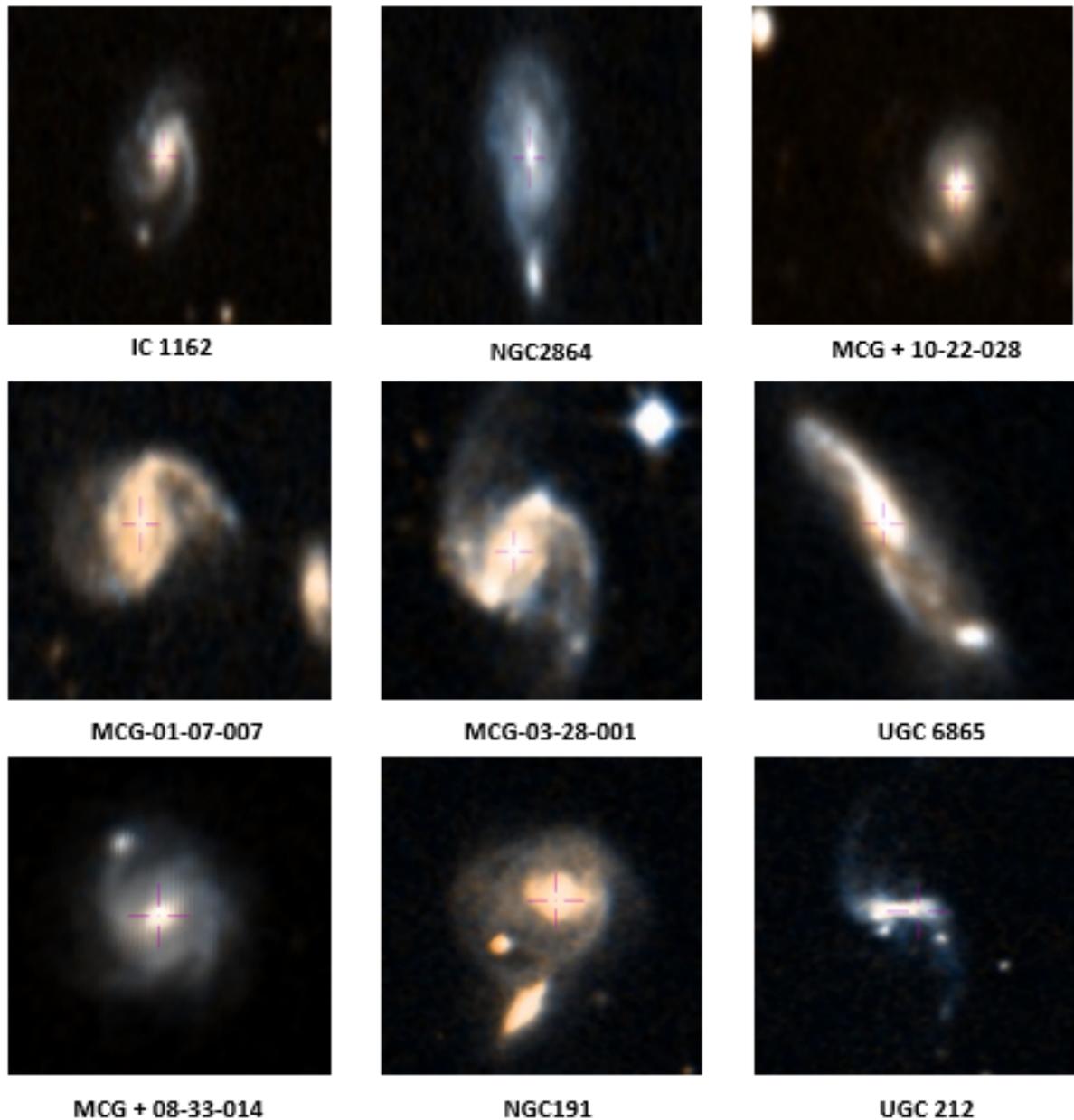


Figura 3.2: Galáxias classificadas como possíveis Sistemas do Tipo-M51 no Catálogo CGM51A.

galáxia, a galáxia companheira não se encontra no final do braço, a galáxia principal não é uma espiral, não existe uma galáxia companheira, o diâmetro angular da galáxia companheira não é inferior a 50% do diâmetro angular da galáxia principal.

Esses critérios excluíram 432 sistemas de galáxias dos catálogos do VV, Arp (1966) e de AM87 na compilação do CGM51A devido à falta das características mínimas em serem do Tipo-M51. Jokimäki et al. (2008) ainda realizaram uma separação,

entre casos e Sistemas do Tipo-M51. Os casos foram analisados, levando em conta o número de galáxias companheiras analisadas próximas à uma galáxia principal, e os sistemas foram analisados em relação à galáxia principal, e os objetos em sua cercania.

Existem catálogos que são definidos na Tabela 3.1 como “outros”, são os catálogos de *RUSSELL*, *EXTRA* e *NGC*, os quais apresentam também números significativos de casos da amostra, sendo que o aproximadamente 83% das galáxias do Tipo-M51 pertencem ao Catálogo *NGC*.

A Tabela 3.3 apresenta uma análise da morfologia (Jokimäki et al., 2008) das principais galáxias em seu catálogo. Estima-se que aproximadamente 14% das 208 galáxias principais, classificadas como Sistemas do Tipo-M51, são do tipo *Sa* ou *Sab*, ou seja, possuem braços com ângulo de inclinação menor sem um núcleo grande ou um formato intermediário, em uma comparação como amostra de K&R. Aproximadamente 73% das galáxias do Tipo-M51 do Catálogo CGM51A são do tipo *Sb*, *Sbc* e *Sc*.

Tabela 3.1: Distribuição da amostra de casos das galáxias catalogadas do CGM51A. Fonte: CGM51A.

	Tipo-M51	Possível Tipo-M51	Rejeitadas	Amostra inteira
ARP	14	11	24	49
AM87	62	74	81	217
VV	50	135	110	295
ARP & VV	23	6	8	37
ARP&AM87	0	0	1	1
AM87 & VV	2	1	0	3
ARP secundário	1	10	15	26
AM87 secundário	8	8	16	32
VV secundário	0	3	12	15
Outros	72	187	165	424
Amostra inteira	232	435	432	1099

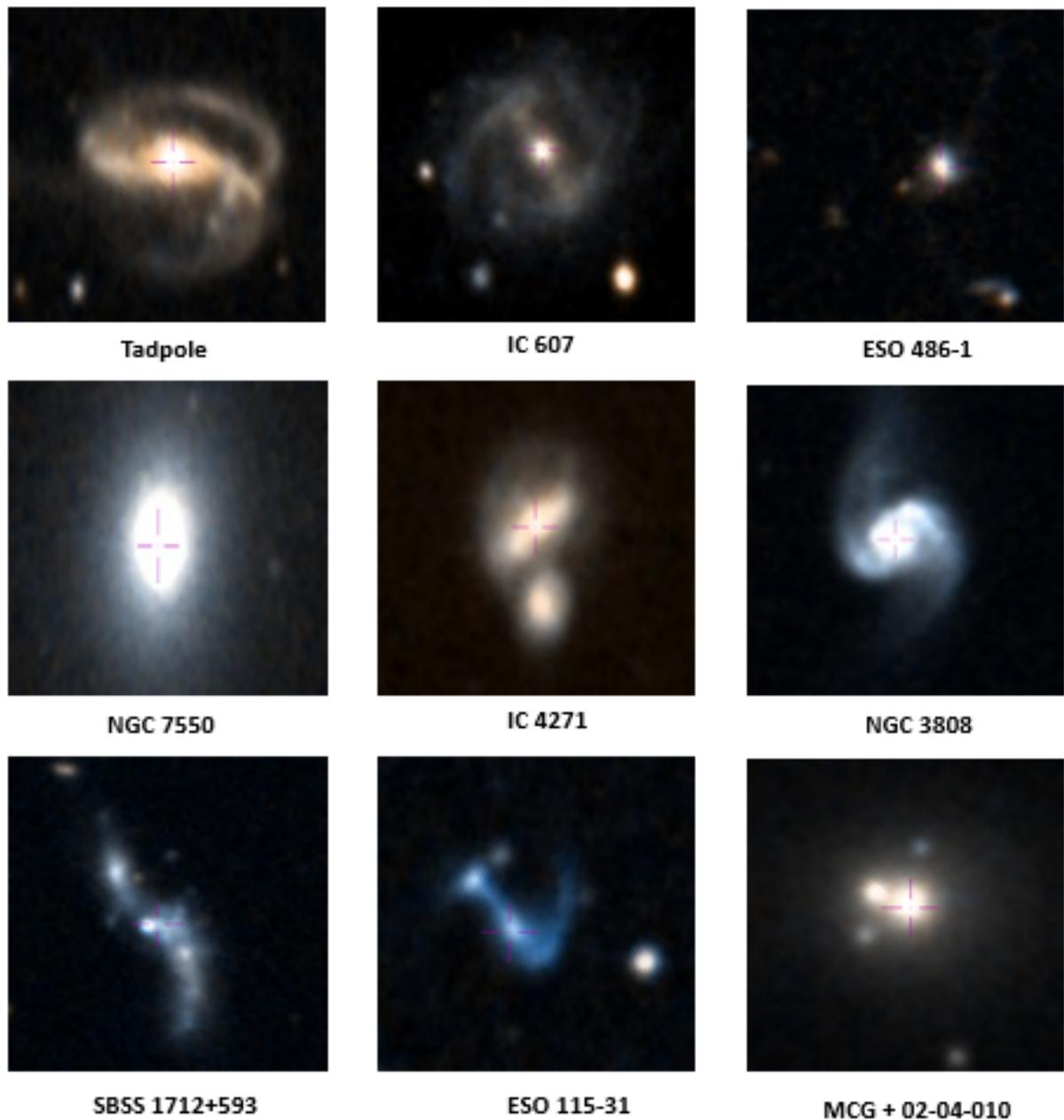


Figura 3.3: Galáxias rejeitadas do Catálogo CGM51A.

Em relação ao número de braços da galáxia principal dos Sistemas do Tipo-M51, Jokimäki et al. (2008) mostram que aproximadamente 71% dos objetos de sua amostra (Tabela 3.4), ou seja, de galáxias principais, apresentam dois braços, sendo semelhante aos resultados obtidos na amostra do Catálogo de K&R. Assim, essa análise sugere que a estrutura predominante em Sistemas do Tipo-M51, é uma estrutura com dois braços espirais.

Conforme mencionado anteriormente, os Sistemas do Tipo-M51 são sistemas biná-

Tabela 3.2: Comparação entre antigos e novos Sistemas do Tipo-M51. Fonte: CGM51A.

Antigas M51	151	227	224	602
Novas M51	81	208	208	497

Tabela 3.3: Distribuição morfológica dos principais tipos de galáxias do Catálogo CGM51A. Fonte: CGM51A.

	N \tilde{z} de M51	Percentual
Total	208	100
<i>Sa</i>	17	8 \pm 2
<i>Sab</i>	12	6 \pm 2
<i>Sa + Sab</i>	29	14 \pm 3
<i>Sb</i>	54	26 \pm 3
<i>Sbc</i>	46	22 \pm 3
<i>Sc</i>	51	25 \pm 3
<i>Scd</i>	0	0
<i>Sd</i>	0	0
Outros	28	13 \pm 3

Tabela 3.4: Contagem do número de braços das galáxias principais do Catálogo CGM51A. Fonte: CGM51A.

N de braços	Percentual
1	12 \pm 3
2	71 \pm 4
3	13 \pm 3
4	5 \pm 2
5 ou mais	1 \pm 1

rios, nos quais a galáxia principal é do tipo espiral com uma companheira em uma das extremidades de seus braços. Dessa forma, é importante inferir não somente as propriedades da galáxia principal, mas de sua companheira. Jokimäki et al. (2008) fizeram uma análise da localização das galáxias companheiras nos braços das galáxias principais, chegando à mesma conclusão de K&R, ou seja, que aproximadamente

63% das galáxias companheiras estão contidas dentro e próximo da borda do disco da galáxia, em relação ao semieixo principal do disco.

3.2 Obtendo os dados do Catálogo CGM51A

Os dados foram obtidos de duas tabelas do Catálogo CGM51A² as quais possuem estruturas semelhantes, e contém informações básicas de cada galáxia, tais como magnitudes, tamanho da galáxia, velocidade, *redshift*, entre outras propriedades. O catálogo contém 232 e 435 Sistemas do Tipo-M51 e as possíveis candidatas a Sistemas do Tipo-M51, respectivamente. Ambas as tabelas não contém as coordenadas, *RA* e *DEC* das galáxias, sendo necessário obter esses valores por meio de uma busca feita na base NED³, na qual para obter-se as coordenadas é necessário informar o nome da galáxia do Catálogo CGM51A.

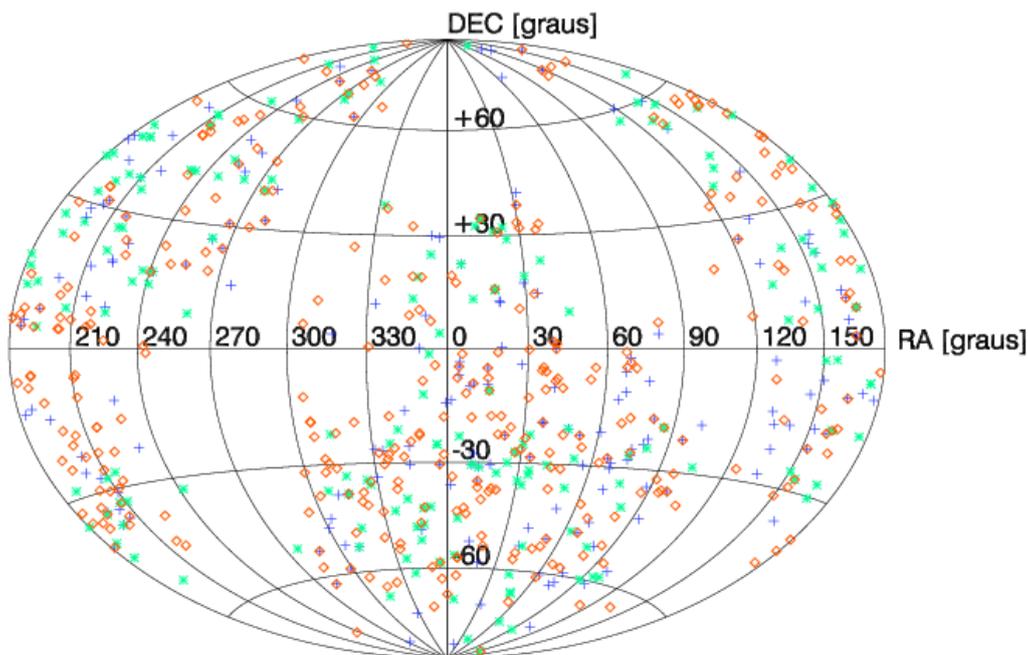


Figura 3.4: Distribuição em coordenadas equatoriais (J2000) da amostra usada no presente trabalho de galáxias do Tipo-M51 (cruzes azuis), possíveis candidatas (losangos em laranja) e rejeitadas (asteriscos em verde).

Além dessas duas classificações, Jokimäki et al. (2008) compilaram uma lista de objetos para os quais eles descartaram como sendo galáxias do Tipo-M51 ou possí-

²<http://www.jorcat.com>

³<https://ned.ipac.caltech.edu/>

veis candidatas. A lista contém 229 objetos (ver Tabela 4 do artigo dos autores). A inclusão desses objetos em uma base de dados é importante, de forma que uma eventual identificação no método elaborado na Dissertação irá gerar um falso positivo, de modo que o método não classifique galáxias já analisadas como novos sistemas.

Dessa forma, é importante que esses objetos sejam armazenados em uma nova base, com a *flag* rejeitados. Para efetuar a comparação desses objetos com os identificados pelo método (Capítulo 4) são necessárias as coordenadas dos mesmos; como eles não possuem coordenadas disponíveis no artigo de Jokimäki et al. (2008), foi realizada uma busca no *SIMBAD*⁴ e diretamente no *Catalogue of interacting galaxies by Vorontsov-Velyaminov*⁵ tendo como base o nome desses objetos.

Esse último catálogo continha grande parte dos objetos apresentados na tabela de Jokimäki et al. (2008). As informações de Ascensão Reta *RA* e Declinação *DEC* obtidas nessa etapa estavam no formato sexagesimal, as quais foram convertidas em graus por meio do *IDL* e considerando-se precessão J2000. A Figura 3.4 apresenta a distribuição em coordenadas equatoriais de Sistemas do Tipo-M51, possíveis candidatas e rejeitadas, nota-se que os objetos estão distribuídos de maneira uniforme no tocante à três categorias de classificação.

⁴<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fbasic>

⁵<http://www.sai.msu.su/sn/vv/>

3.3 O Catálogo HyperLeda

Os grandes observatórios astronômicos espalhados pelo mundo, que possuem sofisticados telescópios, que processam um grande volume de dados fornecem, diversas informações, como por exemplo, o tipo dos objetos, as coordenadas, a fotometria, a magnitude, os movimentos, a velocidade, o *redshift*, o tamanho, o tipo espectral ou morfológico, entre outras informações, que alimentam várias bases de dados para fins diversos na Astronomia (Blanton, 2017; Abazajian, 2004).

Essas bases de dados estão disponíveis em versões digitais na web, ou via scripts nos principais bancos de dados astronômicos do mundo. As principais bases de dados que fornecem os objetos, e as essenciais informações para a elaboração desse trabalho foram a HyperLeda, *SIMBAD* e *NED*, também utilizamos dados dos grandes levantamentos *DSS* e o *2MASS* (Mazzarella & NED Team, 2007).

O HyperLeda⁶ é uma base de dados que disponibiliza ferramentas para estudar a física das galáxias. A base teve início em 1983, sendo mantida por uma colaboração entre dois observatórios o de Lyon (França) e o Observatório Astrofísico Espacial (Rússia), os quais compilam os dados em uma única descrição homogênea dos objetos astronômicos.

No Catálogo HyperLeda as galáxias são classificadas em relação à sua morfologia, a partir de uma sequência numérica composta de números inteiros, de -8 a 10. Esse tipo de classificação é conhecida por *RC3* do *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Vaucouleurs et al., 1991) que apresenta uma codificação numérica para os tipos morfológicos. A Tabela 3.6 apresenta essa classificação para cada tipo e subtipo morfológico. Nota-se que as galáxias espirais de diferentes subtipos morfológicos são descritas pelos códigos de 1 a 9.

```
select objname, al2000, de2000, objtype,type, bar, multiple, t,
e_t,logd25, e_logd25, logr25,e_logr25 where de2000 >= -90.0 AND
de2000 <= 0.0 and objtype = 'G' AND al2000 > 0.0 al2000 <= 24.0
```

Figura 3.5: Query para obtenção dos dados no Catálogo HyperLeda.

A Figura 3.5 apresenta os critérios de seleção, e os treze parâmetros obtidos da busca de dados feita no Catálogo HyperLeda. Foi realizada uma seleção com o propósito de obter-se os dados para todo o Hemisfério Sul ($de2000 \leq 0.0$) apenas para objetos do tipo galáxias (*objtype* = “G”) cada um dos parâmetros são explicados de forma detalhada na Tabela 3.5.

⁶<http://leda.univ-lyon1.fr/leda>

Tabela 3.5: Parâmetros de alguns objetos astrofísicos do Catálogo HyperLeda e usados no presente trabalho.

Parâmetros	Descrição
<i>Objname</i>	Nome principal
<i>Objtype</i>	Tipo de objeto (G = galáxia, S= estrela...)
<i>Type</i>	Tipo morfológico: <i>E</i> , <i>Sa</i> , <i>SBa</i> .
<i>Al2000</i>	Ascensão Reta (em unidade de graus)
<i>De2000</i>	Declinação (em unidade de graus)
Bar	Galáxia barrada (B)
Multiple	Múltiplas galáxias (M)
<i>TM</i>	Código do tipo morfológico
<i>E_T</i>	Erro em <i>TM</i>
<i>Logd25</i>	Registro do diâmetro aparente (<i>d25</i> em 0.1 arcmin)
<i>E_Logd25</i>	Erro em <i>Logd25</i> (<i>d25</i> em 0.1 arcmin)
<i>Logr25</i>	Relação em log entre o eixo principal e o menor
<i>E_Logr25</i>	Erro em <i>logr25</i> (relação log do eixo principal e secundário)

Eles foram escolhidos pois estão diretamente relacionados à presente pesquisa. As coordenadas das galáxias (*al2000* e *de2000*) são usadas no cálculo para a procura de galáxias, que estejam localizadas até 1 minuto de arco da galáxia principal (ver Capítulo 4).

O tipo morfológico (*TM*) é usado para selecionar apenas as galáxias espirais como objeto principal de um dado candidato a Sistema do Tipo-M51.

Como uma galáxia de qualquer tipo morfológico pode ser a companheira não é feita a restrição quanto ao tipo morfológico. A única condição é que o objeto seja uma galáxia, pois o Catálogo pode conter estrelas.

Os tamanhos *logd25* e *logr25* fornecem o diâmetro das galáxias (Tabela 3.5). Foram selecionados esses dois tipos de tamanhos, para o caso do par de galáxias em comparação não ter o valor de um, possa ter o outro valor disponível. Após a submissão da consulta ao HyperLeda, foi obtido um arquivo com 1060111 galáxias⁷ com um tamanho de aproximadamente 140 MB com a estrutura apresentada na Tabela 3.5. Conforme será descrito no Capítulo 4 é necessário fazer uma seleção nessas galáxias, de forma que atendam aos critérios estabelecidos pelo método. Dessa forma, é

⁷Data da consulta 31/05/2018

Tabela 3.6: Código numérico dos tipos morfológicos das galáxias do Catálogo HyperLeda com as suas respectivas descrições. Fonte: Catálogo HyperLeda.

nro (Tipo Morfológico)	Descrição
-8 (<i>Tr</i>)	transição.
-7 (<i>dSph</i>)	anãs esferoidais.
-5 (<i>E</i>)	galáxia elíptica.
-3 (<i>S0⁻</i>)	lenticular com semelhanças com uma galáxia elíptica.
-2 (<i>S0⁰</i>)	lenticulares com certa estrutura interna.
-1 (<i>S0⁺</i>)	galáxia lenticular com semelhanças com uma galáxia espiral.
0 (<i>S0a</i>)	galáxia intermediária entre <i>S0</i> e <i>Sa</i> .
1 (<i>Sa</i>)	galáxia espiral com núcleo maior, braços pequenos e bem enrolados.
2 (<i>Sab</i>)	galáxia espiral intermediária entre <i>Sa</i> e <i>Sb</i> .
3 (<i>Sb</i>)	galáxia espiral com núcleo e braços intermediários.
4 (<i>Sbc</i>)	galáxia espiral intermediárias entre <i>Sb</i> e <i>Sc</i> .
5 (<i>Sc</i>)	galáxia espiral com núcleo menor, braços grandes e mais abertos.
6 (<i>Scd</i>)	galáxia espiral intermediária entre <i>Sc</i> e <i>Sd</i> .
7 (<i>Sd</i>)	galáxia espiral sem bojo e com braços muito abertos.
8 (<i>Sdm</i>)	galáxia espiral com irregularidade na formação de seus braços.
9 (<i>Sm</i>)	galáxia intermediária entre espirais e irregulares.
10 (<i>Ir</i>)	galáxia irregular.

interessante analisarmos a distribuição dessas galáxias no tocante a algumas propriedades e características.

A distribuição no céu dessas galáxias pode ser vista na Figura 3.6. O painel superior dessa figura apresenta um histograma da Ascensão Reta (*RA*) das galáxias, enquanto que o inferior, a Declinação. Nota-se que a distribuição em termos de *RA*, é maior no primeiro quadrante, sendo praticamente similar para as faixas de $150^\circ < RA < 210^\circ$ e $RA > 300^\circ$. Nota-se também a presença de algumas regiões nas direções do início do segundo e final do terceiro quadrantes, respectivamente.

Enquanto que a distribuição em declinação tem uma grande concentração de galáxias para $DEC > -10^\circ$. Na direção do pólo, como esperado temos poucas galáxias. Para outras direções, um aspecto a ser levado em conta, é o fato dessas regiões estarem atravessando o plano de nossa Galáxia, uma região com alta emissão estelar e da poeira interestelar (Amôres & Lépine, 2005) com uma baixa concentração de objetos de natureza extra-galáctica (Amôres et al., 2012).

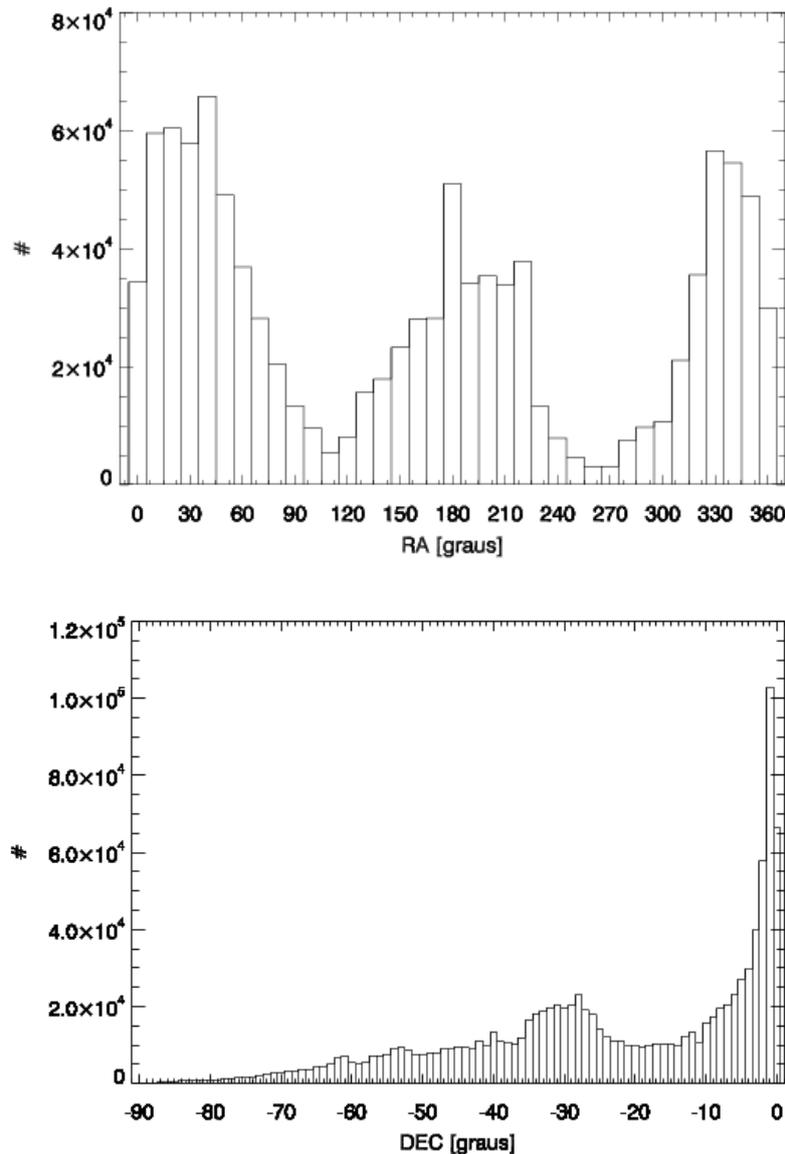


Figura 3.6: Distribuição em Ascensão Reta (painel superior) e Declinação (painel inferior) das galáxias do Catálogo HyperLeda obtidas por meio da seleção de pesquisa indicada no texto.

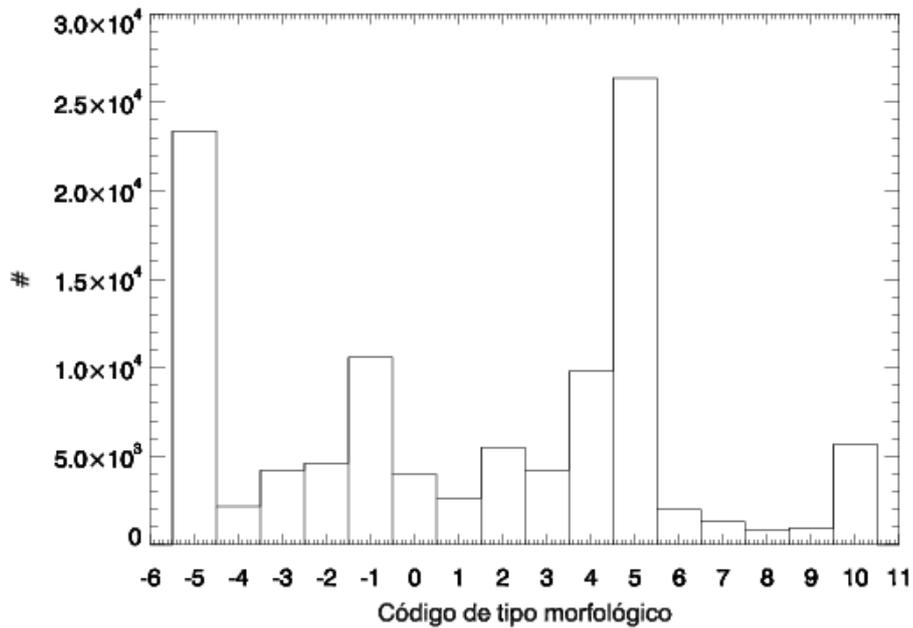


Figura 3.7: Código do tipo morfológico do Catálogo HyperLeda (ver Tabela 3.6).

Como os Sistemas do Tipo-M51 ocorrem em situações onde a galáxia principal é uma galáxia espiral, é importante realizar uma estimativa na base de dados, e posteriormente no método (ver Capítulo 4) a distribuição dos tipos morfológicos da amostra. A Figura 3.7 apresenta a distribuição dos tipos morfológicos do conjunto de dados e que são descritos na Tabela 3.6. O histograma da Figura 3.7 mostra que existe um número significativo de galáxias espirais classificadas no histograma pelos números de 1 a 5, e que correspondem aos tipos morfológicos *Sa*, *Sab*, *Sb*, *Sbc* e *Sc*, respectivamente.

Outro parâmetro que é usado para identificar um sistema como sendo do Tipo-M51, é o seu tamanho, ou seja, o tamanho da galáxia principal deve ser 50% superior ao da galáxia companheira. Conforme mencionado anteriormente são usados dois valores para a estimativa do tamanho das galáxias, $\log d_{25}$ e $\log r_{25}$, respectivamente.

A Figura 3.8 apresenta a distribuição dos diâmetros dos discos de 616534 galáxias que possuem essa estimativa na amostra. Das galáxias que possuem $\log d_{25} > 0.0$, aproximadamente 50% dessas galáxias apresentam um tamanho entre 0.4 e 0.5 minutos de arco. Em contrapartida, existe um número relativamente alto de galáxias, mais precisamente 32% das 612293 galáxias do Catálogo HyperLeda do conjunto de dados com $\log r_{25} > 0.0$, como mostra o histograma da Figura 3.9. A título de registro, existem 616553 galáxias que possuem ao menos a estimativa de um tamanho, e código de tipo morfológico entre 1 e 5.

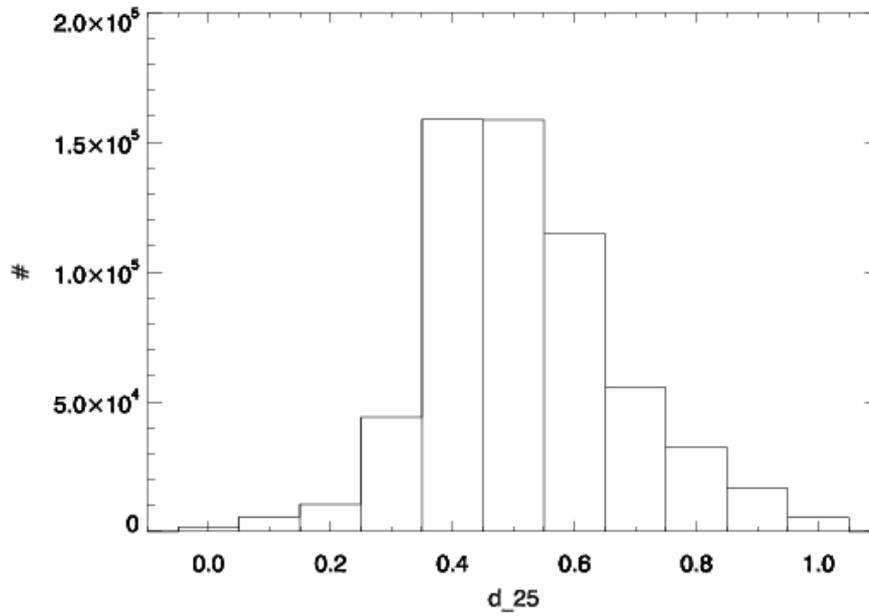


Figura 3.8: Distribuição do tamanho da galáxia, $\log d_{25}$, que representa o tamanho do eixo principal (ver Tabela 3.5).

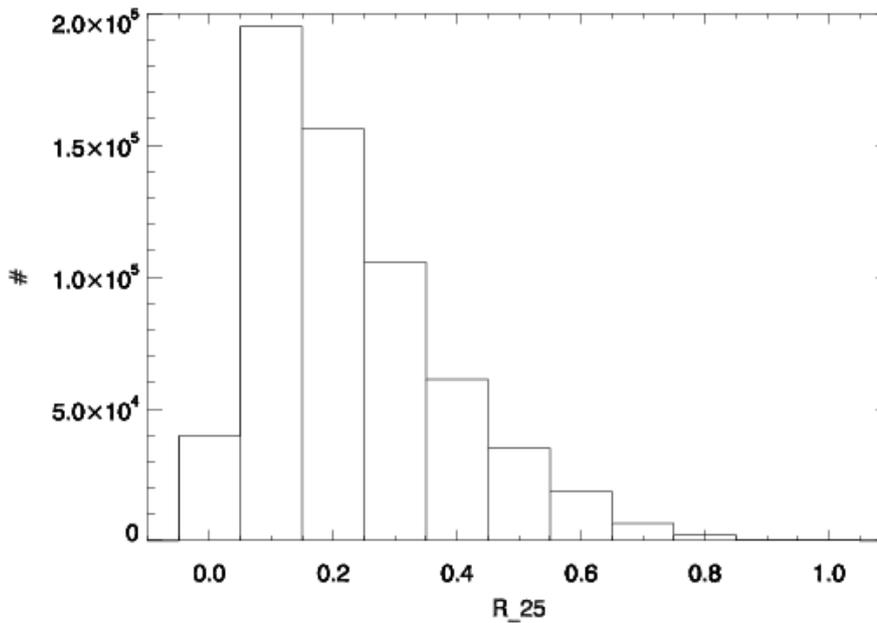


Figura 3.9: Distribuição do tamanho da galáxia, $\log r_{25}$, que representa a razão dos comprimentos do maior para o menor eixo da galáxia (ver Tabela 3.5).

Capítulo 4

O Método para a identificação de Sistemas do Tipo-M51

Para a identificação automática de Sistemas do Tipo-M51 foi elaborado um método, que consiste em seguir os critérios definidos por Jokimäki et al. (2008) e descritos na Seção 3.2. Para realizar essa verificação para um grande volume de dados, foi elaborado um código que faz a verificação em uma base de dados, e seleciona objetos que serão verificados visualmente, para serem identificados como Sistemas do Tipo-M51, sendo necessárias algumas adaptações aos critérios propostos por Jokimäki et al. (2008), os quais serão descritos e justificados no presente capítulo.

4.1 Obtenção da distância mínima entre as galáxias de Sistemas do Tipo-M51

O método leva em conta os critérios apresentados na Seção 3.1, de forma a selecionar possíveis candidatos a Sistemas do Tipo-M51. Um importante aspecto sobre esses sistemas, reside na informação entre a distância angular, entre a galáxia principal e a sua companheira.

Uma informação que é muito útil é a distância entre as galáxias de Sistemas do Tipo-M51, ou seja, a distância entre a galáxia principal e a sua companheira de diâmetro menor. A distância aqui abordada, é a distância angular, ou seja, em duas dimensões usando-se as coordenadas RA e DEC . Caso essa distância tenha um valor relativamente pequeno, pode-se usá-la para restringir a procura por galáxias companheiras, tendo em vista a determinação da galáxia espiral principal.

A Figura 4.1 apresenta a projeção aitoff em coordenadas equatoriais (J2000) das galáxias do Tipo-M51 do Catálogo de Jokimäki et al. (2008). Esses objetos compõem a base de dados, que será utilizada para extrair as características de Sistemas do

Tipo-M51 já conhecidos, de forma a reconhecer padrões e semelhanças desse tipo de sistema em outras bases de dados.

Nota-se na figura, que os sistemas estão bem distribuídos por todo o céu. As regiões em branco são na direção do plano de nossa Galáxia, região com grande concentração de gás e poeira e dessa forma, de difícil identificação de objetos extra-galácticos (Amôres et al., 2012).

Figura 4.1: Distribuição em coordenadas equatoriais, em projeção aitoff dos 232 Sistemas do Tipo-M51 do Catálogo CGM51A.

Conforme descrito no Capítulo 3, as coordenadas das galáxias foram obtidas de forma automática usando-se o *NED*, nesse caso havia a informação sobre os nomes das galáxias principais disponíveis no Catálogo CGM51A. Para o caso das galáxias companheiras, não havia as informações referentes à sua identificação e tampouco em relação às suas coordenadas.

Para obter-se as suas coordenadas foi realizada inspeção visual nas imagens obtidas, usando-se o *Aladin*¹ em cada uma das galáxias principais do Catálogo de Jokimäki et al. (2008). O script foi escrito pelo orientador da Dissertação em uma etapa anterior. Na Figura 4.2 são apresentados alguns exemplos de imagens em falsa cor do *DSS* de Sistemas do Tipo-M51 obtidas por meio do *Aladin*.

As galáxias da Figura 4.2 são típicos Sistemas do Tipo-M51. Na esquerda da figura tem-se uma galáxia do tipo morfológico *Sb* com coordenadas equatoriais, *RA* e *DEC*, (344.75590, -25.52840), ao centro uma galáxia do tipo *Sbc* com coordenadas (185.47930, 4.47480) e à direita uma galáxia do tipo *Sbc* com coordenadas (39.61430; 1.90780).

Figura 4.2: Exemplos de imagens do *DSS* de alguns Sistemas do Tipo-M51 obtidos por meio do *Aladin*.

Dessa forma foi analisada cada imagem das galáxias do Catálogo CGM51A, de forma

¹O *Aladin* é um atlas interativo que permite ao usuário visualizar imagens astronômicas digitalizadas ou levantamentos completos, sobrepor entradas de catálogos astronômicos ou bancos de dados e acessar interativamente dados e informações relacionadas a partir do banco de dados *Simbad*, do serviço *VizieR* e de outros arquivos para todos os objetos astronômicos conhecidos. Fonte: CDS.

a obter-se o centro das coordenadas das galáxias companheiras. Em uma etapa posterior foi calculada a distância, entre a galáxia principal e a sua companheira. A distância angular entre as galáxias de cada sistema foi obtida por meio da expressão 4.1.

$$Dist = \sqrt{(RA_p - RA_c)^2 + (DEC_p - DEC_c)^2} \quad (4.1)$$

na qual, RA_p e RA_c representam a ascensão reta da galáxia principal e de sua companheira, respectivamente. De forma similar para DEC_p e DEC_c , que representam a declinação para a galáxia principal e para a sua companheira, respectivamente.

Com o propósito de exemplificar como foi efetuado esse procedimento no *Aladin*, é apresentada na Figura 4.3 (direita) um Sistema do Tipo-M51, com coordenadas J2000 da galáxia principal (67.71504; -5.79817) e da sua companheira (67.70363; -5.79768).

Na Figura 4.3 (esquerda) é apresentado um outro exemplo, com coordenadas da principal (160.69396; -36.352667) e da companheira (160.68733; -36.32628). Nesse tipo de análise deve-se tomar uma atenção especial, devido ao fato da contaminação por outros objetos que não fazem parte do sistema, tais como outras galáxias e estrelas de *foreground*. Em ambos os casos a distância angular entre as duas galáxias é menor do que 2 segundos de arco.

A Figura 4.4 apresenta um histograma com as distâncias entre as galáxias dos Sistemas do Tipo-M51, obtidas por meio da análise das imagens desses sistemas, sendo que 183 desses sistemas, apresentam uma distância menor do que 3 arcmin, ou seja, 3 minutos de arco. Esse aspecto ressalta o fato, de que pode ser utilizada uma distância não tão grande para a busca entre as galáxias companheiras da galáxia principal.

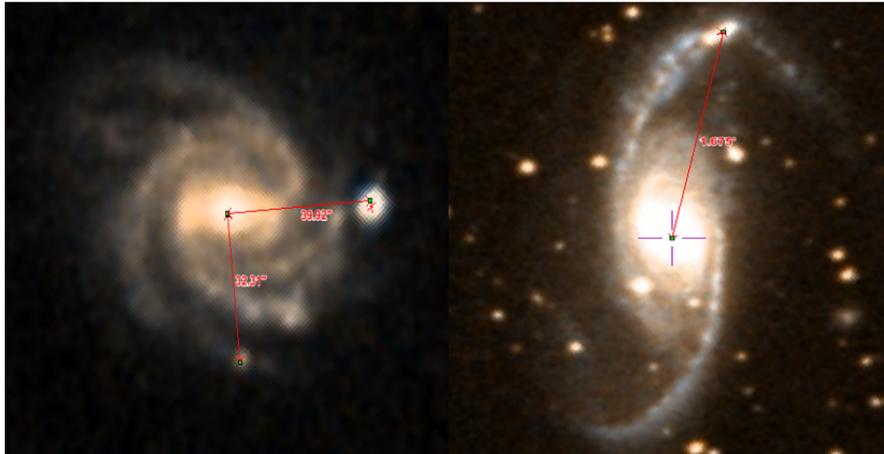


Figura 4.3: Imagens em falsa cor no óptico do *DSS* de dois Sistemas do Tipo-M51 na qual as linhas vermelhas representam a distância entre a galáxia principal e a sua companheira. Os números são as respectivas distâncias em segundos de arco. Na imagem da direita é mostrado um exemplo da contaminação. No caso considera-se a distância para a galáxia companheira localizada na parte inferior da imagem que está à uma distância angular de 1.675'.

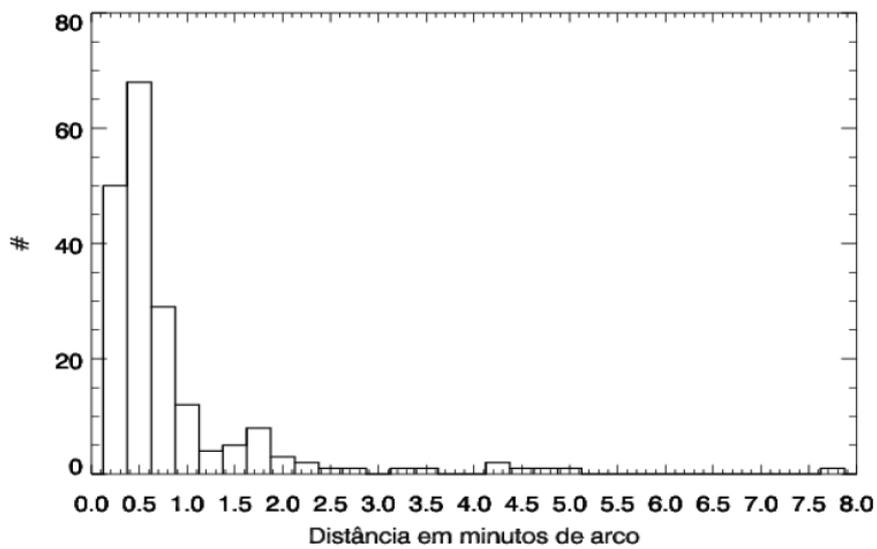


Figura 4.4: Distância angular em minutos de arco entre a galáxia principal e a sua companheira.

4.2 Os critérios para a identificação automática de Sistemas do Tipo-M51

O método desenvolvido não faz a identificação dos sistemas diretamente em imagens astronômicas, mas em um catálogo de galáxias, dadas as coordenadas, tipo morfológico e tamanho das galáxias.

O primeiro critério faz a verificação se uma dada galáxia é um Sistema do Tipo-M51, ou faz parte de possíveis candidatas ou rejeitadas. Essa verificação é feita com o simples cálculo da distância entre o *RA* e o *DEC* de uma dada galáxia, com os dados compilados no Capítulo 3. Devido a questões fotométricas, as quais envolvem a posição do centro da imagem, leva-se em conta uma tolerância de 10 segundos de arco entre as coordenadas.

O segundo critério verifica se uma dada galáxia tem o tipo morfológico definido, e em caso positivo se o mesmo é espiral. Como foi visto na seção anterior, os Sistemas do Tipo-M51 ocorrem em sua grande maioria, à distâncias angulares das galáxias do sistema menor do que 1-2 minutos de arco, por essa razão, o terceiro critério do método desenvolvido leva em consideração esse aspecto.

Dessa forma, o método desenvolvido contém os critérios descritos a seguir:

- i) a galáxia não pode ter sido identificada anteriormente como do Tipo-M51, possível ou rejeitada;
- ii) a galáxia principal deve ser do tipo espiral;
- iii) a distância entre a galáxia principal e a galáxia companheira deve ser menor do que 1 minuto de arco;
- iv) o tamanho da galáxia companheira deve ser menor ou igual a 50% do tamanho da galáxia principal.

De uma forma geral pode-se descrever, um esquema mais amplo e geral para o método desenvolvido:

- i) obtenção dos dados de um catálogo de galáxias com informação sobre coordenadas, tipo morfológico e tamanho das galáxias;
- ii) aplicação dos critérios descritos acima;
- iii) para as galáxias que satisfaçam o critério, segue-se a verificação de suas imagens;
- iv) após a inspeção visual, caso a galáxia venha a ter a aparência de um Sistema do Tipo-M51, a mesma é classificada como candidata a Sistema do Tipo-M51.

4.3 Aplicação do Método para uma região de teste

O objetivo geral da Dissertação é buscar por galáxias do Tipo-M51 em todo o Hemisfério Sul (*HS*), entretanto, aplicar em um primeiro momento, o método para todo o *HS* poderia acarretar em uma perda de tempo computacional e de análise, sendo prudente, em tais situações fazê-lo para regiões menores, de forma que eventuais erros e problemas possam ser identificados e corrigidos.

Tendo em vista o tamanho da região, qualquer procedimento caso seja necessário de ser feito novamente, não custará muito tempo. Dessa forma, a aplicação do método para uma região de prova é muito útil para a verificação de possíveis inconsistências, assim como formas de se otimizar a busca.

Com o propósito de testar e validar o método, o mesmo foi aplicado para uma grande região no Hemisfério Sul, delimitada por coordenadas, $0^\circ \leq RA \leq 60^\circ$ e $0^\circ \leq DEC \leq 60^\circ$, perfazendo uma área de aproximadamente três mil graus quadrados. As subseções a seguir, estão subdividas de forma a apresentar as propriedades dos dados da região escolhida, e posteriormente a aplicação do método para a mesma.

4.3.1 Análise das propriedades dos dados para a região

Aplicando uma seleção nos dados obtidos do Catálogo HyperLeda (Capítulo 3), levando em conta a região de testes, delimitada por $0^\circ \leq RA \leq 60^\circ$ e $0^\circ \leq DEC \leq 60^\circ$, tem-se uma amostra com 327167 galáxias.

Conforme pode ser visto na Figura 4.5 no painel superior, a distribuição em ascensão reta é praticamente igual para a amostra de galáxias, ao contrário da distribuição em declinação (painel inferior da mesma figura), na qual, grande parte das galáxias estão distribuídas para declinações superiores à aproximadamente -10° .

A Figura 4.6 apresenta a distribuição de tipos morfológicos para a região. Nota-se que a categoria que contém o maior número de índice morfológico, para essa região são as galáxias elípticas. Existem 7588 galáxias espirais compreendidas, entre os tipos *Sa* e *Sc*, que representam os códigos numéricos entre 1 e 5. As figuras 4.7 e 4.8 apresentam a estimativa de tamanho das galáxias, $\log d_{25}$ e $\log r_{25}$, respectivamente.

Como o critério iv) apresentado na seção anterior necessita do tamanho da galáxia principal assim como o tamanho de sua hipotética companheira, é necessário que a galáxia principal e a companheira tenham ao menos uma estimativa de tamanho, é importante destacar que 167747 galáxias possuem ao menos uma estimativa de tamanho.

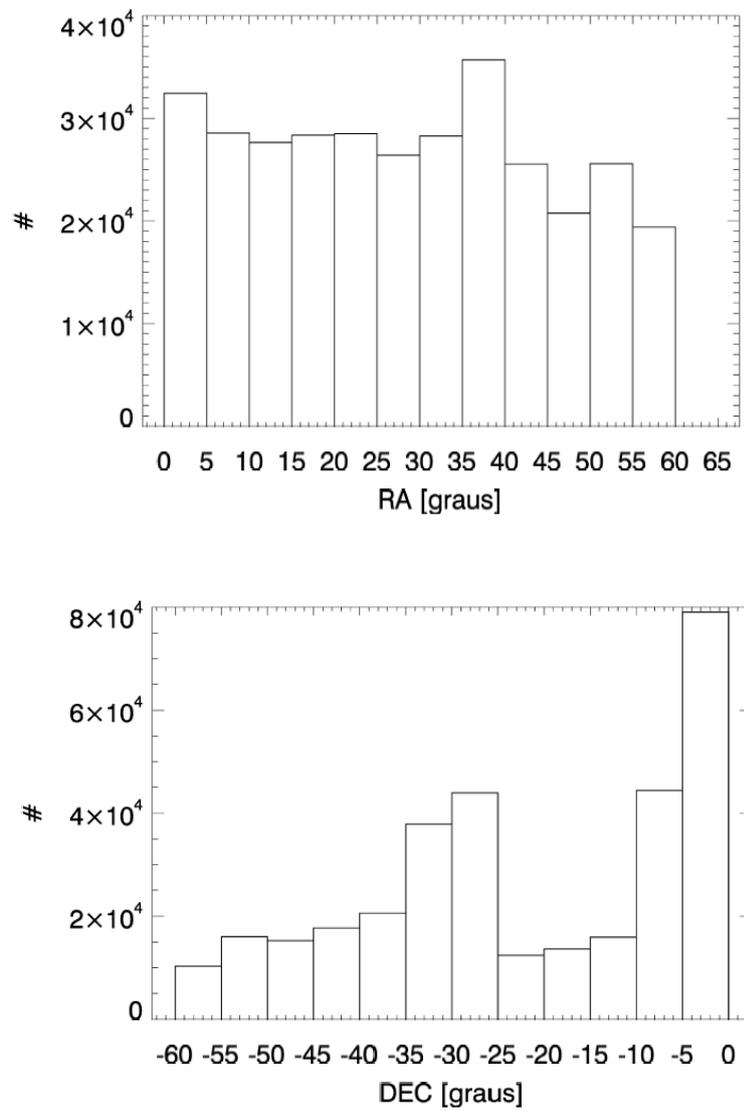


Figura 4.5: Distribuição em Ascensão Reta (painel superior) e Declinação (painel inferior) das galáxias do Catálogo Hyperleda obtidas por meio da seleção de pesquisa indicada no texto.

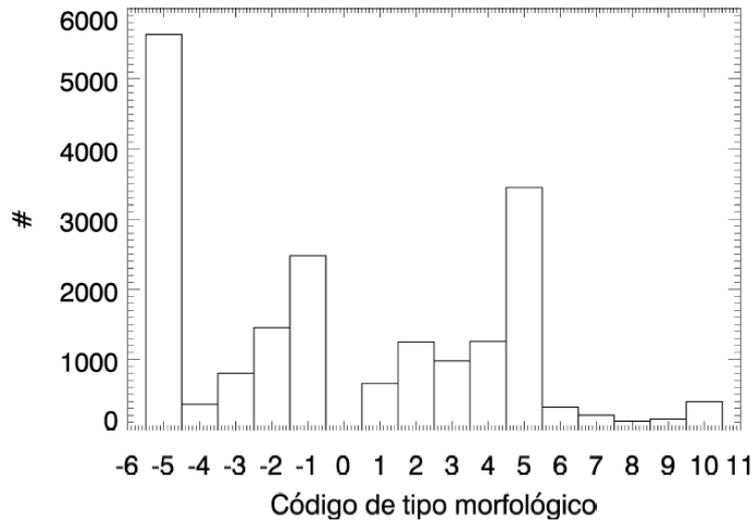


Figura 4.6: Código do tipo morfológico do Catálogo Hyperleda (ver Tabela 3.6).

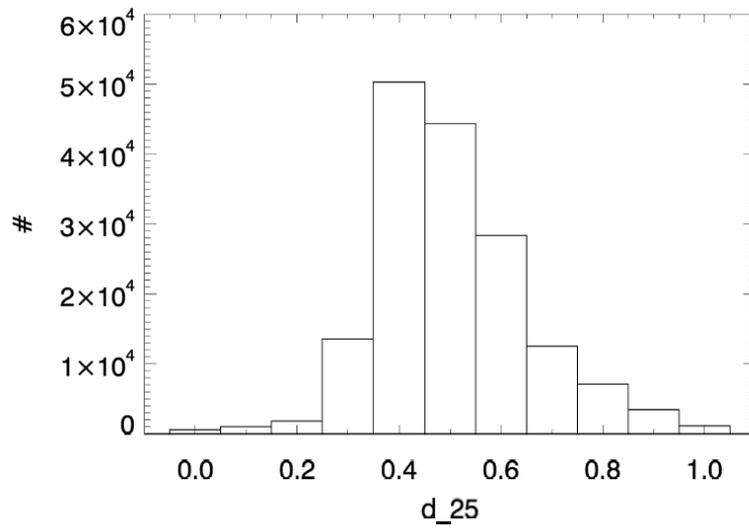


Figura 4.7: Distribuição do tamanho da galáxia, $\log d_{25}$ (ver Tabela 3.5).

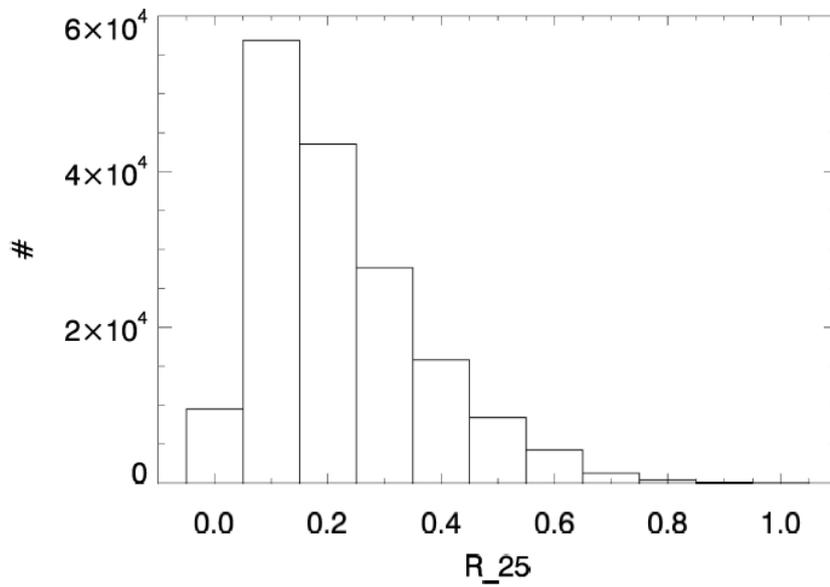


Figura 4.8: Distribuição do tamanho da galáxia, $\log r_{25}$, que representa a razão dos comprimentos do maior para o menor eixo da galáxia.

4.3.2 Aplicação do Método

Em uma primeira etapa foi realizado o cruzamento de Sistemas do Tipo-M51 previamente conhecidos, ou descartados, ou seja, do CGM51A (ver Capítulo 3) para essa região, foram encontrados 22, 71 e 29 galáxias rejeitadas, possíveis M51 e do Tipo-M51, respectivamente. Esses sistemas foram todos descartados da busca por novos sistemas.

Um outro aspecto consiste em identificar-se na amostra do Catálogo Hyperleda diretamente essas galáxias, ou seja, por meio da simples comparação entre as coordenadas dos objetos previamente identificados com as do Hyperleda. Esse procedimento foi realizado considerando-se um raio de procura de 10 segundos de arco, e foram identificadas 16, 70 e 26 galáxias rejeitadas, possíveis M51 e do Tipo-M51, respectivamente, sendo esses números resultados da aplicação do método.

Em termos proporcionais a quantidade de rejeitadas é a que mais diminuiu, em relação às previamente identificadas, e isso ocorre devido ao fato de que alguns objetos rejeitados poderiam ser estrelas e não galáxias.

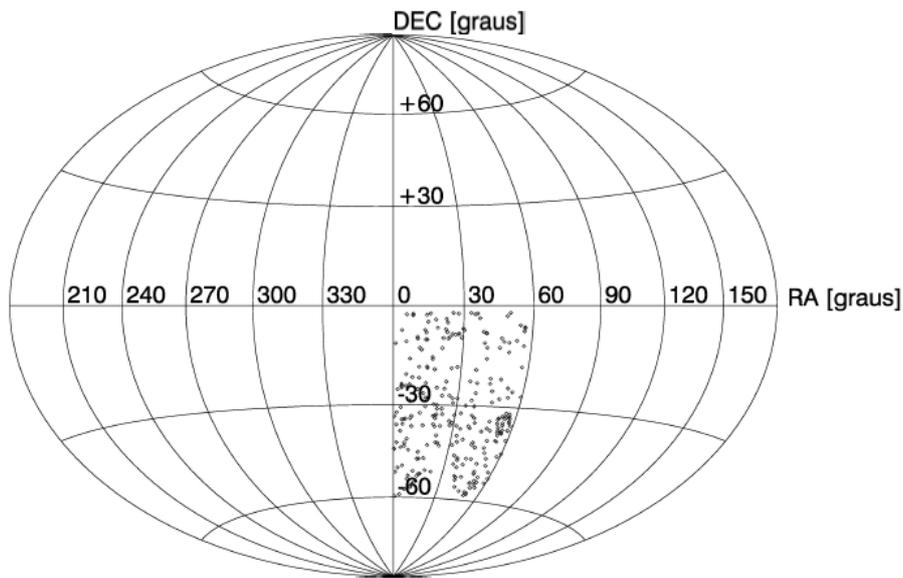


Figura 4.9: Distribuição das 268 candidatas a galáxias do Tipo-M51 obtidas pelo método.

Tendo em vista os critérios estabelecidos e descritos na seção anterior, foi feita a procura para candidatos a Sistemas do Tipo-M51, tendo como base, as galáxias da base do Catálogo HyperLeda. Conforme mencionado anteriormente, existem 327167 galáxias, sendo que 20977 galáxias têm tipo morfológico definido.

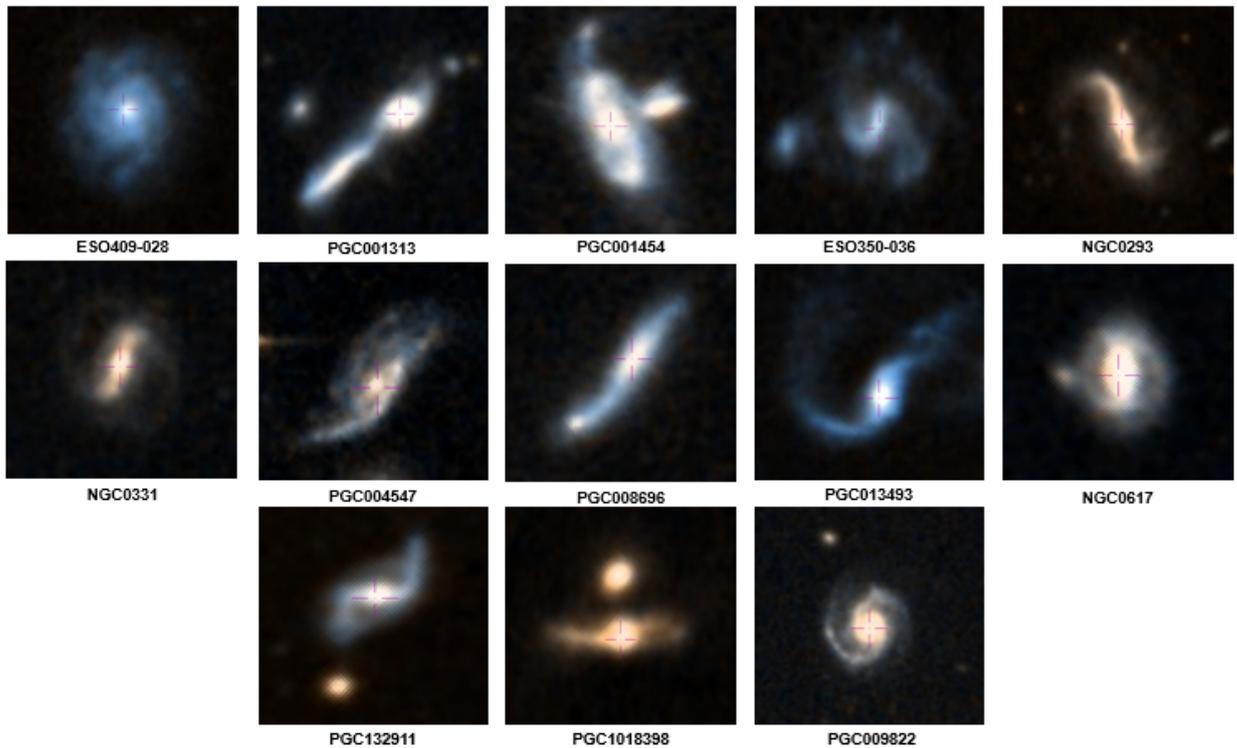


Figura 4.10: Candidatos a possíveis Sistemas do Tipo-M51 obtidos pelo Método.

Como apontado por Jokimäki et al. (2008), ver Tabela 3.3, aproximadamente 80% dos Sistemas do Tipo-M51 são compostos como sendo a galáxia principal, do tipo morfológico, de *Sa* até *Sc*, por essa razão, preferiu-se limitar a busca no programa para candidata a galáxia principal, apenas as galáxias pertencentes à esse tipo morfológico, ou seja, 7588 galáxias. Dessa forma, a amostra de candidatas a galáxia principal do Sistema do Tipo-M51, foi reduzida para 7588 galáxias.

Para cada uma dessas galáxias, o método identifica as galáxias que estavam a uma distância de um minuto de arco de seu centro, e que tivessem o tamanho angular até 50% da galáxia principal. Para cada uma dessas galáxias (galáxia principal), o programa utiliza todo o conjunto restante de galáxias, ou seja, as 327166, e calcula a distância de cada galáxia principal em relação a todas as demais, o mesmo procedimento é realizado em relação ao tamanho das galáxias.

Na medida em que uma galáxia era identificada, como possível pertencente a um Sistema do Tipo-M51 foi colocada uma *flag* na mesma, de forma, a essa galáxia não ser considerada na sequência como candidata a galáxia principal do Sistema do Tipo-M51.

Seguindo esse procedimento foram encontrados 268 candidatos a Sistemas do Tipo-M51, os quais são apresentados na Figura 4.9. Para cada um deles foram obtidas as suas respectivas imagens no *Aladin*, tendo como base o centro de coordenadas fornecidos pelo método.

O procedimento para a análise dessas imagens consistiu em realizar de maneira separada a classificação e análise das mesmas, de forma, a familiarizar-se com possíveis características, estrelas de *foreground*, interações para as quais a galáxia principal não é do tipo espiral, entre outros aspectos. As figuras 4.11 e 4.12 apresentam alguns casos de candidatos rejeitados após inspeção visual.

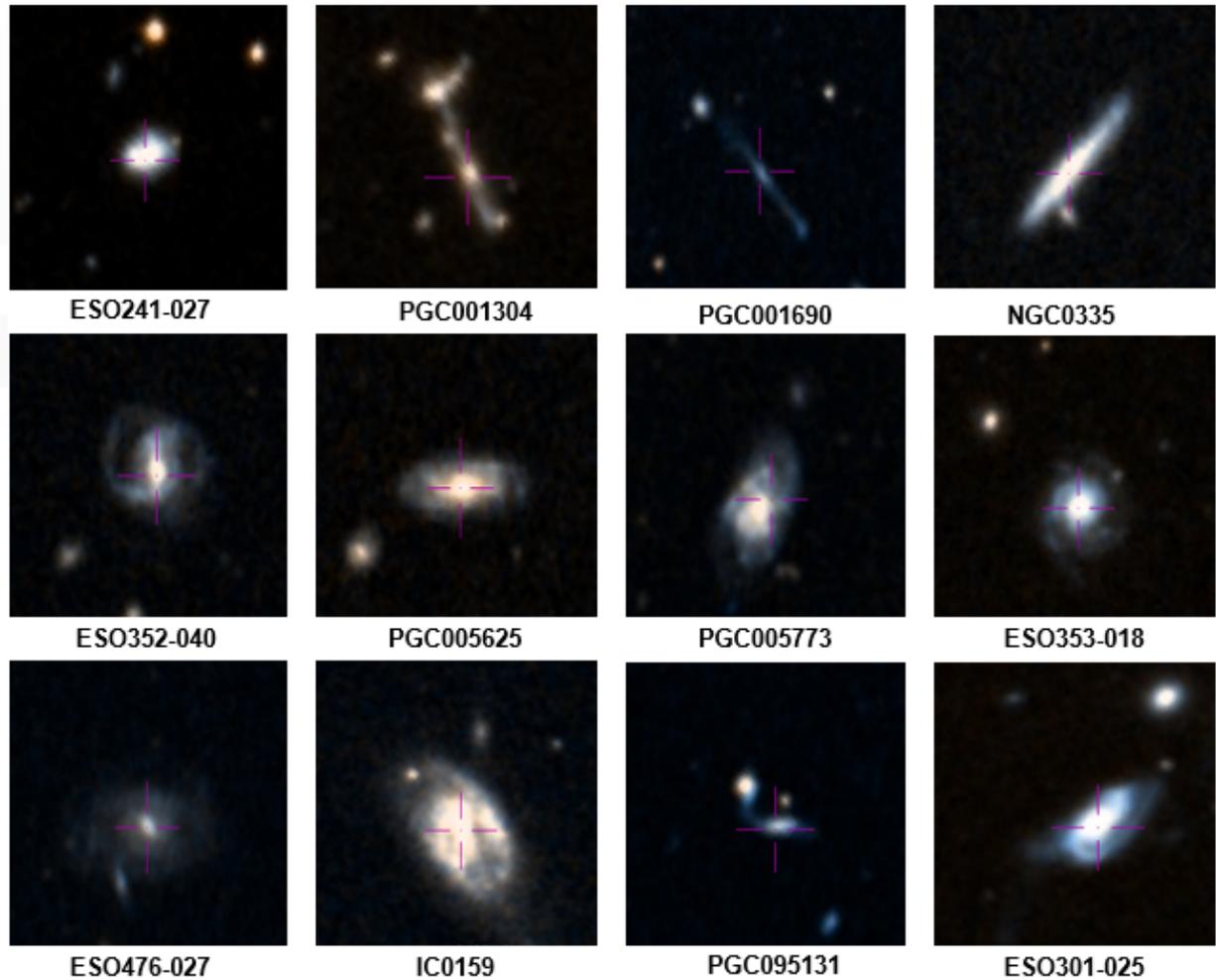


Figura 4.11: Galáxias rejeitadas pelo método. Imagens do *DSS*.

A grande maioria das classificações (aproximadamente 80%) coincidiram. As quais houve concordância, ou seja, as que o mestrando ou orientador não classificaram como candidato a Sistema do Tipo-M51, ambos analisaram novamente de forma conjunta as imagens visando chegar à um consenso, se a imagem poderia ser ou não considerada de um Sistema do Tipo-M51.

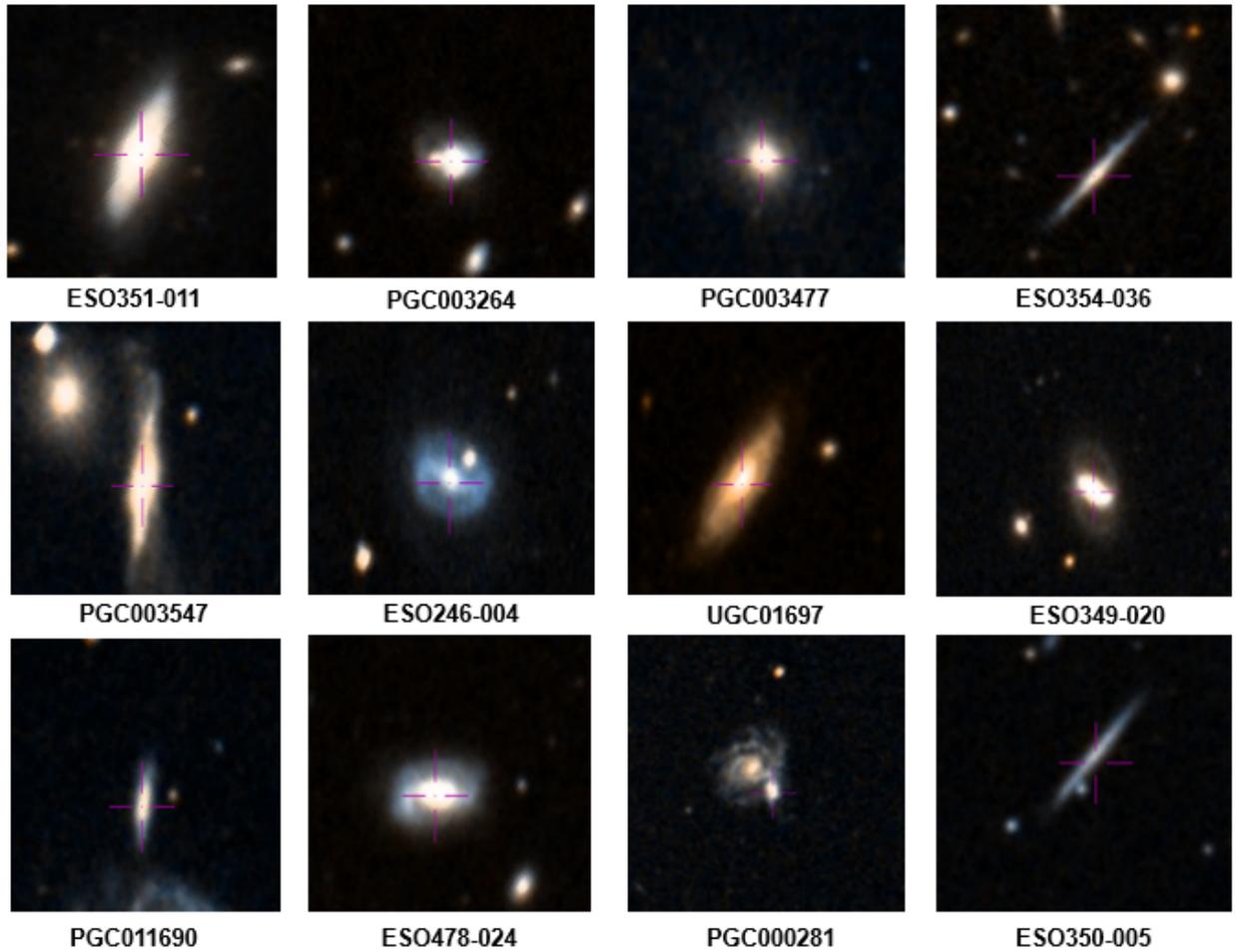


Figura 4.12: Galáxias rejeitadas pelo método. Imagens do *DSS*.

Dessa forma foram identificados 13 candidatos a Sistemas do Tipo-M51. Para cada um deles, foi feita uma identificação com uma *flag* com valor de 1 ou 2, sendo que no primeiro caso referente aos sistemas onde temos mais certeza de serem do Tipo-M51, e o outro um possível sistema.

A Figura 4.10 apresenta as 13 galáxias encontradas após aplicação do método, a princípio somente galáxias classificadas como *flag* igual a 2, portanto, candidatas a Sistemas do Tipo-M51. Essas galáxias candidatas apresentam forte indício de serem Sistemas do Tipo-M51, porém necessitam de uma análise mais detalhada de suas características, de modo a confirmar se são de fato ou não Sistema do Tipo-M51. As propriedades desses objetos serão discutidas no Capítulo 5.

Capítulo 5

Discussão dos resultados

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados para a identificação de Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul, assim como as propriedades dos 53 candidatos a Sistemas encontrados.

5.1 Aplicação do Método para o Hemisfério Sul

No capítulo anterior foram apresentados resultados da busca por Sistemas do Tipo-M51, para uma região do Hemisfério Sul com aproximadamente 3000 graus quadrados, sendo encontrados 13 candidatos a Sistemas do Tipo-M51.

Procedimento similar foi realizado para o restante do Hemisfério Sul, com aproximadamente 712527 galáxias com as características selecionadas no Catálogo HyperLeda. Cabe destacar que para essa região foram encontradas 40, 170 e 79 objetos, na base elaborada no presente trabalho de sistemas conhecidos, candidatos e rejeitados, respectivamente. O tempo de processamento foi de aproximadamente 4 minutos em um computador core i5 com 8 Gb de memória.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição em coordenadas equatoriais dos 819 candidatos a Sistemas do Tipo-M51, conforme pode ser visto, as ocorrências de candidatos distribuem-se por todo o Hemisfério Sul. Para cada um desses candidatos, por meio de suas coordenadas equatoriais foi adotado o mesmo procedimento do capítulo anterior, que consistiu em obter imagens usando o *Aladin*.

Cada uma dessas imagens foram analisadas, e ao final foram identificados 40 Sistemas do Tipo-M51, o que representa aproximadamente 5% do total selecionado pelo método sem a inspeção visual.

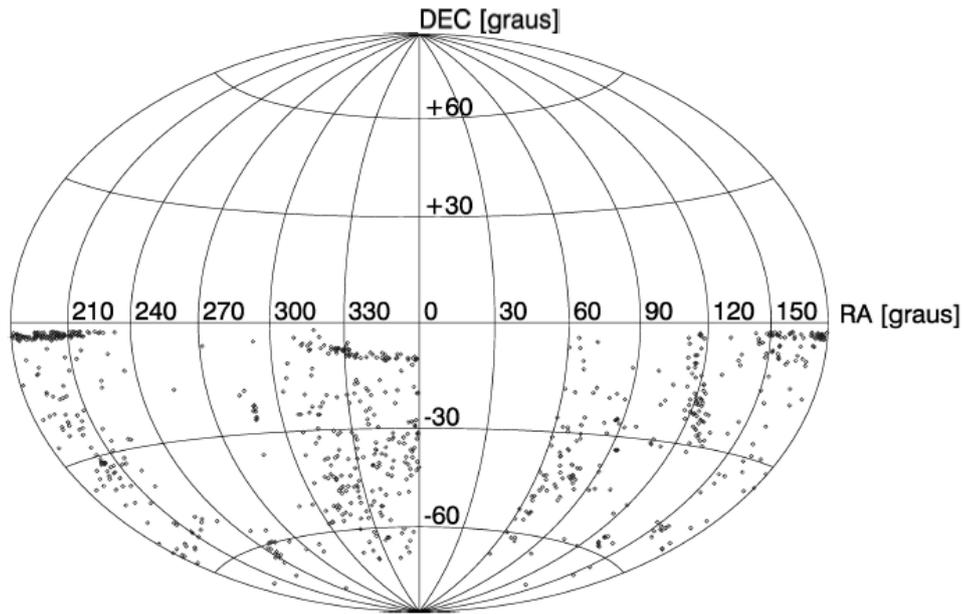


Figura 5.1: Distribuição das 819 candidatas à galáxias do Tipo-M51 obtidas pelo método sem a inspeção visual.

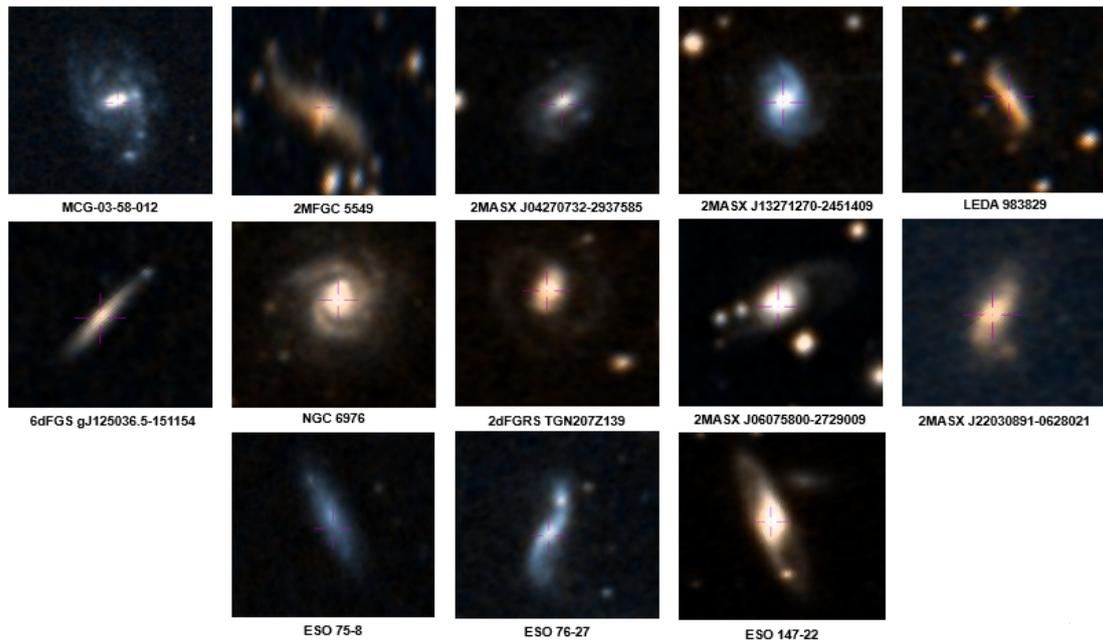


Figura 5.2: Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do *DSS*.

De forma similar à realizada no capítulo anterior, foi definida como Categoria 1 e 2, os

Sistemas para os quais a chance do Sistema ser de fato do Tipo-M51 é alta, necessita de maiores verificações, respectivamente. As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as 40 candidatas a Sistemas do Tipo-M51, encontradas na nova procura. Com as 13 identificadas na região anterior, temos um total de 53 candidatas a Sistemas do Tipo-M51.

A galáxia ESO 147-22 representa um percentual de pouco mais de 3% da amostra das candidatas a M51 e um percentual de 0.1% de toda amostra analisada, ou seja, esses números representam a dificuldade em encontrar objetos com a mesma peculiaridade dos objetos da Categoria 9 do Catálogo de AM87. Em uma próxima etapa, pretende-se analisar as imagens desses candidatos em outro comprimento de onda e/ou grande levantamento.

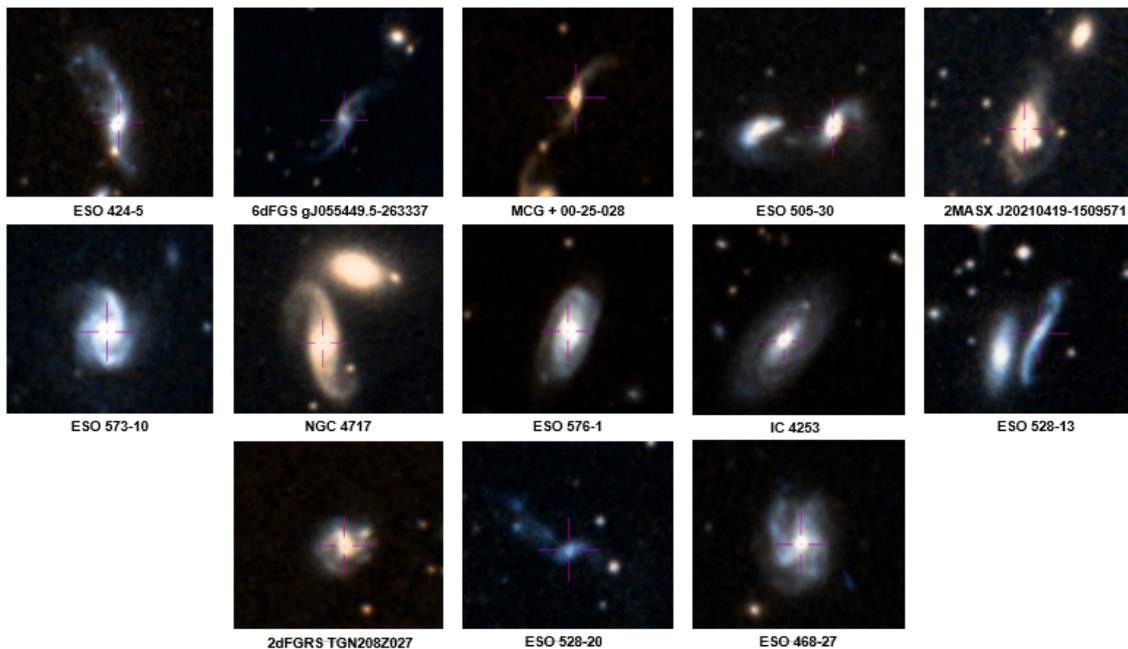


Figura 5.3: Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do *DSS*.

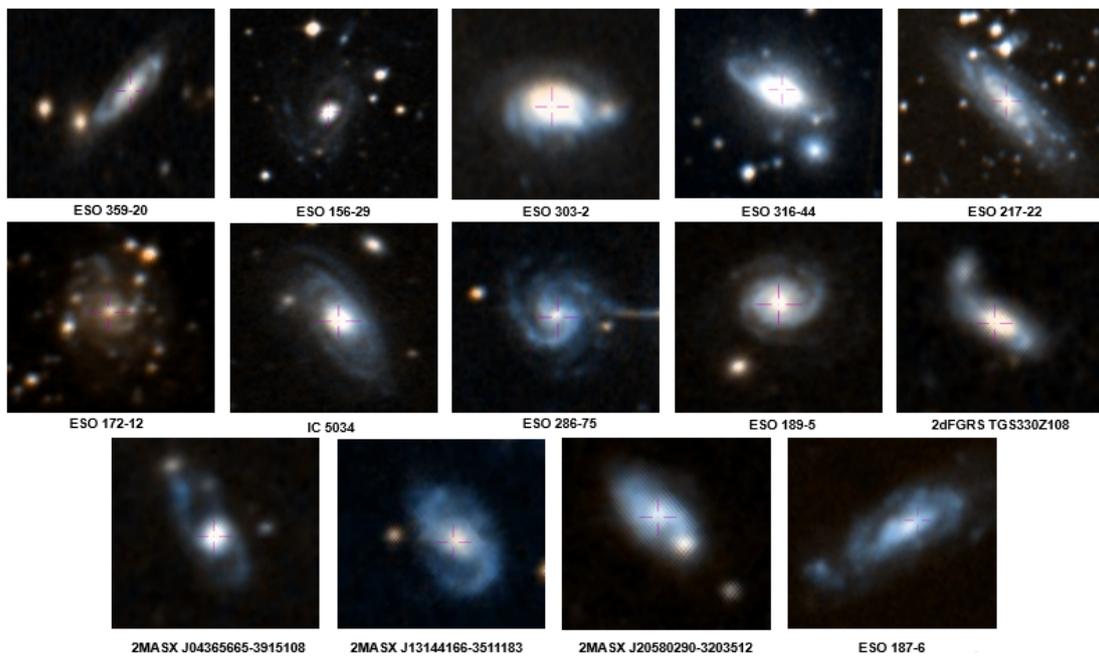


Figura 5.4: Candidatos a Sistemas do Tipo-M51 para o Hemisfério Sul. Imagens do *DSS*.

5.2 Análise das propriedades dos candidatos a Sistemas do Tipo-M51

Considerando-se os candidatos a Sistemas do Tipo-M51 obtidos pelo método, em uma primeira etapa (268 candidatos) para uma região do HS e posteriormente para a sua totalidade (819), perfazendo um total de 1087 candidatos. Ambos para uma etapa anterior à análise visual. Após a análise visual esses números foram de 13 e 40 candidatos totalizando, 53 novos candidatos a Sistemas do Tipo-M51.

Tendo em vista que os tipos morfológicos são fornecidos no Catálogo HyperLeda, em uma primeira etapa foi realizada uma análise do tipo morfológico para os 1087 candidatos (antes da inspeção visual) a Sistemas do Tipo-M51.

No tocante aos tipos morfológicos foram efetuadas três tipos de abordagem:

- tipo morfológico da galáxia principal (Tabela 5.1);
- tipo morfológico da galáxia companheira (Tabela 5.2);
- tipo morfológico da galáxia principal versus o da companheira (Figura 5.8).

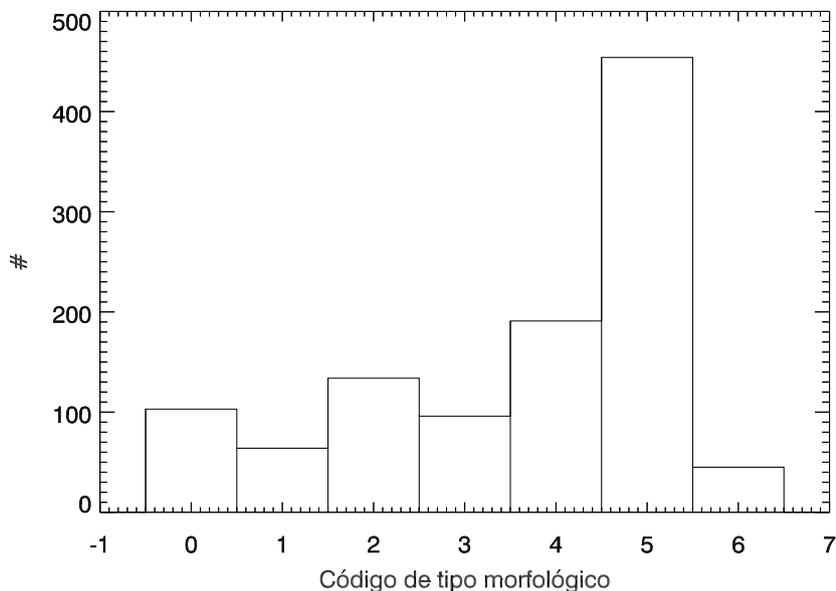


Figura 5.5: Distribuição dos tipos morfológicos dos 1087 candidatos a Sistemas do Tipo-M51 sem inspeção visual.

A Figura 5.5 apresenta os tipos morfológicos para os 1087 candidatos a Sistemas do Tipo-M51. Nota-se que o tipo que contém maior número de candidatos é o de

galáxias do Tipo 5 (*Sc*) com aproximadamente 450 candidatos, seguido pelo Tipo 4 (*Sbc*). Os demais tipos, à exceção do 1 e 6 (*Scd*) contém quantidades similares de candidatos.

Tabela 5.1: Total de galáxias por tipo morfológico (galáxia principal).

Tipo morfológico	Total	%
0 (<i>S0a</i>)	4	7.5
1 (<i>Sa</i>)	1	1.9
2 (<i>Sab</i>)	10	18.9
3 (<i>Sb</i>)	11	20.8
4 (<i>Sbc</i>)	12	22.6
5 (<i>Sc</i>)	14	26.4
6 (<i>Scd</i>)	1	1.9

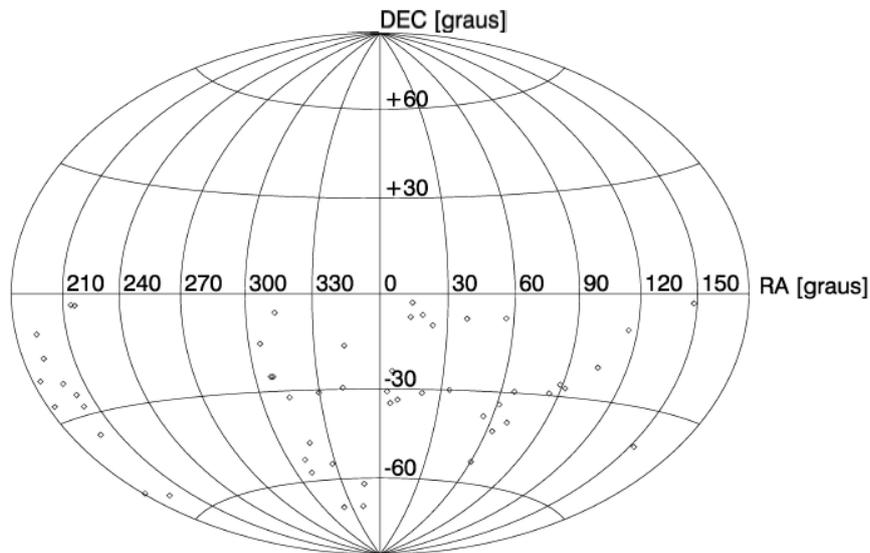


Figura 5.6: Distribuição em coordenadas equatoriais dos 53 candidatos a Sistemas do Tipo-M51.

No Capítulo 3 foi apresentada a Tabela 3.3 (adaptada de Jokimäki et al., 2008), na qual são descritas as quantidades de Sistemas do Tipo-M51 conforme o tipo morfológico. Nota-se nessa tabela que a aproximadamente 75% dos tipos são de sistemas

do tipo *Sb-Sc*, codificados entre os números 3 e 5 da Figura 5.5. A quantidade não desprezível de tipo 0 (*S0a*) na figura deve-se ao fato de nessa primeira seleção esses tipos poderem estar presentes. Na Tabela 3.3 esse tipo morfológico está incorporado ao total de outros sistemas, algo em torno de $13 \pm 3\%$.

Tabela 5.2: Total de galáxias por tipo morfológico (galáxia companheira).

Tipo morfológico	Total
-9 (não identificado)	43
3 ($S0^-$)	1
-2 ($S0^0$)	3
-1 ($S0^+$)	2
0 (<i>S0a</i>)	1
5 (<i>Sc</i>)	2
10 (<i>Ir</i>)	1

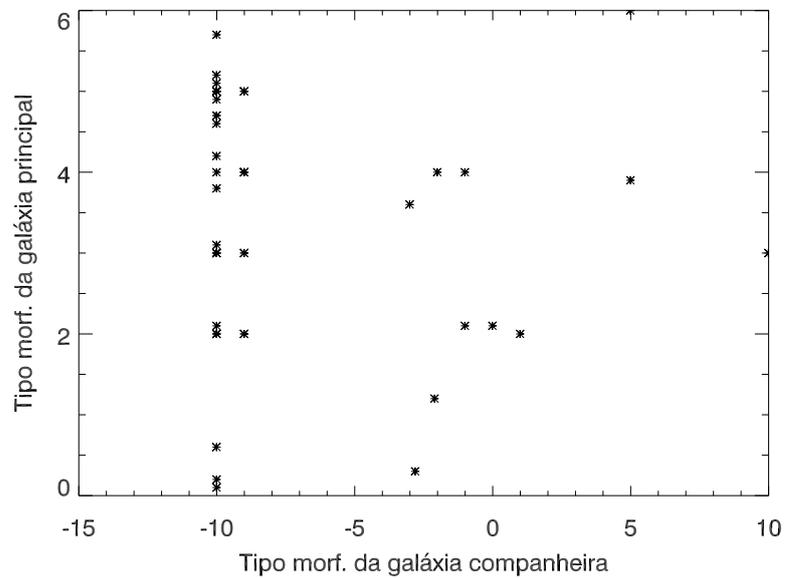


Figura 5.7: Relação entre o tipo morfológico da galáxia principal e o de sua companheira.

Entretanto, deve-se ter em vista que o Catálogo HyperLeda não fornece para um conjunto de galáxias, um tipo morfológico exato, estando esse sujeito à uma incerteza, podendo estar uma galáxia entre um tipo próximo no código de tipo morfológico. Esse catálogo fornece uma estimativa de erro para parte das galáxias e por essa razão essas galáxias estão presentes na seleção.

Outro aspecto importante, a ser visto, consiste no fato de que a Tabela 5.1 que apresenta a proporção dos tipos morfológicos obtidos no presente trabalho, é muito similar à Tabela 3.3, na qual conforme mencionado anteriormente, aproximadamente 75% dos tipos são de sistemas do tipo *Sb-Sc*, no presente trabalho, esse número representa aproximadamente 70% dos candidatos a Sistemas do Tipo-M51.

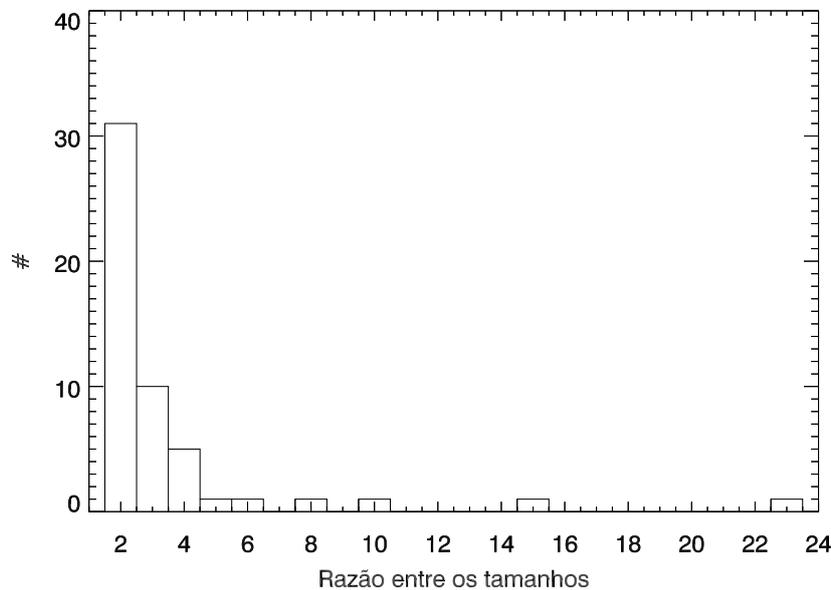


Figura 5.8: Razão entre o tamanho das galáxias principais e de suas companheiras.

De forma similar no presente trabalho, os tipos *Sab* representam aproximadamente 21% da amostra obtida no presente trabalho, enquanto que na Tabela 3.3, o valor é de aproximadamente 28%. Tendo em vista as incertezas na determinação dos tipos morfológicos e a barra de erros das classificações da Tabela 3.3, pode-se afirmar que os valores obtidos estão em boa concordância com o fornecido na literatura.

A distribuição dos 53 Sistemas do Tipo-M51 é apresentada na Figura 5.6. Nota-se que os candidatos distribuem-se por uma grande faixa de declinações, entretanto, com faixas mais restritas de ascensão reta.

Os tipos morfológicos das galáxias companheiras podem ser visualizados na Tabela 5.2 na qual pode ser visto que a maior parte das companheiras possuem tipo morfológico não identificado, e apenas 10 companheiras possuem tipo definido, distribuído de maneira esparsa, entre os diferentes tipos morfológicos, o que também pode ser visto na Figura 5.7.

A relação entre o tamanho da galáxia principal e a sua companheira pode ser visto na Figura 5.8 para a qual vê-se que a maior parte das galáxias companheiras possuem a razão entre 2 e 3 em relação ao tamanho da galáxia principal.

Capítulo 6

Conclusão e Perspectivas

A classificação automática de galáxias é uma tarefa com alto custo computacional, e requer a atenção para tipos específicos de galáxias. De forma particular as galáxias peculiares representam uma pequena fração, 0.01% das galáxias, segundo Nahim & Lahav (1996), que se enquadram no Esquema de Hubble.

Uma análise inicial do estudo sobre os Sistemas do Tipo-M51, para a elaboração da Dissertação, consistiu em realizar um levantamento minucioso dos dados dos catálogos *Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations* (AM87) e CGM51A (Jokimäki et al., 2008). Os dados desses catálogos serviram de base para verificar-se as propriedades dos Sistemas do Tipo-M51 identificados anteriormente, os que são candidatos e os que foram rejeitados.

As imagens dos possíveis e Sistemas do Tipo-M51, assim como dos rejeitados, foram obtidas e analisadas uma a uma, de forma a ter-se uma ideia clara do que seria encontrado quando o método fornecesse imagens das quais a classificação era desconhecida. Isso é importante, pois a grosso modo, pode ser considerado um treinamento da rede, feito a nível humano.

Os dados desses catálogos são muito úteis também para o cruzamento com os dados dos novos candidatos, evitando dessa forma apontar como um candidato a Sistema do Tipo-M51, pares de galáxias previamente identificados. Outro aspecto importante reside na obtenção de forma automática das imagens dessas galáxias por meio do *Aladin*.

Conforme apresentado na Introdução, os trabalhos relacionados ao estudo de Sistemas do Tipo-M51 derivam mais de uma inspeção visual, do que propriamente um estudo automático em grande escala, como o realizado na Dissertação.

Dessa forma, a compilação de novos Sistemas de galáxias do Tipo-M51, realizada na Dissertação, visa contribuir para os avanços nos estudos sobre o surgimento e evolução das galáxias por meio da análise de objetos interagentes, no caso particular, Sistemas do Tipo-M51.

As áreas da Computação envolvidas na Dissertação são o reconhecimento de padrões e da mineração de dados. A qual é feita, partindo de critérios ou pré-definidos por outros autores, ou estabelecidos no presente trabalho. Tendo como ponto de partida uma “base de dados bruta”, como é a do Hyperleda, com aproximadamente um milhão de galáxias, satisfazendo alguns critérios requeridos pelo método elaborado.

Na busca por imagens de Sistemas do Tipo-M51 são listados alguns critérios, os quais norteiam todo o procedimento para a obtenção de somente objetos que são do interesse do presente estudo, visando poupar tempo e recurso computacional. Uma inspeção visual pura e simples das imagens, mesmo que de uma pequena região do *DSS* demandaria alto tempo computacional além de recursos humanos.

O método faz uso das coordenadas, diâmetro angular, tipo morfológico e imagens do *DSS* de galáxias. Em uma primeira etapa o método faz uma seleção automática de eventuais candidatos a Sistemas do Tipo-M51, sendo necessário uma posterior inspeção visual nessas imagens.

O método foi aplicado para uma amostra de aproximadamente um milhão de galáxias no Hemisfério Sul do Catálogo HyperLeda. Foram encontrados aproximadamente 1100 candidatos a Sistemas do Tipo-M51, tendo como base:

- i) a galáxia principal ser do tipo morfológico espiral;
- ii) a galáxia companheira, estarem localizadas à uma distância angular de até um minuto de arco da galáxia principal;
- iii) tanto a galáxia principal como a companheira não pode ter sido identificada anteriormente como um Sistema do Tipo-M51, possível sistema ou ter sido rejeitada em análise anterior de outros autores;
- iv) o tamanho da galáxia companheira, não pode ser superior à 50% da galáxia principal.

Conforme descrito no Capítulo 3, existem outros critérios para verificar se um dado Sistema é de fato do Tipo-M51, como por exemplo, a galáxia companheira estar na extremidade dos braços da galáxia principal. No método elaborado, apenas uma inspeção visual possibilita essa análise. Dessa forma, foi efetuada a inspeção visual nos 1100 candidatos a Sistemas do Tipo-M51.

Após cuidadosa verificação, foram identificados 53 candidatos a Sistemas do Tipo-M51, as propriedades dos mesmos foram discutidas e apresentadas no Capítulo 5. Um aspecto importante é que a maioria (70%) dos candidatos a Sistemas do Tipo-M51 estão concentrados, entre os tipos morfológicos *Sb-Sc*, o que contrasta de maneira satisfatória ao descrito na literatura (Jokimäki et al., 2008), que é de 75%.

Considerando-se que temos aproximadamente um milhão de galáxias, e que os Sistemas do Tipo-M51, representam aproximadamente 3% da quantidade de galáxias

peculiares, sendo que essas são 0.01% das galáxias que podem ser enquadradas no Esquema de Hubble, seria esperado aproximadamente, como limite superior por volta de 200 candidatos a Sistemas do Tipo-M51 na amostra usada no estudo. A estimativa é superficial, pois aspectos de completeza e homogeneidade da amostra devem ser levados em conta, assim como da baixa fração de galáxias com tipos morfológicos definidos.

O método apresentado é um esforço inicial no sentido de identificar tais sistemas, que podem ser estudados de forma mais detalhada em outros estudos, envolvendo também a análise do *redshift* dessas galáxias, assim como um estudo em multi-banda e de todo o céu. Pretende-se implementar melhorias no método, tais como o uso de dados de outros grandes levantamentos astronômicos, assim como usar o reconhecimento de padrões diretamente em imagens, como é feito em outros trabalhos do Grupo de Astrofísica de Grandes Levantamentos da UEFS.

Apêndice A

Propriedades do Catálogo CGM51A

Descrevemos nesse Apêndice, na tabela a seguir, as propriedades de cada coluna das tabelas do Catálogo de CGM51A.

Tabela A.1: Descrição das tabelas do Catálogo CGM51A. Fonte: Catálogo CGM51A.

Coluna 1	Número de catálogo. Para galáxias principais com mais de um tipo M51.
Coluna 2	Designação da galáxia principal.
Coluna 3	Posição celestial, J2000 equatorial (retirada diretamente do banco de dados HyperLeda).
Coluna 4	Tipo morfológico da galáxia principal.
Coluna 5	Classe de luminosidade da galáxia principal.
Coluna 6	Velocidade radial heliocêntrica da galáxia principal (km/s).
Coluna 7	Redemoinho heliocêntrico da galáxia principal. Isso é igual à coluna 6 dividida por c .
Coluna 8	O diâmetro maior da galáxia principal (arcmin).
Coluna 9	Ângulo de posição do eixo principal da galáxia principal.

Coluna 10	Contagem do braço da galáxia principal. Isso foi estimado por um de nós (Orr).
Coluna 11	Magnitude B corrigida aparente total para a galáxia principal.
Coluna 12	Magnitude total da banda J de $2MASS$ para a galáxia principal.
Coluna 13	Magnitude total da banda H de $2MASS$ para a galáxia principal.
Coluna 14	Magnitude total da banda K de $2MASS$ para a galáxia principal.
Coluna 15	Valor IRAS 100 micra (Jy) para a galáxia principal.
Coluna 16	Extinção Galáctica na Banda B para a galáxia principal.
Coluna 17	Extinção interna devido à inclinação na banda B para a galáxia principal.
Coluna 18	Módulo de distância cinemática (de v_{vir} e $H_0 = 70 \text{ km / s / Mpc}$) para a galáxia principal.
Coluna 19	Magnitude absoluta da galáxia principal na banda B . Isso é igual à coluna 18 subtraída da coluna 11 ($B_{tc} - \text{mucina}$).
Coluna 20	Luminosidade da galáxia principal na banda B (em luminosidades solares).
Coluna 21	Designação da galáxia companheira.
Coluna 22	Tipo morfológico da galáxia companheira.
Coluna 23	Velocidade radial heliocêntrica da galáxia companheira (km/s).
Coluna 24	Redemoinho heliocêntrico da galáxia companheira. Isso é igual à coluna 23 dividida por c .
Coluna 25	O diâmetro maior da galáxia companheira (arcmin).
Coluna 26	Magnitude B corrigida aparente total para a galáxia companheira.
Coluna 27	Magnitude total da banda J de $2MASS$ para a galáxia companheira.
Coluna 28	Magnitude total da banda H de $2MASS$ para a galáxia companheira.
Coluna 29	Magnitude total da banda K de $2MASS$ para a galáxia companheira.
Coluna 30	Valor IRAS 100 micra (Jy) para galáxia companheira.

Coluna 31	Extinção Galáctica na Banda B para galáxia companheira.
Coluna 32	Extinção interna devido a inclinação em B-band para galáxia companheira.
Coluna 33	Módulo de distância cinemática (de v_{vir} e $H_0 = 70 \text{ km/s/ Mpc}$) para galáxia companheira.
Coluna 34	Magnitude absoluta da galáxia acompanhante na banda B. Isto é igual à coluna 33 subtraída da coluna 26 ($B_{tc} - m_{ucina}$).
Coluna 35	Luminosidade de galáxia acompanhante em B-band (em luminosidades solares).
Coluna 36	Relação de luminosidade da galáxia companheira e da galáxia principal. Isso é igual à coluna 35, dividida pela coluna 20.
Coluna 37	Separação angular entre a galáxia principal e o companheiro (arcmin).
Coluna 38	Posição Ângulo do acompanhante em relação à galáxia principal (graus). As posições são dadas como graus do norte da galáxia principal (0 graus é N, 90 graus é E, 180 graus é S e 270 graus é W).
Coluna 39	Diferença do ângulo de posição do companheiro e do ângulo de posição do eixo principal da galáxia principal (graus).
Coluna 40	$1 / S$ como descrito por K&R (2001). Isto é igual à separação angular dividida pelo semi-eixo maior da galáxia principal e, na prática, é a distância da companheira da galáxia principal em múltiplos do eixo semi-maior.
Coluna 41	Razão da incerteza do sistema como um sistema M51.
Coluna 42	Designações do sistema em diferentes catálogos.

Apêndice A

Referências Bibliográficas

Abazajian, K.; Adelman-McCarthy, J. K.; Agüeros, M. A. and et al., 2004, AJ, 128, 502-512

Amôres, E. B.; Lépine, J. R. D., 2005, AJ, 130, 659

Amôres, E. B.; Sodré, L.; Minniti, D.; Alonso, M. V. and Padilla, N.; Gurovich, S.; Arsenijevic, V.; Tollerud, E. J.; Rodríguez-Ardila, A.; Díaz Tello, J. and Lucas, P. W., 2012, AJ, 144, 127

Amôres, E. B.; López-Corredoira, M.; González-Fernández, C. e Moitinho, A.; Minniti, D. and Gurovich, S., 2013, A&A, 559, A11

Arp, H., 1966, APJS, 14, 1

Arp, H.; Madore, B. F., 1987, Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations, Vol I, Positions and Descriptions. Cambridge University Press. New York.

Balland, C.; Silk, J. and Schaeffer, R., 1998, APJ, 497, 541

Banerji, M.; Lahav, O.; Lintott, C. J.; Abdalla, F. B.; Schawinski, K.; Bamford, S. P. e Andreescu, D.; Murray, P.; Raddick, M. J.; Slosar, A.; Szalay, A.; Thomas, D. and Vandenberg, J., 2010, MNRAS, 406, 342

Blanton, M. R.; Bershad, M. A.; Abolfathi, B.; Albareti, F. D.; Allende Prieto, C.; Almeida, A.; Alonso-García, J.; Anders, F.; Anderson, S. F.; Andrews, B. and et al., 2017, AJ, 154, 28

Buta, R. J., 2011, ArXiv e-prints

Courteau, S., 1997, AJ, 114, 2402

Casteels, K. R. V.; Bamford, S. P.; Skibba, R. A.; Masters, K. L.; Lintott, C. J.; Keel, W. C.; Schawinski, K.; Nichol, R. C. and Smith, A. M., 2012, MNRAS, 429, 1051

Cerqueira, S. M. *Identificação de candidatas a galáxias interagentes no infravermelho próximo a baixos redshifts*. Feira de Santana, 2016, UEFS, CDU : 004:524.77

Domingue, D. L.; Sulentic, J. W.; Xu, C.; Mazzarella, J.; Gao, Y. and Rampazzo, R., 2003, AJ, 125, 555

-
- Dieleman, S.; Willett, K. W. and Dambre, J., 2015, MNRAS, 450, 1441
- Dreyer, J. L. E., 1888, MmMRAS, 49, 1.
- Elmegreen, D. M.; Elmegreen, B. G. and Bellin, A. D., 1990, APJ, 364, 415
- Fuentes-Carrera, I.; Rosado, M.; Amram, P.; Salo, H. and Laurikainen, E., 2007, A&A, 466, 847
- Günthardt, G. I.; Díaz, R. J. and Agüero, M. P., 2016, AJ, 152, 23
- Hancock, M.; Smith, B. J.; Struck, C.; Giroux, M. L.; Appleton, P. N.; Charmandaris, V. and Reach, W. T., 2007, AJ, 133, 676
- Jokimäki, A.; Orr, H. and Russell, D. G., 2008, APSS, 315, 249
- Lépine, J. R. D. and Mishurov, Y. N.; Dedikov, S. Y., 2001, APJ, 546, 234
- Klimanov, S. A.; Reshetnikov, V. P., 2001, A&A, 378, 428
- Klimanov, S. A.; Reshetnikov, V. P. and Burenkov, A. N., 2002, AL, 28, 579
- Knezek P. M., 1993, Ph.D. thesis, Univ.of Massachusetts
- Kuminski, E.; George, J.; Wallin, J. and Shamir, L., 2014, ASP, 126, 959
- Kuminski, E. and Shamir, L., 2015, A&A Supp. Series, 225, 336
- Laurikainen, E. and Salo, H., 2000, A&A Supp. Series, 141, 103
- Laurikainen, E. and Salo, H., 2001, MNRAS, 324, 685
- Lépine, J. R. D.; Mishurov, Y. N. and Dedikov, S. Y., 2001, APJ, 546, 234
- Mazzarella, J. M. and NED Team., 2007, ASP, 376, 153
- Naim, A. and Lahav, O., 1997, MNRAS, 286, 969
- Oliveira, K. S. O. F. and Saraiva, M. F. O. *Astronomia e Astrofísica*. 1. ed. Porto Alegre:[s.n.], 2014. 593 p
- Peng, C. Y.; Ho, L. C.; Impey, C. D. and Rix H. W., 2002, AJ, 124, 266
- Rampazzo, R.; Plana, H.; Amram, P.; Bagarotto, S.; Boulesteix, J. and Rosado, M., 2005, MNRAS, 356, 1177
- Reshetnikov, V. P. and Klimanov, S. A., 2003, AL, 29, 429
- Robin, A. C., Reylé, C.; Derrière, S. and Picaud, S., 2003, A&A, 409, 523
- Robin, A. C.; Marshall, D. J. ; Schultheis, M. and Reylé, C., 2012, A&A, 538, A106
- Robin, A. C.; Reylé, C.; Fliri, J.; Czekaj, M.; Robert, C. P. and Martins, A. M. M., 2014, A&A, 569, A13
- Schutter, A. and Shamir, L., 2015, AC, 12, 60

Shamir, L.; Holincheck, A. and Wallin, J., 2013, *AC*, 12, 60

Shamir, L. and Wallin, J., 2014, *MNRAS*, 443, 3528

Smith, B. J.; Kleinmann, S. G.; Huchra, J. P. and Low, F. J., 1987, *APJ*, 318, 161

Toomre, A. and Toomre, J., 1972, *APJ*, 178, 623

Toomre, A., 1974, *STI*, 58, 347

de Vaucouleurs, G.; de Vaucouleurs, A.; Corwin, Jr., H. G.; Buta, R. J.; Paturel, G. and Fouqué, P., 1991, *ARI*, III, 2091

Vorontsov - Velyaminov, B. A., 1959. *VV*, C, 0V

Vorontsov - Velyaminov, B. A., 1977, *A&A Supp. Series*, 28, 1-117

Vorontsov-Velyaminov, B. A.; Noskova, R. I. and Arkhipova, V. P., 2001, *A&AT*, 20, 717