

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

Patricia Martins de Novais

# **A Distribuição de Populações Estelares em Galáxias**

São Paulo

2013



Patricia Martins de Novais

# A Distribuição de Populações Estelares em Galáxias

Dissertação apresentada ao Departamento de  
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica  
e Ciências Atmosféricas da Universidade de  
São Paulo como requisito parcial para a obtenção  
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Laerte Sodré Jr.

São Paulo

2013



(...)pessoas habitadas são aquelas possuídas, de fato, por si mesmas, em diversas versões. Os habitados estão preenchidos de indagações, angústias, incertezas, mas não são menos felizes por causa disso. Não transformam suas inadequações em doença, mas em força e curiosidade. Não recuam diante de encruzilhadas, não se amedrontam com transgressões, não adotam as opiniões dos outros para facilitar o diálogo. São pessoas que surpreendem com um gesto ou uma fala fora do script, sem nenhuma disposição para serem bonecos de ventríloquos. Ao contrário, encantam pela verdade pessoal que defendem. Além disso, mantém com a solidão uma relação mais do que cordial.

Martha Medeiros (in Pessoas Habitadas)

*Para o Walisson, meu “Punk Encantado”!*



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer, e muito, o apoio da minha família nesse caminho em busca do conhecimento. Aos meus irmãos Anderson, Wellington e Jéssica por me apoiarem e sempre me ajudarem a criar forças para vencer as dificuldades diárias. A minha mãe, minha maior amiga, que foi paciente e carinhosa em todos os momentos de desesperos e angústias ao longo do trajeto até aqui. Ao senhor Orlando, meu falecido pai, dedico este trabalho, pois sei que ele ficaria muito orgulhoso de ver tudo o que a sua filha conquistou. Ao Walisson, meu grande amor, agradeço pelo companheirismo, pela força, compreensão e por andar de mãos dadas comigo, não só no caminho profissional como também em todos os outros caminhos!

Ao meu orientador, professor Laerte Sodré Jr., agradeço imensamente não somente pela orientação nesse trabalho, como também por todas as coisas que me ensinou desde meados de 2006, quando me aceitou como aluna de iniciação científica. Um orientador sempre presente e comprometido com um bom trabalho, com o meu crescimento profissional. Sem dúvidas, se hoje eu continuo na academia o mérito é do professor Laerte!

Aos amigos do grupo do professor Laerte: Ana Soja, Ana O'Mill, Ana Carolina, Marcus Duarte... Além de ser um grupo muito divertido, é um grupo muito unido. Sendo assim, muito obrigada pela ajuda e apoio, vocês foram essenciais em diversos momentos, contribuindo muito para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ainda, gostaria muito de agradecer aos colegas que me ajudaram direta ou indiretamente, tanto no desenvolvimento do trabalho quanto em questões do dia a dia. Entre esses amigos, gostaria de citar minha grande amiga e companheira de jornada Carla Trucolo, meus amigos Felipe Oliveira, Vinicius Busti, Nathália Cibirka, Daiane Seriacopi, Marcelo Rubinho, Aline Ribeiro, Walter Santos...

Agradeço também à agência financiadora CAPES (bolsa de mestrado PROEX) e, por último, mas não menos importante, agradeço ao departamento de Astronomia do IAG/USP, as secretárias, os técnicos e todos os que colaboraram para a construção dessa dissertação.



*“O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”*

João Guimarães Rosa

*“Nada de imitar seja lá quem for. Temos de ser nós mesmos. Ser núcleo de cometa, não cauda. Puxar fila, não seguir.”*

Monteiro Lobato



# Resumo

O estudo de populações estelares em galáxias é particularmente interessante, uma vez que são um registro fóssil de vários processos físicos associados com a formação e evolução das galáxias. Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares de uma nova abordagem para o estudo da distribuição de populações estelares no interior das galáxias.

A partir das magnitudes *ugriz* de uma amostra de galáxias, utilizou-se a análise PCA e a determinação de diversos parâmetros para estudar a distribuição espacial das populações estelares nas galáxias. Utilizando uma abordagem píxel a píxel, as populações estelares são investigadas através da aplicação de variadas ferramentas estatísticas, tais como Índices de Gini e Funcionais de Minkowski.

Esta abordagem é um passo a frente no estudo de galáxias, no sentido que a análise pode ser aprofundada em cada píxel da galáxia, ao invés de estudar a galáxia como um todo. A aplicação de tal tratamento aos píxeis de uma imagem permite a obtenção de estimativas quantitativas sobre a forma como as diferentes populações estelares são distribuídos dentro de uma galáxia, trazendo dicas sobre como elas crescem e evoluem.

Nossos resultados preliminares mostraram que uma metodologia píxel a píxel é eficiente no estudo das galáxias. Analisando 15 galáxias de tipos distintos, observou-se que as mesmas possuem populações estelares velhas no centro e novas nas regiões periféricas, corroborando com o cenário *inside-out* de formação de galáxias. Dada a potencialidade do método desenvolvido, pretende-se automatizá-lo para aplicação em dados de grandes *surveys*.



# Abstract

The study of stellar populations in galaxies is particularly interesting since they are a fossil record of various physical processes associated with the formation and evolution of galaxies. This work presents the preliminary results of a new approach to the study of the spatial distribution of stellar populations within a galaxy.

From the *ugriz* magnitudes of a sample of galaxies, we used the PCA analysis and determination of various parameters to study the spatial distribution of the stellar populations in galaxies. Using a pixel by pixel approach, the stellar populations are investigated through the application of various statistical tools, such as Gini indexes and Minkowski Functional.

This approach is a step forward in the study of galaxies, in the sense that the analysis can be deepened in each pixel of the galaxy, rather than studying the galaxy as a whole. The application of such treatment to the pixels of an image allows to obtain quantitative estimates on how the different stellar populations are distributed within a galaxy, bringing tips on how they grow and evolve.

Our preliminary results showed that a pixel by pixel approach is efficient in the study of galaxies. Analyzing 15 galaxies of different types, we observed that they have old stellar populations in the central regions and younger stellar population in the peripheral regions, corroborating the scenario inside-out formation of galaxies. Given the potential of the developed method, the aim is automate and to apply it in data of large surveys.



# Lista de Figuras

1.1	Espectros e linhas . . . . .	25
1.2	DR6 Espectroscopia e Imageamento . . . . .	32
1.3	Mapa tridimensional SDSS . . . . .	33
1.4	Conjunto de filtros - JPAS . . . . .	34
1.5	Cobertura espectral - CALIFA . . . . .	35
1.6	Cor-magnitude - CALIFA . . . . .	36
2.1	Amostra de dados: Early-types . . . . .	41
2.2	Amostra de dados: Late-types . . . . .	42
2.3	Amostra de dados: Late-types . . . . .	42
2.4	Amostra de dados - SDSS . . . . .	43
2.5	Amostra de dados - SDSS . . . . .	43
3.1	PCA do SDSS . . . . .	49
3.2	Galáxias do SDSS: Primeira componente principal versus cores . . . . .	50
3.3	PCA do SDSS - Idade e Metalicidade . . . . .	50
3.4	Exemplo de resultado: PCA. . . . .	52
3.5	Exemplo de resultado: PCA1 vs PCA2. . . . .	53
3.6	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	53
4.1	NGC2916 . . . . .	55
4.2	NGC2916 SDSS . . . . .	56
4.3	NGC2916 SDSS . . . . .	57
4.4	Mapa de Segmentação . . . . .	60
4.5	Mapa Friends of Friends . . . . .	61

4.6	Mapa de Distribuição espacial de cor . . . . .	62
6.1	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	70
6.2	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	71
6.3	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	72
6.4	Distribuição espacial das populações estelares . . . . .	73
6.5	Distribuição espacial das populações estelares . . . . .	74
6.6	Distribuição espacial das populações estelares . . . . .	75
6.7	Distribuição espacial das populações estelares . . . . .	76
6.8	Raios médios e cores . . . . .	78
6.9	Raios médios e cores da amostra completa . . . . .	79
6.10	Coeficiente de Gini . . . . .	81
6.11	Coeficientes de Gini da amostra completa . . . . .	82
6.12	Característica de Euler-Poincaré . . . . .	84
6.13	Característica de Euler-Poincaré normalizada da amostra completa . . . . .	85
A.1	Resultado: PCA1 vs cores . . . . .	106
A.2	Resultado: PCA1 vs cores . . . . .	106
A.3	Resultado: PCA1 vs cores . . . . .	107
A.4	Resultado: PCA1 vs cores . . . . .	107
A.5	Resultado: PCA1 vs cores . . . . .	108
A.6	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	109
A.7	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	109
A.8	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	110
A.9	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	110
A.10	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	111
A.11	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	112
A.12	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	112
A.13	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	113
A.14	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	113
A.15	Exemplo de resultado: PCA1 vs cores . . . . .	114
A.16	Raios médios e cores . . . . .	115
A.17	Raios médios e cores . . . . .	116



A.18 Raios médios e cores . . . . .	117
A.19 Coeficiente de Gini - Elípticas . . . . .	118
A.20 Coeficiente de Gini - Espirais . . . . .	119
A.21 Coeficiente de Gini - Espirais tardias . . . . .	120
A.22 Característica de Euler-Poincaré - Espirais tardias . . . . .	121
A.23 Característica de Euler-Poincaré - Espirais . . . . .	122
A.24 Característica de Euler-Poincaré - Espirais tardias . . . . .	123



## Lista de Tabelas

2.1	Amostra de Galáxias . . . . .	40
3.1	Componentes Principais do SDSS . . . . .	48
4.1	Estatísticas do céu da galáxia NGC2916 . . . . .	58
4.2	Calibração Fotométrica . . . . .	59
6.1	Raios médio, cor g-r média e variância . . . . .	77
6.2	Coefficientes de Gini . . . . .	80
6.3	Funcionais de Minkowski . . . . .	83



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	21
1.1 Populações Estelares . . . . .	22
1.2 Síntese de Populações Estelares . . . . .	23
1.2.1 STARLIGHT . . . . .	24
1.3 Distribuição das Populações Estelares e suas Propriedades . . . . .	26
1.3.1 Resultados do CALIFA . . . . .	30
1.4 Os Grandes <i>Surveys</i> Modernos . . . . .	31
1.4.1 SDSS/DR7 . . . . .	32
1.4.2 JPAS Survey . . . . .	33
1.4.3 CALIFA Survey . . . . .	34
1.5 Populações Estelares - Um outro <i>approach</i> . . . . .	36
2. <i>Base de dados</i> . . . . .	39
2.1 Amostra de galáxias do CALIFA . . . . .	39
2.2 Amostra de galáxias do SDSS . . . . .	40
3. <i>Populações Estelares</i> . . . . .	45
3.1 Análise de Componentes Principais - PCA . . . . .	45
3.2 PCA do SDSS . . . . .	48
3.3 PCA das cores em cada píxel . . . . .	51
3.4 Conclusões . . . . .	54
4. <i>Análise das Imagens das Galáxias</i> . . . . .	55
4.1 Extração, Redução e Pré-Processamento dos Dados . . . . .	56

4.2	Processamento . . . . .	57
4.2.1	S3P . . . . .	57
5.	<i>Estimadores Estatísticos da Distribuição de Populações Estelares</i> . . . . .	65
5.1	Raio Médio e Dispersão . . . . .	66
5.2	Coeficiente de Gini . . . . .	66
5.3	Funcionais de Minkowski . . . . .	67
6.	<i>Resultados</i> . . . . .	69
6.1	PCA e Populações Estelares Píxel a Píxel . . . . .	69
6.2	Distribuição Espacial de Populações Estelares . . . . .	71
6.3	Cores e Raios Médios . . . . .	76
6.4	Coeficiente de Gini . . . . .	80
6.5	Funcionais de Minkowski . . . . .	82
7.	<i>Conclusões e Perspectivas</i> . . . . .	87
7.1	Conclusões . . . . .	87
7.2	Perspectivas . . . . .	89
	<i>Referências</i> . . . . .	91
	<i>Apêndice</i> . . . . .	103
A.	<i>Apêndice - Resultados</i> . . . . .	105
A.1	PCA e Populações Estelares Píxel a Píxel . . . . .	105
A.1.1	Galáxias Elípticas . . . . .	105
A.1.2	Galáxias Espirais . . . . .	108
A.1.3	Galáxias Espirais Tardias . . . . .	111
A.2	Cores e Raios Médios . . . . .	114
A.3	Coeficientes de Gini . . . . .	117
A.4	Funcionais de Minkowski . . . . .	120

## Introdução

O complexo processo pelo qual as galáxias se formam e evoluem é, ainda hoje, um dos principais desafios da Astrofísica e da Cosmologia moderna (Cid Fernandes et al., 2007; Hopkins et al., 2009). Desde a época em que designávamos esses objetos simplesmente como *nebulosas* até os dias atuais, em que é possível obter imagens e espectroscopia de milhões de galáxias, com os enormes *surveys* modernos (Abazajian et al., 2009; Colless, 1999), nossa compreensão a respeito desses curiosos objetos tem mudado severamente. Se houve um tempo em que mal sabíamos determinar a sua natureza, hoje conseguimos explorar e estudar diversas de suas características e propriedades, do Grupo Local a altos *redshifts* (Ownsworth et al., 2012). Muito além dos poucos objetos estudados por Hubble (Hubble, 1920, 1922, 1926, 1929), hoje temos acesso a uma grande diversidade de objetos extragalácticos.

Mais do que descrever as galáxias, é necessário entender como tais objetos são formados e quais os mecanismos responsáveis por imprimir nelas as suas principais características, tanto morfológicas quanto estruturais. É de extrema importância, também, entender o modo pelo qual tais objetos astronômicos evoluem. Assim sendo, um dos principais objetivos do estudo das galáxias é entender a maneira como as populações estelares se formam, distribuem, evoluem e interferem dentro delas.

Uma vez que não é possível resolver individualmente cada estrela numa galáxia, exceto em galáxias muito próximas a nós, tais como as *Nuvens de Magalhães* e outros objetos do Grupo Local, para que seja possível estudar suas populações estelares, temos que lançar mão de outros observáveis, tais como seus espectros integrados. Através do estudo e análise de espectros integrados é possível entender e explorar características importantes das populações estelares, tais como idade, cinemática, composição química, histórias de formação

estelar, cores, dentre outros conceitos fundamentais úteis no entendimento da natureza das galáxias (Eggen et al., 1962; Freeman e Bland-Hawthorn, 2002).

O estudo das propriedades das populações estelares é uma ferramenta chave no entendimento e diagnóstico de certas previsões de efeitos evolutivos e para testar modelos teóricos sobre a formação e evolução de galáxias, uma vez que as populações estelares são registros fósseis dos processos que aconteceram nas galáxias (Barker et al., 2007). Diversos estudos, utilizando espectros integrados, foram realizados nos últimos anos levando a uma maior compreensão da natureza desses objetos. Entretanto, com a grande quantidade de *surveys* que estão em andamento ou sendo construídos e programados para os próximos anos (Ivezic et al., 2009; Sodré, 2012b,a; Sánchez et al., 2011) é possível ir além do estudo individual das galáxias, o que requer o desenvolvimento de novos métodos de análise.

Ainda que o estudo das popula oes estelares através do espectro integrado de galáxias como um todo seja uma ferramenta extremamente útil, e que tem se desenvolvido muito ao longo dos anos, tais esforços fornecem apenas informaçoes globais a respeito da galáxia, não trazendo detalhes sobre os processos internos e evolu oes seculares na mesma. Dessa forma, é necessário a elaboraçao de novos métodos e técnicas de análise que levem em conta a dimensão espacial das popula oes estelares.

## 1.1 Popula oes Estelares

As estrelas que constituem uma galáxia, em geral, não se formam isoladamente, mas sim em grupos de centenas ou milhares de membros. Essas aglomera oes de estrelas possuem propriedades muito características, de modo que é interessante estudarmos o que é compreendido como popula oes estelares.

Baade (1944) estudou as estrelas da galáxia Andrômeda e os satélites *M32* e *NGC205*, propondo então que as estrelas poderiam ser divididas em duas popula oes distintas, a saber, Popula ao I e Popula ao II. No caso da Via Láctea, as estrelas de Popula ao I foram classificadas como sendo as estrelas de baixas velocidades relativa ao Sol, quentes, jovens (as mais brilhantes com  $\sim 10^7 - 10^8$  anos), metálicas e localizadas principalmente nos braços galácticos. Com magnitudes absolutas variando entre  $-8$  e  $+3$ , as estrelas dessa popula ao são principalmente do tipo O, B, cefeidas tipo I, objetos em aglomerados abertos e associa oes de estrelas. Já a Popula ao II foi caracterizada como estrelas mais velhas



( $\sim 10^{10}$  anos) e frias, com altas velocidades e baixas metalicidades, situadas essencialmente no halo e no bojo da galáxia, sendo principalmente estrelas de aglomerados globulares, novas e nebulosas planetárias. As estrelas mais brilhantes da população II chegam a ser até 100 vezes mais fracas do que as estrelas mais brilhantes da população I.

As populações estelares de Baade (1944) foram definidas basicamente através do diagrama cor-magnitude, numa época em que muitas fases evolutivas eram mal conhecidas. Uma vez que é sabido que o diagrama cor-magnitude de um conjunto de estrelas que se formaram ao mesmo tempo reflete o estado físico da evolução dessas estrelas, tais como suas massas, idade e composição química, a divisão das estrelas de uma galáxia em populações tem um sentido físico intrínseco. Historicamente, Baade (1944) conjecturou que galáxias elípticas seriam constituídas puramente por estrelas de população II, enquanto que galáxias espirais do tipo Sa e Sb apresentariam ambas as populações estelares, com as estrelas de população I restritas a região dos braços.

Hoje sabemos que as populações estelares não são binárias, i.e, existe um contínuo de populações, mas o conceito introduzido por Baade (1944) é ainda útil na caracterização das propriedades das estrelas de uma galáxia.

As populações estelares possuem propriedades muito importantes que nos ajudam a entender sua formação e evolução e, conseqüentemente, a compreender seu papel nas galáxias. Tais populações carregam diversas propriedades físicas notáveis, dentre as quais podemos destacar principalmente sua idade, metalicidade, cor, taxas e históricos de formação estelar e distribuição espacial, sendo essa última particularidade um dos focos do presente estudo.

## 1.2 Síntese de Populações Estelares

Para obtermos informações a respeito da história da formação estelar de uma galáxia, utilizamos frequentemente como ferramenta o estudo de seu espectro integrado.

Em geral, um espectro é composto pelo contínuo, linhas de absorção e linhas de emissão. O contínuo do espectro de uma galáxia normal é produzido por suas estrelas; as linhas de absorção são produzidas pela absorção da luz das estrelas em suas atmosferas, ou, ainda, absorvidas pelo gás e poeira; já as linhas de emissão surgem de regiões ionizadas por estrelas jovens (regiões HII), choques no meio interestelar ou por núcleos ativos de galáxias. A figura 1.1, apresenta dois espectros de galáxias, uma espiral e outra elíptica, obtidos do

SDSS, além da identificação de algumas das principais linhas de emissão e absorção.

A luz integrada das galáxias é produzida pela mistura de todas as suas populações estelares (SP, do inglês *Stellar Population*), com idades e metalicidades que evoluem com o tempo e, a partir da decomposição do espectro nessas diversas populações, podemos compreender melhor as propriedades físicas da galáxia.

Apesar de ser um modo eficiente de estudar e entender as galáxias, o processo de recuperação de seu conteúdo através da decomposição do seu espectro é uma tarefa muito árdua. Para contornar esse problema, muitos métodos de síntese espectral têm sido desenvolvidos, os quais podemos separar em duas principais categorias: síntese empírica e em síntese evolutiva.

Trabalhos pioneiros de Beatrice Tinsley (Tinsley e Gunn, 1976; Tinsley, 1980), Hyron Spinrad e Benjamim Taylor (Spinrad e Taylor, 1972) estabeleceram as bases da síntese evolutiva levando em conta a evolução de um sistema estelar. Um conceito fundamental é o de Populações Estelares Simples (SSP, do inglês *Simple Stellar Population*), um conjunto de estrelas que se formaram ao mesmo tempo e com a mesma metalicidade. A população estelar de uma galáxia pode então ser considerada como a superposição de SSP's formadas ao longo da vida de uma galáxia. Para recuperar as informações a respeito das populações estelares, a síntese evolutiva faz uso de várias expressões analíticas para a função de massa inicial (IMF, do inglês *Initial Mass Function*), taxa de formação estelar e de bibliotecas com trajetórias evolutivas de estrelas. A partir dessas informações, calcula-se a evolução estelar das SSP's e se obtêm o espectro da galáxia em um tempo  $t$ , como sendo uma superposição do espectro dessas SSP's. Os trabalhos Bruzual e Charlot (2003) e Leitherer et al. (1999) são dois trabalhos clássicos de síntese de populações estelares via síntese evolutiva.

A técnica de síntese de populações empírica foi desenvolvida principalmente devido aos trabalhos de Morgan (1956), Wood (1966) e Faber (1972). Nesse método, um conjunto de características observáveis de uma dada galáxia é ajustada como sendo uma combinação linear de sistemas simples, tais como estrelas individuais ou SSP's, calculadas a partir da síntese evolutiva. O código de síntese espectral STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005), descrito a seguir, é um exemplo de síntese de populações estelares que utiliza o método empírico.

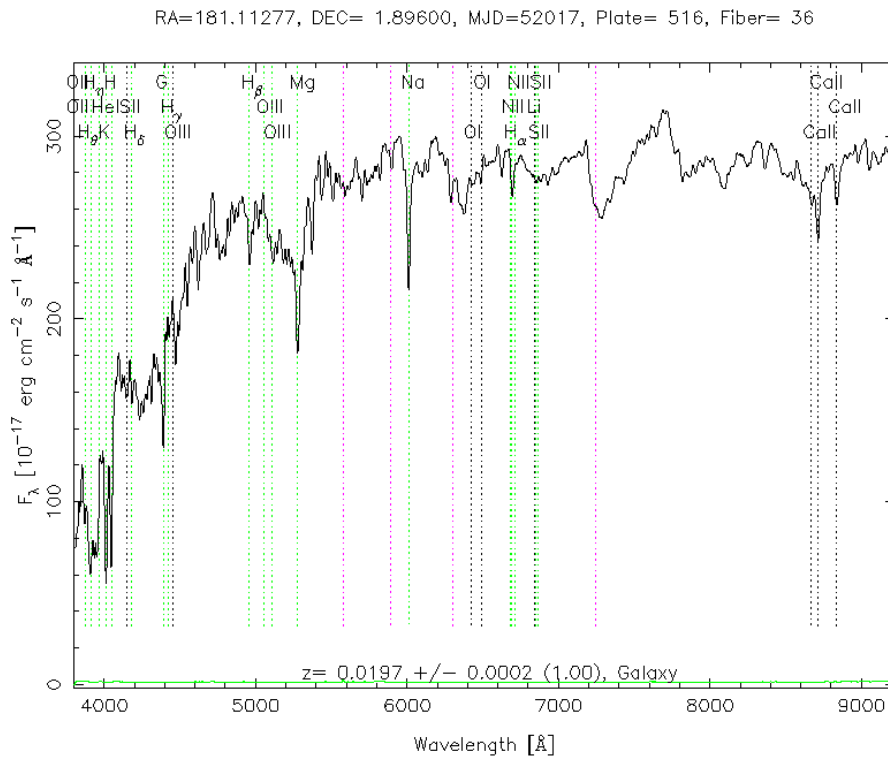
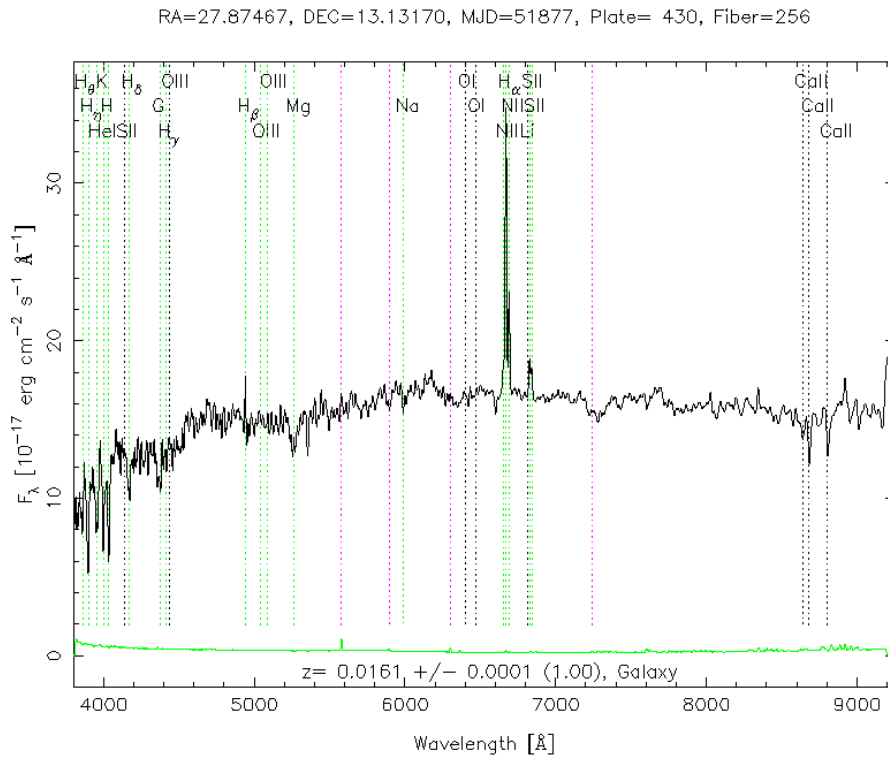


Figura 1.1: Espectros de uma galáxia espiral (acima) e outra elíptica (abaixo). Principais linhas características de absorção: Ca H+K (3934  $\text{\AA}$ , 3969 $\text{\AA}$ ), quebra em 4000 $\text{\AA}$ , H $\delta$  (4102 $\text{\AA}$ ), G-band (4308 $\text{\AA}$ ), H $\gamma$  (4342 $\text{\AA}$ ), H $\beta$  (4861 $\text{\AA}$ ), MgI (5180 $\text{\AA}$ ), NaI (5893 $\text{\AA}$ ), H $\alpha$  (6563 $\text{\AA}$ ). Principais linhas características de emissão: [OII] (3727 $\text{\AA}$ ), H $\beta$  (4861 $\text{\AA}$ ), [OIII] (4959 $\text{\AA}$ , 5007 $\text{\AA}$ ), H $\alpha$  (6563 $\text{\AA}$ ), [NII] (6548 $\text{\AA}$ , 6584 $\text{\AA}$ ), [SII] (6716 $\text{\AA}$ , 6731 $\text{\AA}$ )

### 1.2.1 STARLIGHT

O STARLIGHT <sup>1</sup> (Cid Fernandes et al., 2005) é um código de síntese espectral que fornece informações a respeito das populações estelares das galáxias, tais como históricos de formação estelar e enriquecimento químico, extinções e dispersão de velocidade central. Ele emprega a técnica de síntese espectral semi-empírica, onde os espectros observados das galáxias são ajustados a partir de uma combinação de  $N_*$  SSP's.

Em Cid Fernandes et al. (2005), o código utiliza uma base de  $N_* = 150$  SSP's obtidas de Bruzual e Charlot (2003), a biblioteca STELIB (Le Borgne et al., 2003), trajetórias evolutivas de Padova 1994 (Alongi et al., 1993; Girardi et al., 1996) e uma IMF dada por Chabrier (2003). As populações estelares simples são compostas por 25 idades ( $10^6 \leq t \leq 18 \times 10^9$  anos), 6 metalicidades ( $0.0001 \leq Z \leq 0.05$ ) e extinção estelar entre  $-1.0$  e  $4.0$ . Neste trabalho, serão utilizadas idades e metalicidades médias fornecidas pelo STARLIGHT, que são definidas como

$$\langle \log(t) \rangle_L = \sum_{i=1}^{N_*} \mathbf{x}_i \log(t_i)$$

$$\langle Z \rangle_L = \sum_{i=1}^{N_*} \mathbf{x}_i Z_i$$

que são ponderadas pelo vetor de luz  $\{\mathbf{x}\}$  das populações da base.

Os estudos do STARLIGHT levaram a vários resultados interessantes como, por exemplo, sobre o modo como a bimodalidade observada nas galáxias pode estar diretamente ligada a idade média estelar ponderada pela luz (Mateus et al., 2006); a evolução de galáxias em ambientes densos é conduzida principalmente pela ação ambiental (Mateus et al., 2007); a evolução da relação massa-metalicidade (M-Z), em galáxias com massas menores do que  $10^{10} M_\odot$  são conduzidas principalmente pela história de formação estelar (Vale Asari et al., 2009), dentre outros resultados.

## 1.3 Distribuição das Populações Estelares e suas Propriedades

Os estudos realizados com o uso de espectros integrados têm acrescentado significativas informações a respeito da formação e evolução das galáxias no universo. Em particular, di-

---

<sup>1</sup> <http://www.starlight.ufsc.br/>

versos trabalhos mais recentes têm investido esforços para estudar as propriedades das populações estelares espacialmente resolvidas dentro das galáxias. Estudar a distribuição espacial das populações estelares e suas propriedades é um modo viável de obter uma melhor compreensão sobre os processos e eventos experimentados pelas galáxias (Gargiulo et al., 2012). Estudar as variações espaciais das propriedades das populações estelares (idade, metalicidade, formação estelar, e até mesmo a presença de poeira) fornece, ainda, informações valiosas a cerca do cenário pelo qual as galáxias se formam.

No universo próximo, é bem estabelecido que as galáxias podem ser agrupadas em duas classes básicas: aquelas com morfologia do tipo disco, repletas de gás e sofrendo formação estelar (galáxias *late-types*); e aquelas que são dominadas por bojos, com pouco gás e cuja formação estelar cessou inteiramente (galáxias *early-types*) (Strateva et al., 2001; Kauffmann et al., 2003; Baldry et al., 2004; Mateus et al., 2006). É plausível postular que a bimodalidade da morfologia e das propriedades das galáxias esteja ligada a habilidade das mesmas em processar e transformar a massa de gás em estrelas, ou ainda em perdê-lo, tanto o gás contido em seu interior quanto nas regiões próximas a galáxia. Estudar as populações estelares resolvidas dessas galáxias tende a ajudar a entender o modo como o gás pode ser acretaado e processado pela galáxia, de modo a reabastecer ou não seu conteúdo estelar.

Galáxias do tipo *early-type* são explicadas através de 3 principais cenários de formação: cenário monolítico, cenário hierárquico e cenário “*inside-out*”. No cenário monolítico revisado, as galáxias *early-types* se formam pelo colapso de uma nuvem de gás que forma estrelas. A evolução dessas estruturas se dá então através do envelhecimento do seu conteúdo estelar (Larson e Tinsley, 1974; Katz, 1991; Arimoto, 1996; Kobayashi, 2004; Merlin e Chiosi, 2006). Neste cenário, devido ao poço de potencial, o gás rico em metais tende a fluir para o centro da galáxia, gerando uma população estelar mais rica em metais na região central do que nas regiões externas (gradiente radial de metalicidade negativo).

Dentro do cenário hierárquico, as galáxias *early-types* se formaram, em altos redshifts, através da fusão tanto de galáxias do tipo disco ricas em gás (fusão molhada, do inglês *wet merger*, Toomre e Toomre, 1972), quanto de galáxias quiescentes (fusão seca, do inglês *dry merger*, Bell et al., 2004). Na fusão molhada, a maior parte da massa estelar é formada através de surtos de formação estelar intensos ( $10\text{-}1000M_{\odot}/\text{ano}$ , Calzetti 2012) no centro da galáxias (Renzini, 2006), enquanto que na fusão seca o conteúdo estelar é basicamente a

mistura do conteúdo estelar pré-existente nas galáxias que se fundiram. Nessas situações, o perfil radial de idade e metalicidade do conteúdo estelar tenderia a ser bastante significativo (com estrelas mais novas e metálicas no centro) no caso de fusão molhada e plano no caso de fusão seca, onde há a diluição das variações radiais de idade e metalicidade (Di Matteo et al., 2009).

Por último, o cenário mais recente de formação “inside-out”, propõe que as galáxias se formam de dentro para fora (Daddi et al., 2005). Nesse contexto, as *early-types* são formadas como esferóides compactos ricos em gás. Em *redshifts* menores, as *early-types* sofrem fusões secas que vão adicionando camadas de baixa massa aos núcleos compactos, de modo que as regiões externas são mais novas que as internas (Hopkins et al., 2009; Wuyts et al., 2010). Nesse cenário, as fusões secas não misturam o conteúdo estelar, mas rearranjam as populações estelares dos satélites acretados nas regiões periféricas das galáxias.

Galáxias do tipo espiral *late-type* são objetos que possuem uma componente do tipo disco e uma componente tipo bojo, onde a primeira se sobressai sobre a última. O paradigma clássico assume que tais objetos sejam formados através do colapso dissipativo de uma nuvem de gás em rotação (Fall e Efstathiou, 1980). Nesse cenário, as galáxias *late-type* possuem perfil de brilho exponencial na direção radial, além de um perfil de idade radial aproximadamente constante ou decrescente com o raio galáctico (Lin e Pringle, 1987; Ferguson e Clarke, 2001; Naab e Ostriker, 2006).

Num primeiro momento, pode-se conjecturar que as galáxias do tipo disco possuem formação estelar contínua ao longo do seu disco. Entretanto, Huang et al. (2013) mostrou que há uma fração considerável de galáxias *late-types* de baixa massa estelar e baixa densidade superficial que tem experimentado surtos recentes de formação estelar, com taxas maiores do que a habitual de  $1 - 5M_{\odot}/ano$  (Calzetti, 2012), tanto nas regiões externas quanto nas regiões internas. Neste mesmo trabalho, inclusive, Huang et al. (2013) afirmam que cerca de um terço das galáxias massivas ( $\log M_{\star} > 10.8$ ) dominadas pela componente bojo experimentaram esses surtos de formação estelar recentes, mas apenas nas regiões externas ( $R > 0.7R_{90}$ ), pois a formação estelar nas regiões internas é suprimida em galáxias com razão bojo-disco grandes.

Bell et al. (2004) estudaram a correlação entre as idades e metalicidades com a posição das populações estelares em uma amostra de galáxias espirais, mostrando que o gradiente de idade nessas galáxias era maior do que o predito por modelos. Muñoz-Mateos et al. (2007),

estudando o perfil radial da taxa de formação estelar específica de espirais, mostrou que as galáxias formam estrelas com taxas relativamente mais altas nas regiões externas, quando comparadas com as regiões internas. Wang et al. (2011) evidenciou que o gradiente de cor UV/óptico das galáxias são fortemente correlacionados com seu conteúdo de gás atômico. Galáxias ricas em gás com altas massas de gás HI tem gradiente de cor mais forte do que galáxias de mesma massa estelar, tamanho e conteúdo de gás HI médio. Além disso, o gradiente de cor UV/óptico das galáxias tem uma dependência muito forte tanto com a extinção dada pela poeira quanto pela formação estelar que ocorreu há menos do que  $10^9$  anos (Kong et al., 2004).

Tanto Bell et al. (2004), quanto Muñoz-Mateos et al. (2007) e Wang et al. (2011) interpretam seus resultados como evidências do cenário de formação “inside-out”.

As galáxias irregulares, por sua vez, são sistemas com estrelas velhas, cuja luz é dominadas pelas estrelas jovens e regiões III. O que difere este tipo de objeto das demais galáxias *late-type*, basicamente, é o fato de não existirem braços espirais e a simetria imposta por tais subestruturas no disco das galáxias (Hunter, 1997), resultando numa aparência irregular. Entretanto, é justamente essa característica, a ausência de estrutura espiral, que faz desse tipo de galáxia um bom laboratório para o estudo das populações estelares e sua formação. Nesses objetos, pode-se investigar quais os mecanismos que regulam e distribuem o conteúdo estelar, uma vez que tais atividades não são conduzidas pela presença de braços.

As galáxias irregulares do tipo Sm são galáxias cuja estrutura espiral é fracamente identificada, enquanto que as do tipo Im são definidas pela ausência de estruturas organizadas. Ainda, as galáxias Im diferem das galáxias espirais também em termos das suas propriedades globais. As galáxias irregulares costumam ser mais azuis, menores, menos luminosas, menos massivas, mais ricas em gás, baixa metalicidade e menor quantidade de poeira. Uma vez que as irregulares possuem baixa metalicidade e grandes quantidades de gás, elas são entendidas como objetos menos desenvolvidos que as galáxias espirais, no sentido de que pouco do seu conteúdo interestelar foi convertido e processado pelas estrelas.

Dentre as galáxias irregulares, as Nuvens de Magalhães são duas galáxias muito próximas à nossa Galáxia e que, devido a isso, têm sido bastante estudadas (Dottori et al., 1996; van der Marel, 2001; van der Marel e Cioni, 2001). Maragoudaki et al. (1998, 2001) estu-

daram a distribuição espacial das populações estelares em ambas as Nuvens de Magalhães, encontrando que a regularidade e ordenação da distribuição espacial do seu conteúdo estelar se correlaciona com o aumento de sua idade. As estrelas mais jovens encontradas em tais galáxias são creditadas como resultado de surtos de formação estelar, embora não haja ainda um consenso sobre os possíveis processos que desencadearam tais surtos (Belcheva et al., 2011).

Cioni et al. (2000) utilizou observações das Nuvens de Magalhães no infravermelho para distinguir três grupos de objetos com diferentes idades médias. Estudando a distribuição espacial desses três grupos, Cioni et al. (2000) observou que eles possuíam comportamentos distintos: enquanto as estrelas mais jovens se distribuem irregularmente sobre as Nuvens de Magalhães, as estrelas mais velhas possuem uma distribuição suavemente regular. Com dados do 2MASS, Nikolaev e Weinberg (2000) e Gonidakis et al. (2009) analisaram o conteúdo estelar da Pequena Nuvem e Grande Nuvem, através de uma análise morfológica, identificando diferentes populações e estimando sua distribuição projetada, encontrando que as populações estelares possuem um perfil exponencial, onde coordenadas centrais das populações coincidem entre si, mas diferem das coordenadas centrais obtidas da distribuição espacial do gás. Possivelmente, as principais características observadas sejam consequência da interação entre as Nuvens de Magalhães e a nossa Galáxia.

Novas e promissoras perspectivas de estudar as populações estelares nas Nuvens de Magalhães serão alcançadas com os dados que serão ofertados pelo projeto GAIA (Spice, 2002; Kučinskis et al., 2002b,a). Com as observações dessa missão, será possível resolver as estrelas dessas galáxias, possibilitando um estudo aprofundado das suas populações estelares e suas propriedades.

### 1.3.1 Resultados do CALIFA

O projeto CALIFA, cujos detalhes técnicos serão dados na seção 1.4.3, é um levantamento que fará espectroscopia tipo IFU (do inglês *Integral Field Unit*) de cerca de 600 galáxias. Ele fornecerá informações espacialmente resolvidas para estudar os seguintes tópicos:

- Distribuição de massa nas galáxias.
- Populações estelares: história de formação estelar em galáxias early-type e disco;



relações entre as populações estelares e o meio ambiente.

- Propriedades do gás ionizado: traçadores da distribuição do gás ionizado e estimativas das abundâncias químicas do gás.
- Presença de núcleos ativos (AGN's).
- Medidas de propriedades cinemáticas: do gás, das populações estelares e das subestruturas.

Os dados divulgados no primeiro *release* do CALIFA (Data Release 1, Husemann et al., 2013), têm trazido novas informações importantes a cerca das populações estelares e suas propriedades nas galáxias do universo local. Dentre os trabalhos realizados foi analisada a dependência do crescimento da massa estelar com a massa das galáxias. Aplicando o código de síntese espectral STARLIGHT aos espectros do tipo IFU de 105 galáxias para derivar as propriedades das populações estelares, mostrou-se que as galáxias massivas se desenvolvem numa perspectiva “de dentro para fora” (*inside-out*). Com evidências de *downsizing*, observou-se que tanto as regiões internas quanto as externas crescem mais rápido conforme a galáxia for mais massiva (Pérez et al., 2013; García Benito et al., 2013). Já as galáxias com massas inferiores ao limite de  $\sim 7 \times 10^{10} M_{\odot}$  possuem formação estelar ativa em quase toda a sua extensão. Ainda, encontrou-se que o gradiente radial de metalicidade se correlaciona com a densidade de massa estelar, evidenciando que a densidade local influencia na evolução das galáxias (González Delgado et al., 2013).

Sánchez et al. (2013) estudou a relação massa-metalicidade (M-Z) tanto global quanto localmente para 150 galáxias do CALIFA. Com  $\sim 3000$  regiões HII resolvidas individualmente, derivou-se a abundância de oxigênio e a taxa de formação estelar associada com cada região e as correlacionou com a massa estelar. Corroborando com um cenário onde o gás é reciclado dentro das galáxias (modelo de caixa fechada), este estudo constatou que a relação M-Z também é satisfeita localmente, mas mostrou também que não existe nenhuma relação secundária entre massa estelar e a taxa de formação estelar, nem mesmo com a taxa de formação estelar específica.

Em um projeto preliminar, Ruiz-Lara et al. (2013) analisou os perfis de brilho superficial, distribuição de idade e metalicidade estelar, além das abundâncias de gás de uma amostra piloto de 5 galáxias espirais. Apesar de verificar comportamentos distintos para

as 5 galáxias, observou que, aparentemente, as distribuições de idade e metalicidade não diferem entre espirais normais e espirais barradas. Ainda que tal trabalho seja limitado, mostrou-se promissor no uso dos dados ofertados pelo CALIFA *Survey*.

## 1.4 Os Grandes Surveys Modernos

O estudo rigoroso da distribuição das galáxias e suas propriedades demanda *surveys* muito profundos. Até o início dos anos 1980, catálogos como o de *Shapley-Ames* (Shapley e Ames, 1932; Sandage e Tammann, 1980) e o *Reference Catalogue of Bright Galaxies* (de Vaucouleurs et al., 1964, 1976, 1995) eram pouco profundos e tratavam as galáxias de modo individual; já os catálogos como o de Aglomerados de Abell registravam aglomerados como um todo, entretanto continuavam não sendo suficientemente profundos.

Subsequentemente, houve um salto quantitativo na qualidade dos dados fornecidos por grandes *surveys*, que passaram a conter informações de *redshifts* e, conseqüentemente, ofereceram um panorama tridimensional do céu. Dentre esses surveys, podemos citar o *CfA Redshift Survey* (Huchra et al., 1983), o *Las Campanas Redshift Survey* (Trac et al., 2002; Marzke et al., 1999; Shectman et al., 1996) e o *2 degree Field Galaxy Redshift Survey* (Colless e Boyle, 1998; Díaz et al., 2005). A seguir, estão descritos três grandes *surveys*: um que revolucionou o modo como vemos o universo e que ainda produz muita ciência (seção 1.4.1) e outros dois *surveys* que irão causar uma nova mudança de paradigma quanto a nossa concepção de como as estruturas se formam (seção 1.4.3), além da possibilidade de contribuir para desvelar o caráter da energia escura (seção 1.4.2).

### 1.4.1 SDSS/DR7

Seguindo a tendência de busca por mais e melhores dados, o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) é um dos maiores e mais importantes *surveys* fotométricos e espectroscópicos já realizados. Este grande projeto foi o primeiro a usar detectores CCD ao invés de placas fotográficas para um levantamento em grande escala, o que assegurou qualidade, homogeneidade e precisão controlada dos dados obtidos. Ao longo de sua operação, o SDSS mapeou mais de um quarto do céu, fornecendo imagens multicoloridas e profundas de mais de 350 milhões de objetos distintos, além de criar um mapa de distribuição tridimensional de mais de 930.000 galáxias, mais de 120.000 quasares e 460.000 estrelas. Desde o *Early*

*Data Release* até o *Data Release 10* (também conhecido como SDSS III)(Aihara et al., 2011), o SDSS imageou mais de 8000 graus quadrados do céu em cinco bandas ópticas u, g, r, i, z e obteve espectros de galáxias e quasares em cerca de 7500 graus quadrados do céu no hemisfério norte e 750 graus quadrados do céu no hemisfério sul (Abazajian et al., 2009).

Na figura 1.2, apresentamos a projeção em coordenadas equatoriais da cobertura espectroscópica e fotométrica das regiões que o SDSS mapeou no DR7. Já na figura 1.3, exibimos um mapa da distribuição de galáxias do SDSS. As regiões cobertas pelo *Sloan Digital Sky Survey* até o DR7 foram escolhidas de tal forma a evitar a extinção galáctica produzida no plano de nossa Galáxia.

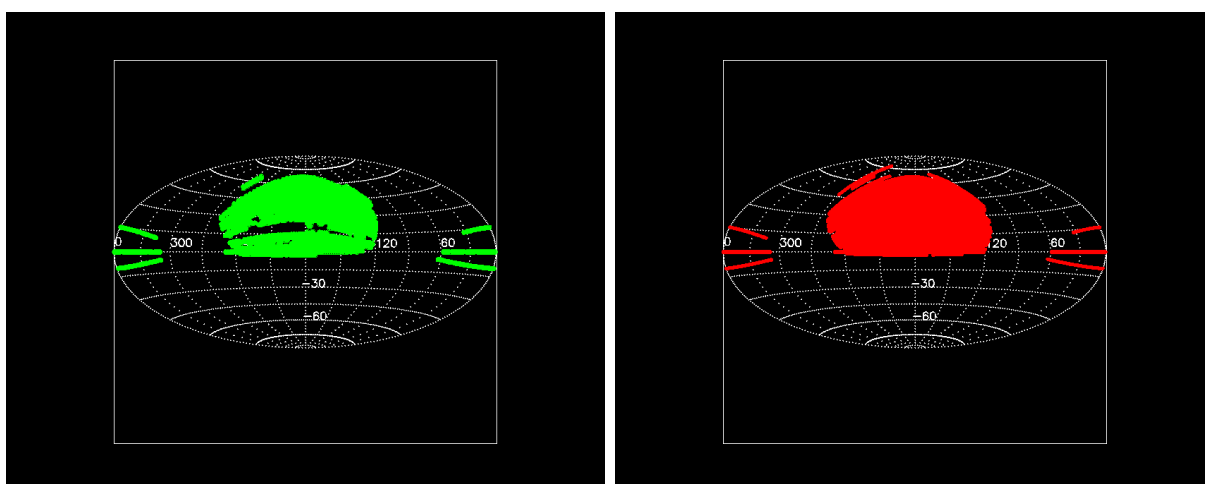


Figura 1.2: Levantamentos espectroscópico e fotométrico do DR7 do SDSS

#### 1.4.2 JPAS Survey

Elaborado inicialmente com o objetivo de detectar Oscilações Acústicas de Bárions (BAO's), o projeto *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS) consiste de um levantamento a partir de um novo observatório astronômico e que irá mapear mais de 8000 graus quadrados do céu com 56 filtros. Este novo levantamento é uma colaboração entre astrônomos espanhóis e brasileiros.

Com uma combinação de dois telescópios com grande campo de visão, um de 2,5m para o levantamento e outro de 0,8m para calibração, um conjunto de 14 CCDs de grande formato e um sistema de 54 filtros estreitos e 2 filtros largos, o J-PAS irá produzir imagens

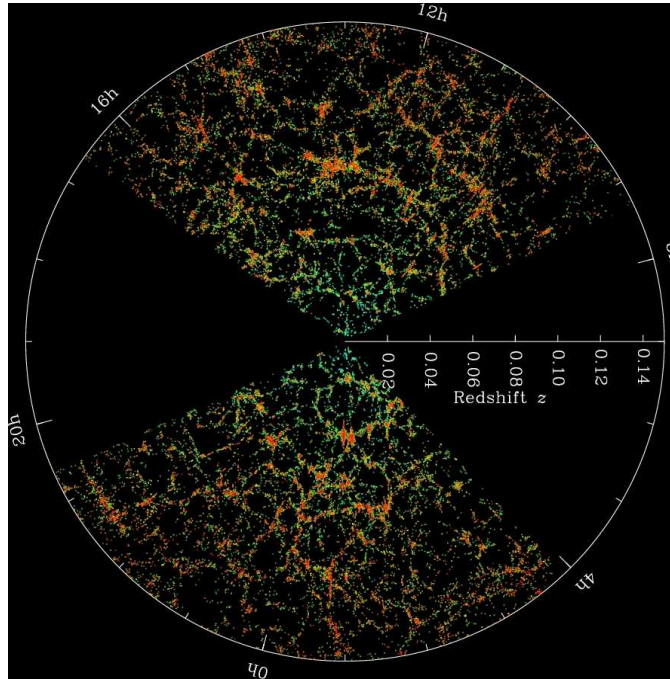


Figura 1.3: Mapa tridimensional da distribuição espectroscópica de galáxias do SDSS. Cada ponto representa uma galáxia com aproximadamente 100 bilhões de estrelas, e onde cada galáxia é colorida de acordo com a idade média de suas estrelas.

de alta qualidade e espectros de baixa resolução ( $R \sim 40$ ) para cerca de 1/5 do céu, cobrindo toda a região visível do espectro eletromagnético (3.500Å- 10.000Å).

A articulação das imagens de alta qualidade e os espectros de baixa fornecerá dados e informações sem precedentes das dezenas de milhões de objetos que serão observados. Além da motivação inicial, o levantamento do J-PAS poderá ser usado em uma infinidade de aplicações, tais como o estudo da distribuição de energia escura no universo, a formação e evolução de galáxias, mapear a estrutura da nossa Galáxia, estudar quasares, supernovas e muito mais.

A previsão é que o mapeamento tenha início a partir de 2014 e que sua duração seja de 5 a 6 anos. A figura 1.4 mostra a cobertura espectral pretendida com os 56 filtros.

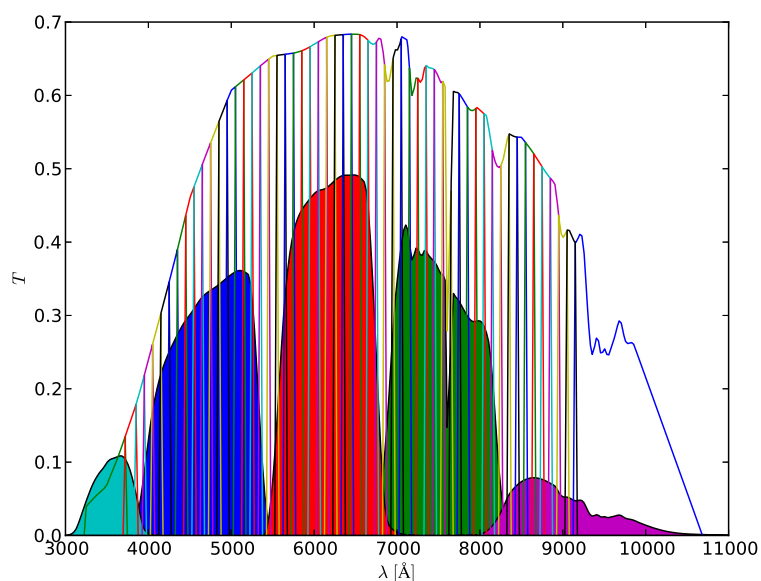


Figura 1.4: Definição teórica do conjunto de filtros do J-PAS. As regiões pintadas de azul, verde, vermelho, azul claro e magenta representam os filtros *ugriz* do SDSS e as curvas coloridas vazadas representam os 56 filtros do J-PAS, sendo o 1º e o último filtros de banda larga. (Figura cedida gentilmente por William Schoenell.)

### 1.4.3 CALIFA Survey

O *Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey* (CALIFA) é um grande projeto que está sendo realizado pelo Centro Astronômico Hispano-Germânico no observatório Calar Alto, onde serão obtidos espectros espacialmente resolvidos de 600 galáxias locais, por meio de espectroscopia de campo integral (IFS, do inglês *integral field spectroscopy*, Sánchez et al. 2012). As observações do CALIFA estão sendo realizadas com o espectrofotômetro *Potsdam Multi Aperture Spectrograph* (PMAS<sup>2</sup>, Roth et al. 2005), que está instalado no telescópio Calar Alto de 3,5 metros e com um campo de visão hexagonal grande, de 74" × 64" (Verheijen et al., 2004; Kelz et al., 2006).

De uma amostra com 939 galáxias do DR7 do SDSS, foram observadas 600 galáxias, que foram selecionadas aleatoriamente, de acordo com as condições de observação. Utilizando a espectroscopia de campo integral, o *survey* realizado pelo CALIFA fornecerá uma grande e interessante quantidade de dados do tipo IFU de campo largo para as 600 galáxias. Com

<sup>2</sup> PMAS - Potsdam Multi Aperture Spectrograph, utilizado no modo PPAK, no qual as observações são feitas com um feixe de 331 fibras de ciência com um diâmetro de 2,7"/fibra cobrindo um hexágono de 72"/ de diâmetro.

os dados fornecidos pelo CALIFA será possível aprimorar os estudos de AGN, formação estelar, fontes de ionização, gradientes de metalicidade e idade de populações estelares, dentre outras importantes áreas da astrofísica moderna.

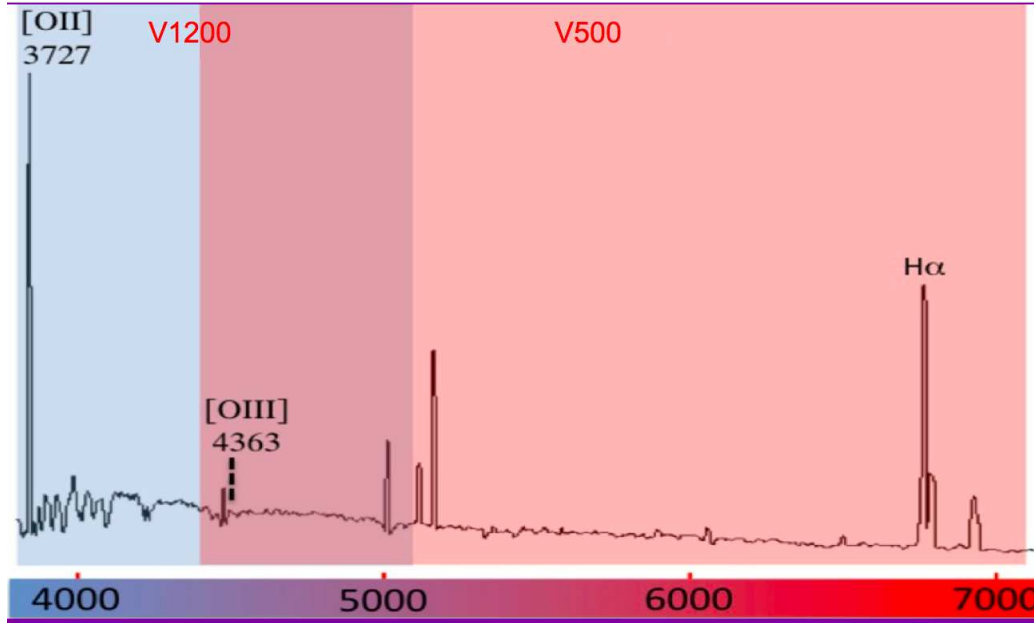


Figura 1.5: Cobertura espectral do CALIFA Survey: a região azul, vermelha e a região de sobreposição das duas bandas. Figura extraída de Marino et al. (2012)

As galáxias da amostra do CALIFA estão no universo local, com seus *redshifts* no intervalo  $0,005 < z < 0,03$ . A cobertura espectral se estende de  $3500\text{Å} \sim 7000\text{Å}$ , numa cobertura sobreposta (figura 1.5), sendo que as observações na faixa do vermelho ( $4300\text{Å} - 7000\text{Å}$ ) foram realizadas com resolução espectral  $R = 850$ , enquanto que as observações na faixa do azul ( $3700\text{Å} - 5000\text{Å}$ ) tiveram resolução  $R \sim 1650$ .

As observações realizadas pelo CALIFA tiveram início em meados de 2010. A figura 1.6 mostra o diagrama cor-magnitude com as galáxias do DR1, com um mapa do fluxo na banda V, mapa da idade das populações estelares, da velocidade do gás e da distribuição de  $H\alpha$  (zoom no canto esquerdo da imagem).

### 1.5 Populações Estelares - Um outro approach

Visto a importância do entendimento a respeito das populações estelares e, ainda, a relevância de entendê-las espacialmente dentro das galáxias, este trabalho se propõe a criar e testar ferramentas quantitativas para a análise das distribuições espaciais das populações

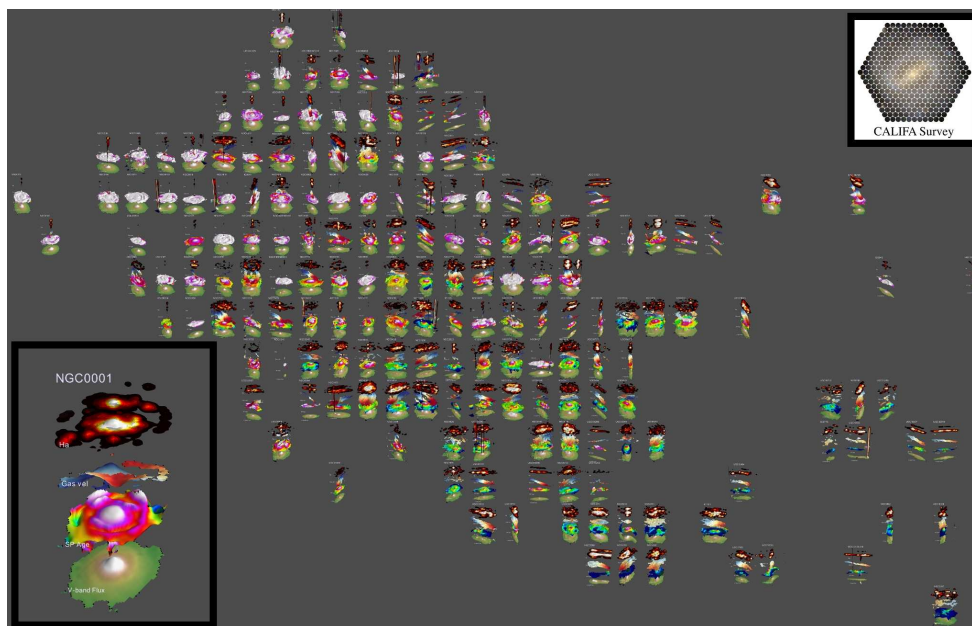


Figura 1.6: Diagrama cor-magnitude das galáxias já observadas pelo DR1 do CALIFA Survey. Figura obtida da página do *4th Busy Week* do CALIFA, em 15 de julho de 2013.

estelares no interior das galáxias. As técnicas e ferramentas desenvolvidas neste trabalho são um projeto piloto voltado aos dados que serão ofertados em breve pelo projeto *J-PAS*, que, dado sua natureza, irá permitir análises espectrais píxel a píxel.

Para tanto, o presente trabalho traz uma análise fotométrica de uma pequena amostra de galáxias de diversos tipos, obtidas a partir do SDSS. Com o uso das magnitudes *ugriz* do SDSS, foi feita uma classificação espectral a partir de cores e foram adotados diversas ferramentas estatísticas para quantificar e explorar a distribuição espacial das populações estelares no interior das galáxias.

Esta dissertação se estrutura da seguinte forma: No capítulo 2 serão definidas as amostras utilizadas no estudo; no capítulo 3 será definido o conceito de populações estelares utilizado nesse estudo, além da definição e explicação do conceito de análise PCA; no capítulo 4 estão descritos os métodos e procedimentos utilizados no processamento dos dados; no capítulo 5 são apresentados os estimadores estatísticos que adotamos para as análises e, por último, no capítulo 6 estão apresentados os principais resultados obtidos no estudo, os quais são sumarizados no capítulo 7.





# Base de dados

Neste capítulo será feita a apresentação e descrição dos dados utilizados nesta pesquisa. A seção 2.1 caracteriza a amostra de 15 galáxias obtidas do projeto CALIFA, enquanto a seção 2.2 apresentará a amostra de dados do SDSS que foram utilizadas na análise PCA.

### 2.1 Amostra de galáxias do CALIFA

Uma amostra de galáxias de diferentes tipos foi selecionada a partir dos dados do *First Data Release* do projeto CALIFA (Sánchez et al., 2012), um empreendimento astronômico que pretende realizar espectroscopia de campo integral (IFU) de cerca de 600 galáxias. O objetivo de se escolher galáxias deste projeto é que pretendemos, mais tarde, refazer a análise apresentada nessa dissertação usando os espectros medidos pixel a pixel pelo CALIFA. As galáxias do CALIFA foram selecionadas a partir do catálogo fotométrico do DR7/SDSS (Abazajian et al., 2009), de acordo com os seguintes critérios:

- $0,005 < z < 0,03$ ;
- $45'' \leq D_{25} \leq 80''$ , na banda  $r$  do SDSS;

O primeiro critério assegura que as galáxias estejam no universo local, enquanto que o critério quanto ao diâmetro isofotal  $D_{25}$  garante que as galáxias sejam angularmente bem resolvidas e que tenha um bom ajuste com o campo de visão do espectrógrafo utilizado (PMAS). Nesta dissertação, estamos trabalhando com dados do DR7/SDSS para 15 galáxias desse levantamento, com tipos morfológicos variados, a fim de testarmos nossos métodos. Na tabela 2.1 são apresentadas algumas informações a respeito das 15 galáxias escolhidas, tais como os nomes dos objetos selecionados, suas coordenadas em ascensão reta

e declinação, tipo morfológico obtido pelo NED (*The NASA/IPAC Extragalactic Database* (Helou et al., 1995)), além dos *redshifts* e magnitudes de Petrosian nas bandas *ugriz* obtidos do DR7/SDSS. As imagens das galáxias foram agrupadas em elípticas e lenticulares E/S0 (figura 2.1), espirais SA/SB (figura 2.2) e espirais tardias (figura 2.3).

Tabela 2.1 - Nome, ascensão reta, declinação, tipo morfológico, *redshift* e magnitudes de Petrosian nas bandas *ugriz* das galáxias da amostra.

Galáxia	RA(J2000)	Dec(J2000)	Morfologia	Redshift	u	g	r	i	z
NGC6173	16:29:44.87	40:48:41.96	E	0.029	15.28	13.22	12.36	11.95	11.78
NGC6125	16:19:11.53	57:59:02.89	E	0.015	14.93	12.99	12.16	11.73	11.51
NGC6146	16:25:10.32	40:53:34.31	E?	0.029	15.29	13.35	12.55	12.11	11.88
NGC1349	03:31:27.51	04:22:51.24	S0	0.022	16.49	14.21	13.21	12.64	12.37
UGC05771	10:37:19.33	43:35:15.31	S0/a	0.025	16.02	14.14	13.26	12.83	12.57
NGC0776	01:59:54.52	23:38:39.39	SAB(rs)b	0.016	15.75	13.75	12.85	12.49	12.45
NGC2916	09:34:57.60	21:42:18.94	SA(rs)b?	0.012	14.87	13.19	12.63	12.32	11.97
NGC7819	00:04:24.50	31:28:19.22	SB(s)b	0.016	16.06	14.28	13.62	13.48	13.68
UGC03253	05:19:41.88	84:03:09.43	SB(r)b	0.013	15.68	13.81	13.14	12.77	12.66
NGC4185	12:13:22.19	28:30:39.46	Sbc	0.013	15.71	13.26	12.55	12.25	12.33
UGC00312	00:31:23.92	08:28:00.23	SB?	0.014	15.39	14.00	13.59	13.45	13.12
UGC05358	09:58:47.13	11:23:19.31	SB(s)b	0.0097	16.63	15.34	14.77	14.67	15.04
UGC09665	15:01:32.46	48:19:10.93	Sc	0.009	15.99	14.23	13.53	13.13	12.92
UGC10331	16:17:21.12	59:19:12.46	S pec	0.015	15.75	14.43	13.99	13.78	13.87
NGC3991	11:57:30.95	32:20:13.28	Im pec edge-on	0.011	14.86	13.92	13.55	13.42	13.40

## 2.2 Amostra de galáxias do SDSS

Muitos trabalhos têm mostrado que o uso de análises de componentes principais tem um grande potencial, uma vez que tal tipo de análise permite uma classificação espectral bastante acurada. Sendo assim, para mostrar a potencialidade deste método, foram selecionadas galáxias do DR7/SDSS (Abazajian et al., 2009) que atendessem aos seguintes critérios:

- Objetos com espectroscopia e cores;
- $0,005 \leq z \leq 0,03$ ;
- Raio de Petrosian na banda  $r \geq 25''$ ;

- *Flags* na banda r para evitar objetos espúrios.

Utilizando a ferramenta *CasJobs*<sup>1</sup> fornecida pelo SDSS, foi obtida uma amostra com 1497 galáxias do DR7/SDSS. Ainda, mesmo com o uso das *flags* na banda r, foram utilizados diagramas cor-magnitude e cor-cor (figuras 2.4, 2.5) para determinar restrições nas cores, a fim de remover possíveis *outliers*. Essas restrições foram as seguintes:

- $0.7 < u - g < 2.3$
- $0.1 < g - r < 1.0$
- $-0.3 < i - z < 0.6$
- $r - i > 0$

Assim sendo, 1396 galáxias foram selecionadas para a amostra final de galáxias do SDSS. No capítulo 3, iremos examinar estes dados no contexto da classificação espectral via análise PCA.

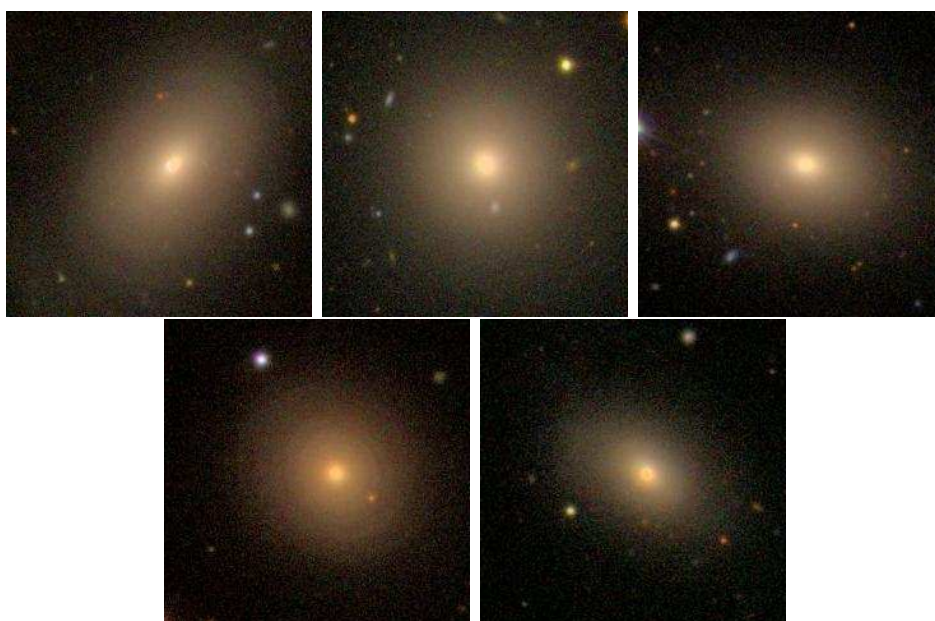


Figura 2.1: Galáxias elípticas e lenticulares da amostra. Imagens do SDSS/DR7.

<sup>1</sup> <http://skyserver.sdss3.org/casjobs/>

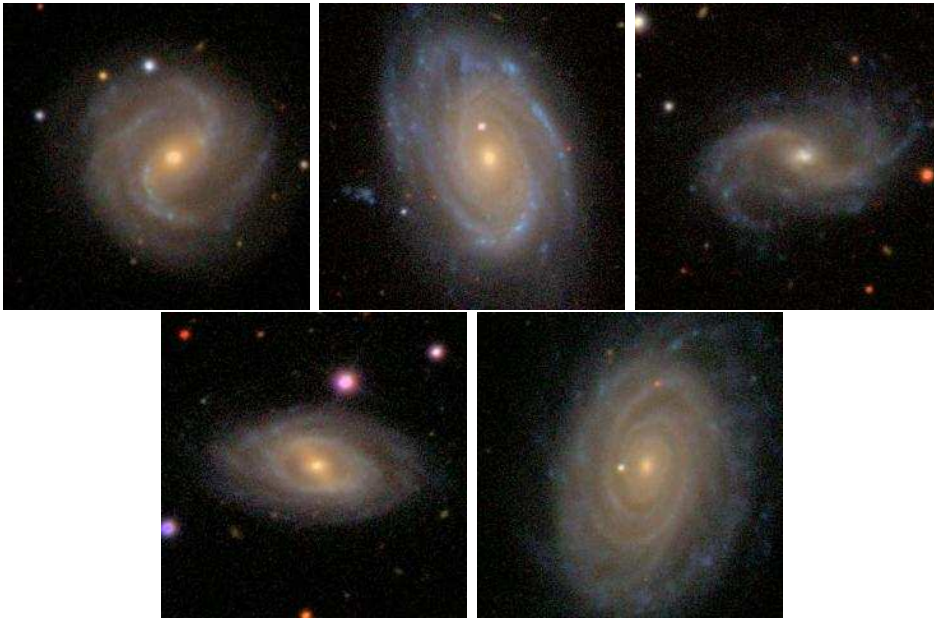


Figura 2.2: Galáxias espirais SA/SB da amostra. Imagens do SDSS/DR7.

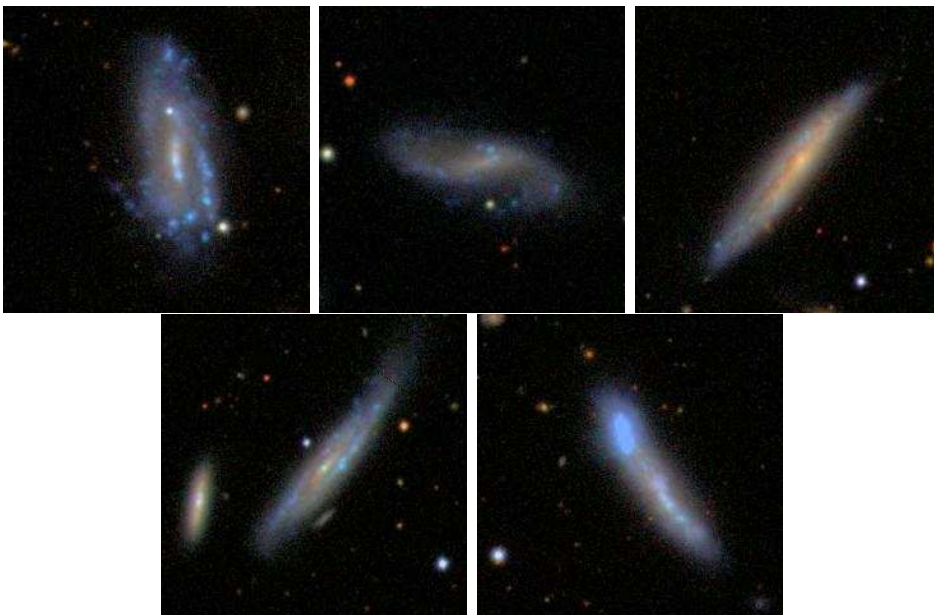


Figura 2.3: Galáxias espirais tardias da amostra, com os objetos irregulares e peculiares. Imagens do SDSS/DR7.

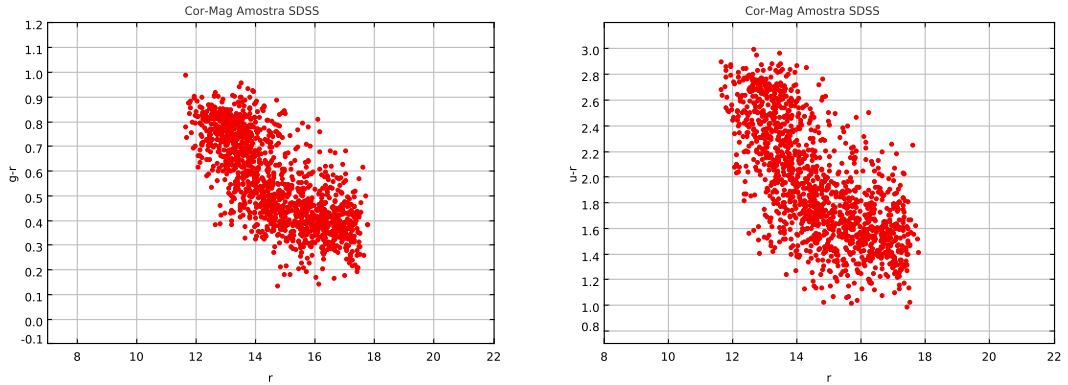


Figura 2.4: Diagramas cor-magnitude,  $g-r$  versus  $r$  e  $u-r$  versus  $r$ , para a amostra de galáxias obtidas a partir do DR7/SDSS.

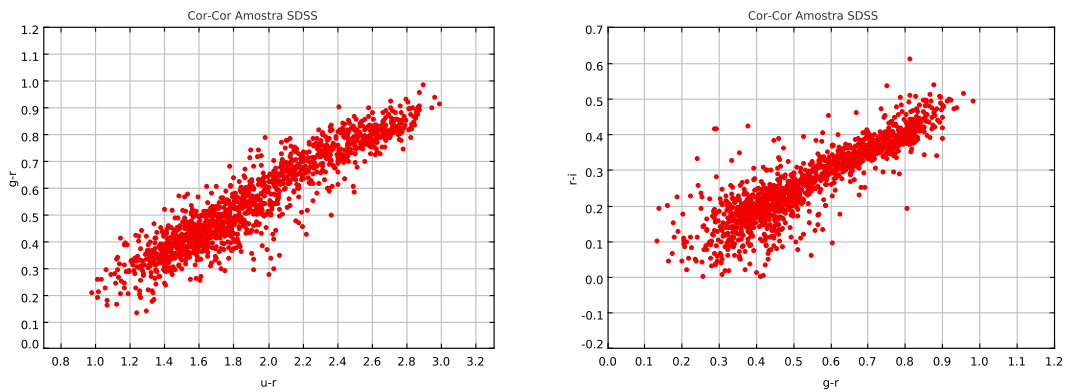


Figura 2.5: Diagramas cor-cor,  $u-r$  versus  $g-r$  e  $g-r$  versus  $r-i$ , para a amostra de galáxias obtidas a partir do DR7/SDSS.



## Populações Estelares

Como visto na introdução desse trabalho, o estudo das populações estelares é elemento chave no entendimento de como se formam e evoluem as galáxias. Dado isso, neste capítulo será mostrado que as populações estelares de uma galáxia podem ser modeladas através da análise PCA das magnitudes *ugriz* das mesmas. Na seção 3.1 será feita uma explanação da análise PCA e seu potencial uso como *proxy* de populações estelares. Isto será demonstrado na seção 3.2, onde será feita a aplicação da análise PCA às galáxias do SDSS. Já na seção 3.3 será feita a descrição da aplicação de tal método nas galáxias da amostra escolhida para este trabalho.

### 3.1 Análise de Componentes Principais - PCA

Análise de Componentes Principais é uma poderosa ferramenta estatística com a qual podemos descrever um conjunto de observáveis possivelmente correlacionados através de uma base de vetores linearmente não correlacionados.

O uso de PCA é bastante difundido na astronomia, sendo aplicado em diversas áreas (Andreon et al., 2000; Zhao et al., 2009; Muñoz Bermejo et al., 2013; Lara-López et al., 2013; Carruba, 2013; Harnois-Déraps e Pen, 2013). Em particular, o uso da análise de componentes principais para determinação de tipos espectrais tem sido muito importante, principalmente pela sua aplicação aos dados de grandes levantamentos (Connolly et al., 1995; Folkes et al., 1996; Sodré e Cuevas, 1997; Sodré e Stasińska, 1999; Yip et al., 2004; McGurk et al., 2010).

Como descrito em Murtagh e Heck (1987), entre os principais objetivos da análise PCA, podemos citar os seguintes:

- Redução de dimensionalidade;
- Determinação de uma combinação linear de variáveis;
- Seleção de características: a escolha de variáveis mais úteis na descrição do problema;
- Visualização de dados multidimensionais;
- Identificação de grupos de objetos ou de *outliers*.

Criado por Pearson (1901) e Hotelling (1933), a PCA utiliza um conjunto de dados representado por uma matriz  $\mathbf{S}$  de  $N$  registros por  $M$  atributos, que podem estar correlacionados, e sumariza esse conjunto por eixos não correlacionados (componentes principais) que são uma combinação linear das  $M$  variáveis originais. A análise via PCA é feita de forma que as componentes são ordenadas por sua variância.

Se há uma galáxia com  $N$  píxeis, é possível descrever cada píxel como um vetor  $\mathbf{X}$  com  $M$  magnitudes. Sendo  $\mathbf{S}$  um espaço  $M$ -dimensional gerado pelas  $M$  magnitudes, tem-se que cada píxel da galáxia é um ponto no espaço  $\mathbf{S}$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1M} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2M} \\ \dots & & & \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NM} \end{pmatrix}$$

onde  $S_{NM}$  é a magnitude do  $N$ -ésimo píxel na banda  $M$ . Desse modo, todos os píxeis do objeto irão gerar uma nuvem de pontos nesse espaço.

Dado que as cores de uma galáxia estão correlacionadas com as populações estelares que a compõem, é de se esperar que os píxeis de uma galáxia se arranjam ao longo de uma linha, de uma direção preferencial dentro do espaço  $\mathbf{S}$ . Entretanto, dado que visualizar e analisar um espaço  $M$ -dimensional pode ser inviável, utilizar a análise PCA para reduzir a dimensionalidade do problema é uma alternativa muito eficiente de trabalhar tais dados.

Seja uma galáxia com seus píxeis representados por uma matriz  $\mathbf{S}$  de  $N$  píxeis em um espaço multidimensional de  $M$  características ( $M=5$ , magnitudes ou contagens nas bandas *ugriz*). Seja  $S_{ij}$  o  $i$ -ésimo píxel na  $j$ -ésima banda. Estabelecendo o centróide dos pontos como a média  $\bar{S}_j$  de cada atributo (eixo), podemos definir a variância em cada atributo ( $j$ -ésima banda) como sendo



$$V_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m (S_{ij} - \bar{S}_j)^2.$$

O grau com que cada atributo  $j$  é linearmente correlacionado com outro atributo  $k$  é dado pela matriz de covariância

$$C_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_{ij} - \bar{S}_j)(S_{ik} - \bar{S}_k).$$

Caso se deseje trabalhar com a matriz de correlação, é necessário normalizar cada variável de modo que a variância em cada variável seja igual a 1. Nesse caso, a matriz de correlação  $r_{jk}$  é dada por

$$r_{jk} = \frac{C_{jk}}{\sqrt{V_j V_k}}.$$

Trabalhando com dados de modo que a média de cada eixo seja nula ( $S'_{ij} = S_{ij} - \bar{S}_j$ ), podemos reescrever a matriz de covariância como sendo

$$C_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S'_{ij} S'_{ik}).$$

Seja  $\mathbf{Y}$  um novo vetor, obtido pela transformação

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}$$

com  $\mathbf{A}$  sendo a matriz  $M \times M$  cujas linhas são os autovetores da matriz de covariância  $\mathbf{C}$ .

Pode-se mostrar que, nesse caso, a matriz de covariância do vetor  $\mathbf{Y}$  é diagonal, com seus valores iguais aos autovalores da matriz  $\mathbf{A}$ , de modo que cada vetor  $y_k$  que compõe  $\mathbf{Y}$  é não correlacionado. Além disso, cada autovalor  $\lambda_k$  é igual a variância do  $k$ -ésimo elemento de  $\mathbf{Y}$ :

$$\lambda_k = V_k.$$

Sendo  $\mathbf{A}$  uma matriz real e simétrica, com transposta  $A^{-1} = A'$ , podemos reverter o processo e, a partir da matriz  $\mathbf{Y}$ , reconstruir  $\mathbf{X}$ :

$$A^{-1} = A' \rightarrow \mathbf{X} = A'\mathbf{Y}.$$

Ainda, pode-se obter uma estimativa de  $\mathbf{X}$  a partir dos  $k$  maiores autovalores de  $\mathbf{Y}$ , com uma matriz  $\mathbf{A}_k$  contendo os  $k$  autovetores correspondentes. Sendo  $\mathbf{Y}$  agora  $k$ -dimensional, a reconstrução de  $\mathbf{X}$  será na verdade uma aproximação, obtida com  $\mathbf{A}_k$ , sendo

que a escolha dos autovetores com os  $k$  maiores autovetores garante uma minimização no erro dessa aproximação. Assim,  $\mathbf{X}'$  será a aproximação obtida através da matriz  $\mathbf{A}_k$ , dada por

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}'_k \mathbf{Y}.$$

Dado que a análise via PCA é uma ferramenta efetiva na redução de dimensionalidade e na descrição de propriedades de um conjunto de dados, utilizaremos tal ferramenta para mostrar que é possível, a partir de cores e/ou magnitudes, atribuir um tipo espectral a uma galáxia através de suas componentes principais. A fim de se certificar que este tipo de análise é efetiva, aplicamos o método numa amostra de galáxias do DR7/SDSS.

### 3.2 PCA do SDSS

De modo análogo ao trabalho de Sodré e Cuevas (1997), que usaram o método de análise PCA para investigar propriedades estatísticas dos espectros integrados de galáxias, criou-se uma classifica o espectral utilizando as cores *ugriz* do SDSS. A amostra de galáxias do SDSS foi selecionada como descrito no capítulo anterior e cont m 1396 galáxias.

*Tabela 3.1* - Componentes principais e respectivos autovalores e variâncias, em porcentagem e porcentagem acumulada.

Componente Principal	Autovalor	Porcentagem	Porcentagem Cumulativa
1	3.2356	80.8892	80.8892
2	0.4438	11.0948	91.9839
3	0.2103	5.2565	97.2404
4	0.1104	2.7596	100.0000

Empregando como base o método de análise proposto em Murtagh e Heck (1987), aplicamos a análise via PCA da matriz de correla o nas magnitudes das 1396 galáxias da amostra, de modo a descrever as informa es através dos eixos principais. A tabela 3.1 exibe os autovalores e variância para as 4 primeiras componentes principais, tanto em porcentagem absoluta quanto em porcentagem acumulativa. Pode-se ver que a maior parte das variâncias estão concentradas nas duas primeiras componentes principais ( $\sim 92\%$ ),

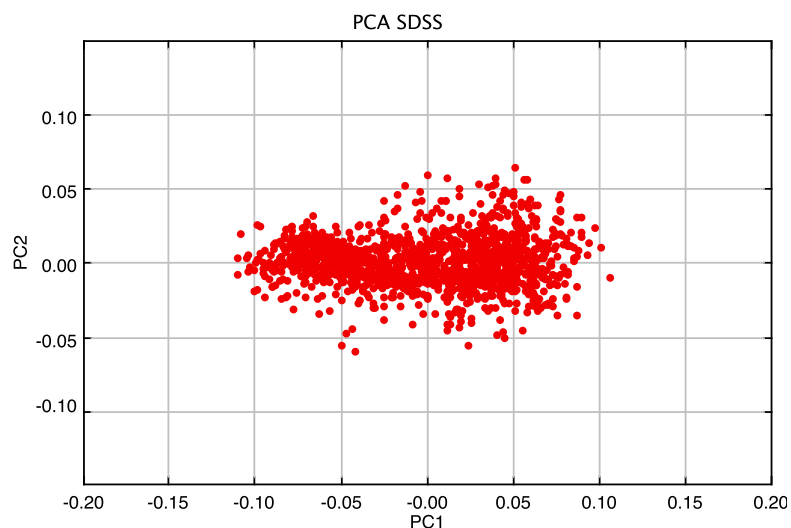


Figura 3.1: A segunda componente principal em função da primeira componente principal para a amostra de galáxias do SDSS.

mostrando que as informações fornecidas pelas 5 magnitudes de cada galáxia podem ser sumarizadas por essas duas componentes. A figura 3.1 apresenta a PC2 em função da PC1, sintetizando a dependência da primeira com a segunda componente principal, onde se observa que a variância da primeira componente é maior do que a segunda (por construção). Já na figura 3.2 estão representadas as cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$ ,  $i-z$  das galáxias em função da primeira componente principal. É possível perceber que existe uma correlação muito boa entre as cores da galáxia e a primeira componente principal. É esta correlação que justifica o grande uso de PCA em classificação espectral.

Além das cores, as idades e metalicidades são outras duas propriedades físicas relacionadas a classificação espectral das galáxias. Para cada galáxia da nossa amostra de galáxias do SDSS, foram obtidas as idades e metalicidades, ambas ponderadas pelo fluxo, a partir dos dados obtidos pelo código de síntese espectral STARLIGHT, que, como visto na introdução, derivou diversas propriedades físicas das galáxias do SDSS/DR7. Assim, como complemento da demonstração da efetividade do uso da análise PCA na determinação de tipos espectrais de galáxias do SDSS, na figura 3.3 estão as correlações entre a primeira componente principal e as idades e metalicidades, ponderadas pelo fluxo, para as galáxias da amostra de galáxias do SDSS. Assim como no caso das cores, a primeira componente principal possui uma boa correlação tanto com a idade quanto com a metalicidade das

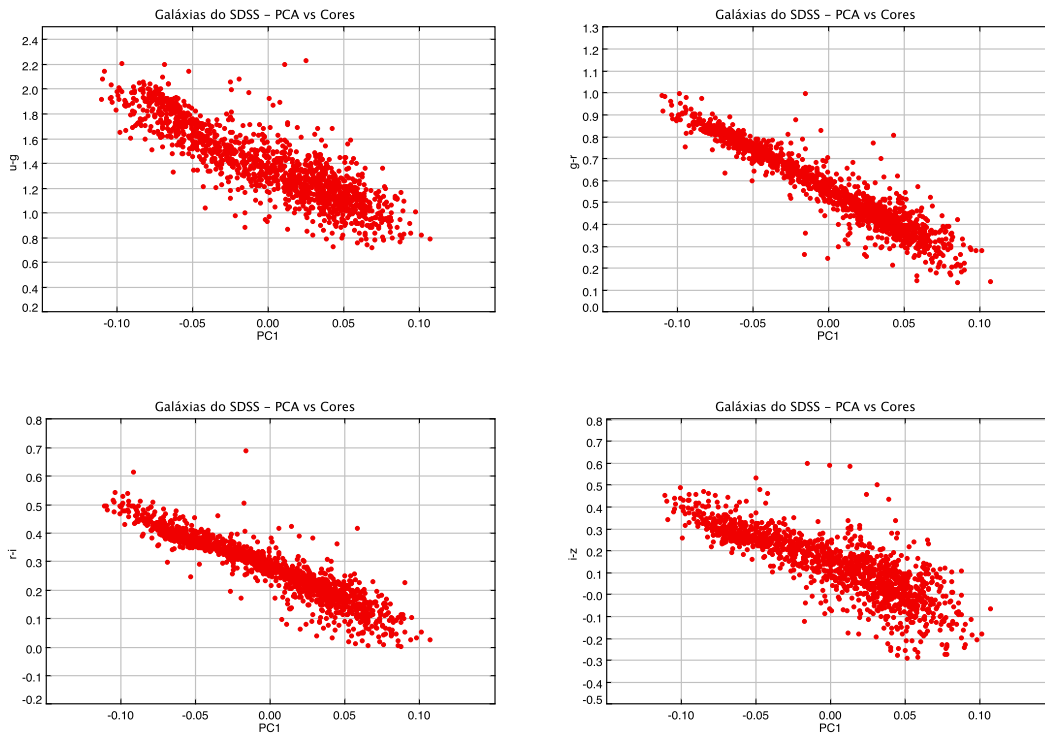


Figura 3.2: Galáxias do SDSS: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da primeira componente principal.

galáxias, mostrando que a associação entre a primeira componente principal com um tipo espectral faz sentido.

### 3.3 PCA das cores em cada píxel

Uma vez que a análise PCA das galáxias se apresentou como uma alternativa válida no estudo de populações estelares, este trabalho propõe que tal recurso seja utilizado para caracterizar e classificar as populações estelares píxel a píxel de uma galáxia.

Para realizar a redução das informações fornecidas pelas magnitudes dos píxeis da galáxia em suas componentes principais, novamente foi empregado uma rotina fundamentada no código de análise PCA proposto por Murtagh e Heck (1987). Denominamos essa rotina como **PCA\_S3P**. A partir de um arquivo de texto contendo as magnitudes em cada píxel, a rotina calcula as  $M = 5$  magnitudes ( $ugriz$ ) <sup>1</sup>, as componentes principais e calcula

<sup>1</sup> Na verdade, a análise foi feita com as contagens em cada píxel (com o céu subtraído). Como estamos usando a matriz de correlação, que centra e normaliza os dados, a PCA das magnitudes e contagens são muito parecidas.

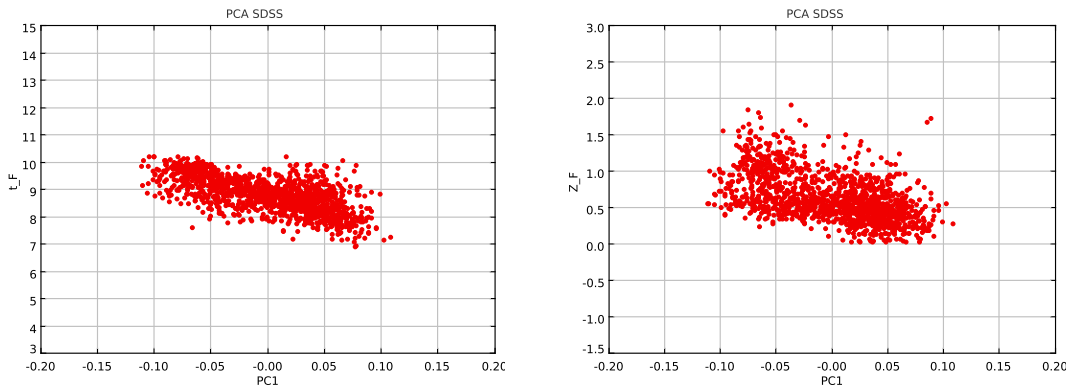


Figura 3.3: A primeira componente principal em função da idade  $\log(t_F)$  (a esquerda) e em função da metalicidade  $\log(Z_F)$  (a direita), ambas ponderadas pelo fluxo, para a amostra de galáxias do SDSS.

a projeção dessas cores nesses eixos. Dentre as opções possíveis de método de análise PCA oferecidas no código original, a rotina utiliza a análise PCA da matriz de correlação. Como *output*, a rotina retorna um arquivo contendo a matriz de correlação, os autovetores e seus autovalores associados e as projeções de cada píxel nos eixos principais calculados. A figura 3.4 mostra um exemplo de *output* obtido com a rotina **PCA\_S3P**.

A título de exemplo, nas figuras 3.5 e 3.6 estão expostos a segunda componente principal e as cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da primeira componente principal, respectivamente, para a galáxia espiral NGC2916, onde os valores médios da PC1 e das cores em cada população estão representados em azul. Novamente, como no caso da análise PCA nas galáxias da amostra do SDSS, é notável a correlação entre a PC1 e as cores em cada píxel, ainda que a dispersão dos dados seja bastante significativa no caso das cores  $u-g$  e  $i-z$ .

```

CORRELATION MATRIX FOLLOWS.

  1.0000
  0.4427  1.0000
  0.4270  0.7939  1.0000
 -0.1764 -0.3170 -0.4719  1.0000

EIGENVALUES FOLLOW.
Eigenvalues      As Percentages      Cumul. Percentages
-----
  2.3714          59.2856            59.2856
  0.8387          20.9670            80.2526
  0.6032          15.0789            95.3315
  0.1867           4.6685            100.0000

EIGENVECTORS FOLLOW.

VBLE.  EV-1  EV-2  EV-3  EV-4  EV-5  EV-6  EV-7
-----
  1  -.4180E+00  -.6112E+00  0.6721E+00  -.7697E-02
  2  -.5680E+00  -.1446E+00  -.4772E+00  0.6548E+00
  3  -.5928E+00  0.6038E-01  -.3221E+00  -.7357E+00
  4  0.3890E+00  -.7758E+00  -.4656E+00  -.1732E+00

PROJECTIONS OF ROW-POINTS FOLLOW.

OBJECT  PROJ-1  PROJ-2  PROJ-3  PROJ-4  PROJ-5  PROJ-6  PROJ-7
-----
  1  -.3368E-01  -.2051E-01  0.7016E-02  -.2892E-03
  2  -.2880E-01  -.1856E-01  -.2070E-02  -.9025E-02
  3  -.1120E-01  -.2733E-02  -.1884E-01  0.1111E-02
  4  -.2027E-01  0.4075E-02  -.6164E-02  -.1137E-01
  5  -.2354E-01  -.1342E-02  -.1168E-01  0.9689E-02
  6  -.1263E-01  0.1810E-01  -.1907E-01  -.4112E-02
  7  -.2868E-01  0.2008E-01  -.1773E-01  0.5555E-02
  8  -.1262E-01  0.9145E-03  -.1062E-01  -.1013E-01
  9  -.1989E-01  0.6496E-02  -.1309E-01  -.5333E-02
 10  -.2942E-01  0.2681E-03  -.2202E-01  0.4526E-02
 11  -.1991E-01  -.1584E-01  -.2020E-01  0.2530E-02
 12  -.3331E-01  0.2448E-01  -.6046E-02  -.1046E-01
 13  -.4847E-01  0.1701E-01  -.1169E-01  0.8269E-02
 14  -.4484E-01  -.1911E-01  -.2053E-01  0.2064E-01
 15  -.3832E-01  -.1966E-01  -.3004E-01  0.1050E-01
 16  -.3571E-01  0.6680E-02  -.2288E-01  0.4405E-02
 17  -.2805E-01  0.6948E-02  -.2452E-01  0.2861E-02
 18  -.2714E-01  -.2342E-02  -.2657E-01  0.6593E-02
 19  -.3034E-01  -.7686E-02  -.2914E-01  0.6681E-02
 20  -.8371E-01  -.4714E-01  0.4949E-01  0.1074E-01
 21  -.2969E-01  -.3388E-01  -.1778E-01  -.4792E-02
 22  -.2391E-01  -.8969E-02  -.1637E-01  0.1889E-02

```

Figura 3.4: Exemplo de resultado fornecido pela rotina **PCA\_S3P**: matriz de correlação, autovalores, autovetores e projeções de cada píxel nas componentes principais calculadas pela rotina.

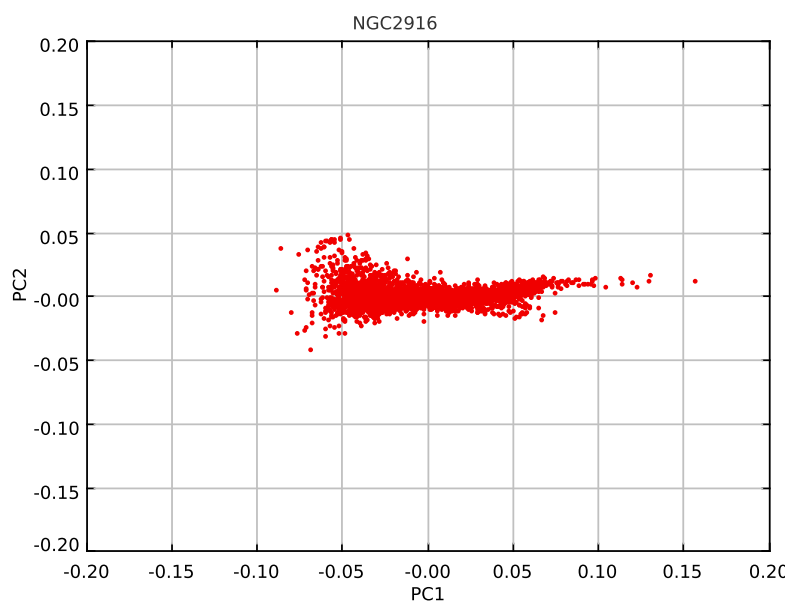


Figura 3.5: Análise PCA nos píxeis: a segunda componente principal em função da primeira componente principal para a galáxia NGC2916.

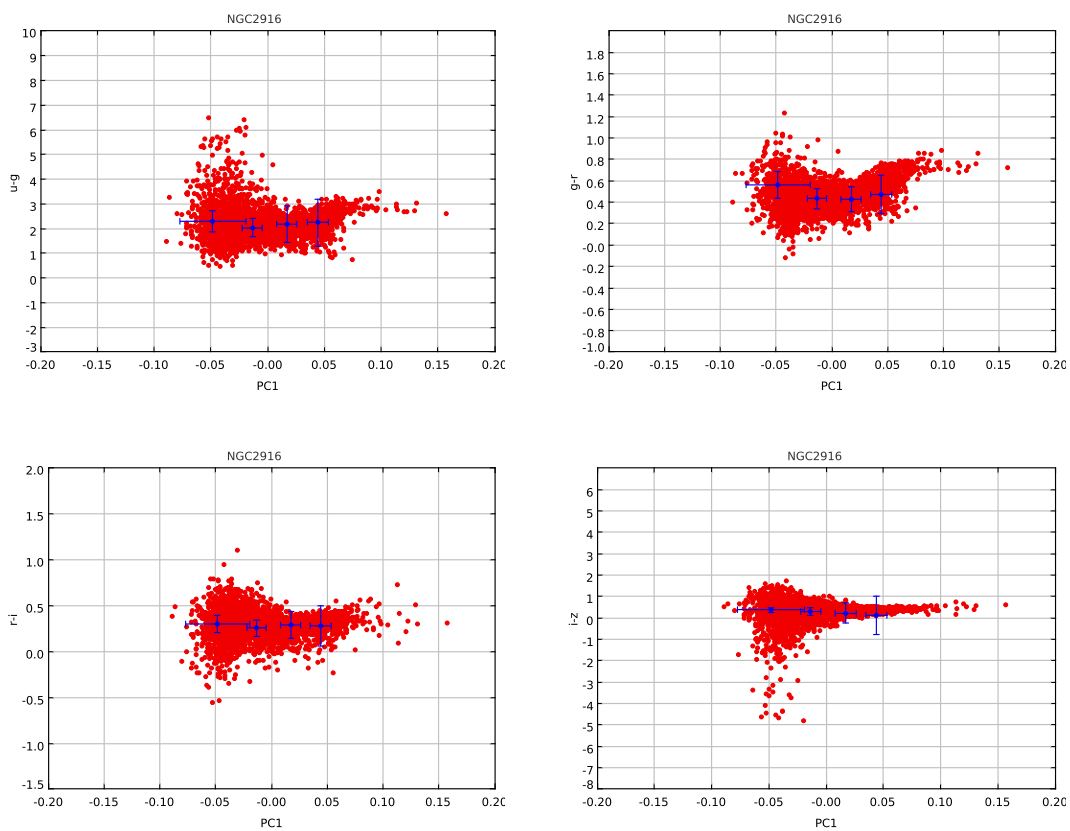


Figura 3.6: Análise PCA nos píxeis: as cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da primeira componente principal para a galáxia NGC2916.

### 3.4 Conclusões

Como visto, a análise de componentes principais (PCA) é um artifício geométrico muito útil na redução de dimensionalidades e visualização das informações de um dado problema. Dada a imensa aplicabilidade deste tipo de análise de dados, principalmente em diversos temas da astronomia, através da aplicação dessa análise aos dados das galáxias do SDDS, mostrou-se que tal técnica é eficiente na caracterização dos tipos espectrais de uma galáxia. A partir dessa constatação, a análise PCA também é efetiva no estudo de populações estelares píxel a píxel, onde a primeira componente principal pode ser tomada como uma *proxy* das populações estelares em cada píxel da galáxia.



## Análise das Imagens das Galáxias

Neste capítulo, serão apresentados os métodos e procedimentos utilizados durante o pré-processamento e processamento das imagens das galáxias de nossa amostra. Na seção 4.1 é discutida a extração, redução e pré-processamento realizados, passos extremamente importantes da análise. Na seção 4.2 serão apresentadas e explicadas as etapas do processamento das imagens, realizadas pelas rotinas **S3P** e **PCA\_S3P**, desenvolvidas para este trabalho. Em cada passo da análise, utilizaremos a galáxia NGC2916 (figura 4.1) como exemplo.



*Figura 4.1:* Galáxia espiral NGC2916, utilizada para demonstrar cada passo do processo.

## 4.1 Extração, Redução e Pré-Processamento dos Dados

As imagens das 15 galáxias, no formato *.fits* e contagens nas bandas *ugriz*, foram obtidos diretamente do SDSS/DR7 através da ferramenta Explorer<sup>1</sup>. De posse desses dados, foi necessário reduzir e pré-processar as imagens antes de aplicarmos as nossas análises. A redução consistiu no registro, limpeza, recorte e listagem, todos descritos abaixo. Estas imagens são, tipicamente, de 2048x1490 píxeis e cada píxel tem 0.396 segundos de arco. A imagem 4.2 exibe a galáxia NGC2916 tal como obtida diretamente pelo SDSS.



Figura 4.2: NGC2916, na banda *r*, tal como obtida diretamente pelo SDSS.

- **Registro:** O primeiro passo da redução consistiu em registrar as imagens das galáxias, colocando as imagens nas 5 bandas em um mesmo sistema de coordenadas, de modo que um dado píxel/ponto de uma galáxia, numa dada banda, corresponda ao mesmo em outra banda (a menos, é claro, dos efeitos do *seeing*). Todas as análises desta etapa foram realizadas considerando a banda *r* como referência. Para tal tarefa, foram utilizadas as *tasks* IMSHIFT e XREGISTER do Iraf.
- **Limpeza do *Foreground*:** Para eliminar os objetos de *foreground* que estavam no campo de visão de cada objeto (na maioria dos casos, estrelas da nossa Galáxia), utilizou-se a *task* FIXPIX do Iraf que, dada uma máscara, substitui as contagens nos píxeis contaminados pela média da sua vizinhança.

<sup>1</sup> <http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/explore/obj.asp>

- **Recorte:** Para diminuir o gasto em tempo computacional, recortamos a imagem original, de modo a ter a galáxia aproximadamente no centro da nova imagem e com menor número de píxeis. Ainda, esta nova imagem deve ser suficientemente grande para permitir não só a análise da galáxia mas também uma estimativa das contagens de fundo de céu. Na figura 4.3 está a galáxia NGC2916 já recortada e com os objetos de *foreground* eliminados.



Figura 4.3: NGC2916 após o recorte.

- **Listagem:** Com a imagem já registrada, limpa e recortada, foi utilizada a *task* LISTPIX do Iraf para transformar as imagens *.fits* em um arquivo ASCII com as coordenadas (x,y) e as contagens de cada píxel em todas as 5 bandas.

## 4.2 Processamento

Para o processamento dos dados de cada objeto, foram criadas duas rotinas, em Fortran 90 e Fortran 77, a saber, a rotina **S3P** - *Stellar Population Pixel by Pixel* e a rotina **PCA\_S3P** que calcula as componentes principais de cada objeto, utilizando as cores u-r, g-r, r-i e i-z como *proxies* para as populações estelares na galáxia.

### 4.2.1 S3P

A rotina **S3P** realiza as seguintes operações:

- **Leitura da imagem:** O primeiro passo do programa consiste da leitura do arquivo de texto com os dados nas 5 bandas para cada píxel do objeto.

- Cálculo de estatísticas do céu: São calculadas as médias, medianas e dispersão do céu em cada banda em uma região definida pelo usuário. Esses dados serão utilizados na segmentação da imagem. Na tabela 4.1 estão as estatísticas do céu para a galáxia NGC2916.

Tabela 4.1 - Estatísticas do céu da galáxia NGC2916: média, mediana e dispersão  $\sigma$  das contagens do céu.

Banda	Média	Mediana	$\sigma$
<i>u</i>	1017.7601	1018.0	3.6337073
<i>g</i>	1042.9830	1045.5	25.402922
<i>r</i>	1072.0702	1068.0	46.13375
<i>i</i>	1128.1847	1095.5	105.19701
<i>z</i>	1139.4412	1130.0	96.761375

- Recorte e binagem da imagem: Novo recorte e binagem dos píxeis. A fim de evitar problemas na análise dos dados devido ao *seeing* característico do SDSS ( $\sim 1.5''$ ), binamos a imagem em 4x4 píxeis ( $\sim 2.5arcsec^2$ ), de modo que em cada novo píxel tenhamos a soma das contagens dos 16 píxeis utilizados na binagem.
- Cálculo da cor: O programa calcula as cores da galáxia em cada píxel segundo as especificações dadas pelo usuário.
- Segmentação e Subtração do céu: Em visão computacional, segmentar imagens significa dividir uma imagem em diversas regiões. Em nossa análise, a segmentação realizada na banda *r* foi utilizada para determinar os pontos que pertenciam a galáxia e quais eram fundo de céu. A segmentação e a subtração do céu foi realizada considerando como píxeis importantes apenas aqueles que estavam acima de um dado limiar sobre a média do fundo de céu, obtido através de

$$I'_{limiar} = I'_C + 2.0\sigma'$$

onde

$$I'_C = N_{pix}I_C$$

$$\sigma' = \sqrt{N_{pix}}\sigma$$

com  $N_{pix}$  sendo o número de píxeis usados na binagem,  $\sigma$  e  $I_C$  a dispersão e o fundo de céu da imagem não binada, respectivamente.

Para a galáxia de exemplo, temos que  $\sigma'_r = 46.13375$  e  $I'_{limiar} = 1139.77$ . A figura 4.4 mostra a segmentação da galáxia exemplo NGC2916, onde valores 0 representam fundo de céu e valores 1 representam o objeto segmentado.

- Calibração fotométrica: Para a realização da análise PCA é necessário a calibração fotométrica das galáxias a serem estudadas. A magnitude de cada píxel foi calculada a partir da magnitude de Petrosian, medida dentro do raio de Petrosian na banda  $r$ ,  $\mathfrak{R}_P(r)$ . Somando todas as contagens dentro do raio de Petrosian  $\mathfrak{R}_P(r)$ , a constante de calibração foi calculada através de

$$cte = mag_{petro} + 2,5 \log \sum (contagens)$$

onde o céu não foi incluído por já ter sido subtraído no passo anterior. Com os valores das constantes de calibração em cada banda, as magnitudes em cada píxel, em cada banda, é calculada e já corrigida pelo avermelhamento através de

$$mag = -2,5 \log(\text{contagem no pixel}) + cte - A_\lambda$$

onde  $A_\lambda$  é o avermelhamento da galáxia na banda correspondente. A tabela 4.2 mostra os valores das magnitudes de Petrosian, constantes de calibração e avermelhamento para a galáxia NGC2916, nas cinco bandas.

Tabela 4.2 - Magnitudes de Petrosian, constantes de calibração e avermelhamento para a galáxia NGC2916, nas cinco bandas.

Banda	MagPetro	Cte de Calibração	$A_\lambda$
u	14.87	28.43	0.136
g	13.19	29.55	0.100
r	12.63	29.48	0.073
i	12.32	29.88	0.055
z	11.97	28.048	0.039

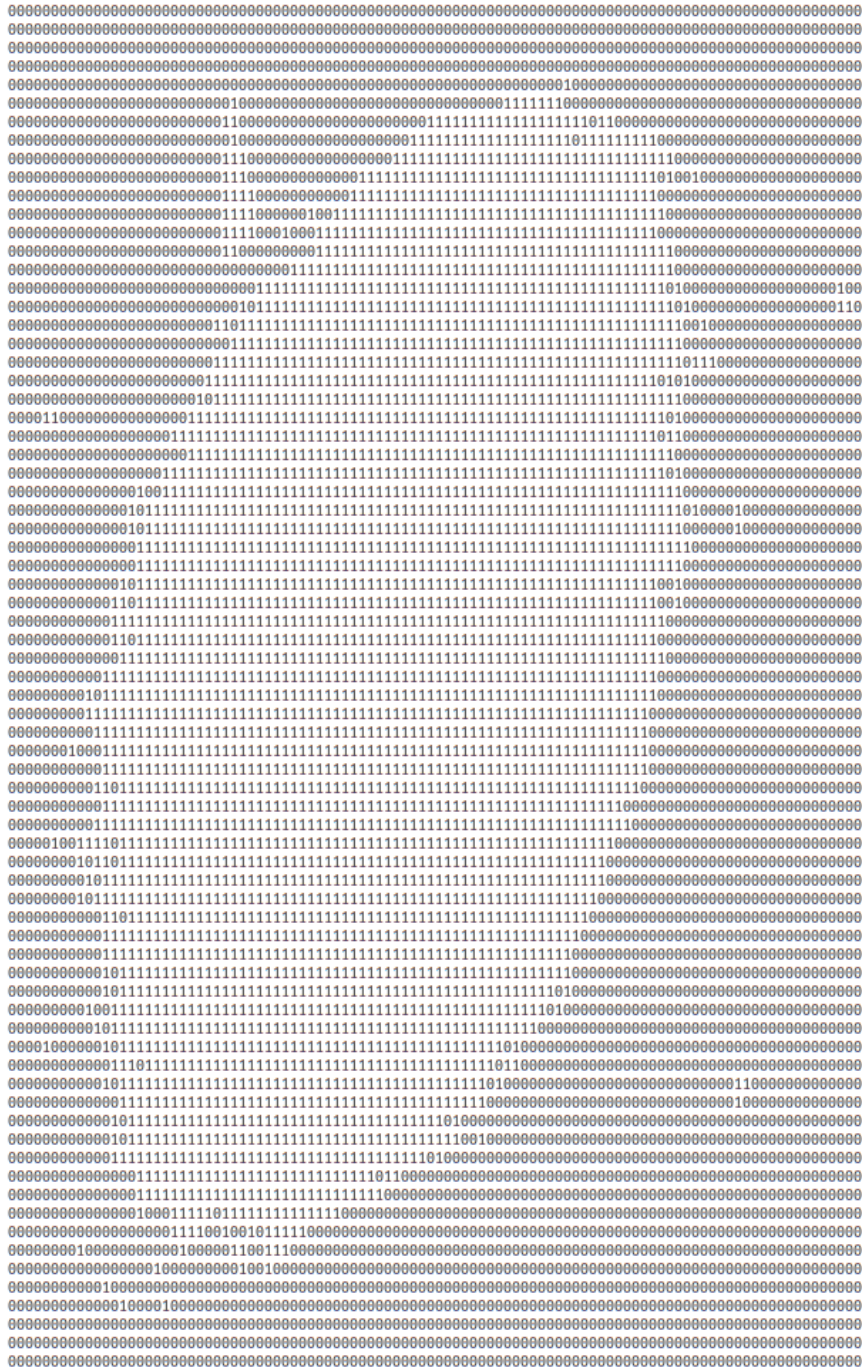


Figura 4.4: Mapa de Segmentação da galáxia NGC2916, onde o objeto segmentado está representado pelo valor 1.

- Identificação de objetos (FoF): Para identificar os objetos obtidos pela segmentação anterior, a rotina utiliza o algoritmo *Friends of Friends*, onde um objeto é definido como um conjunto de píxeis conexos. Nessa etapa, a rotina identifica os objetos e, opcionalmente, imprime um mapa com o objeto detectado, sendo que cada píxel desse objeto (galáxia) será identificado através do número 2 e os demais píxeis recebem 0.

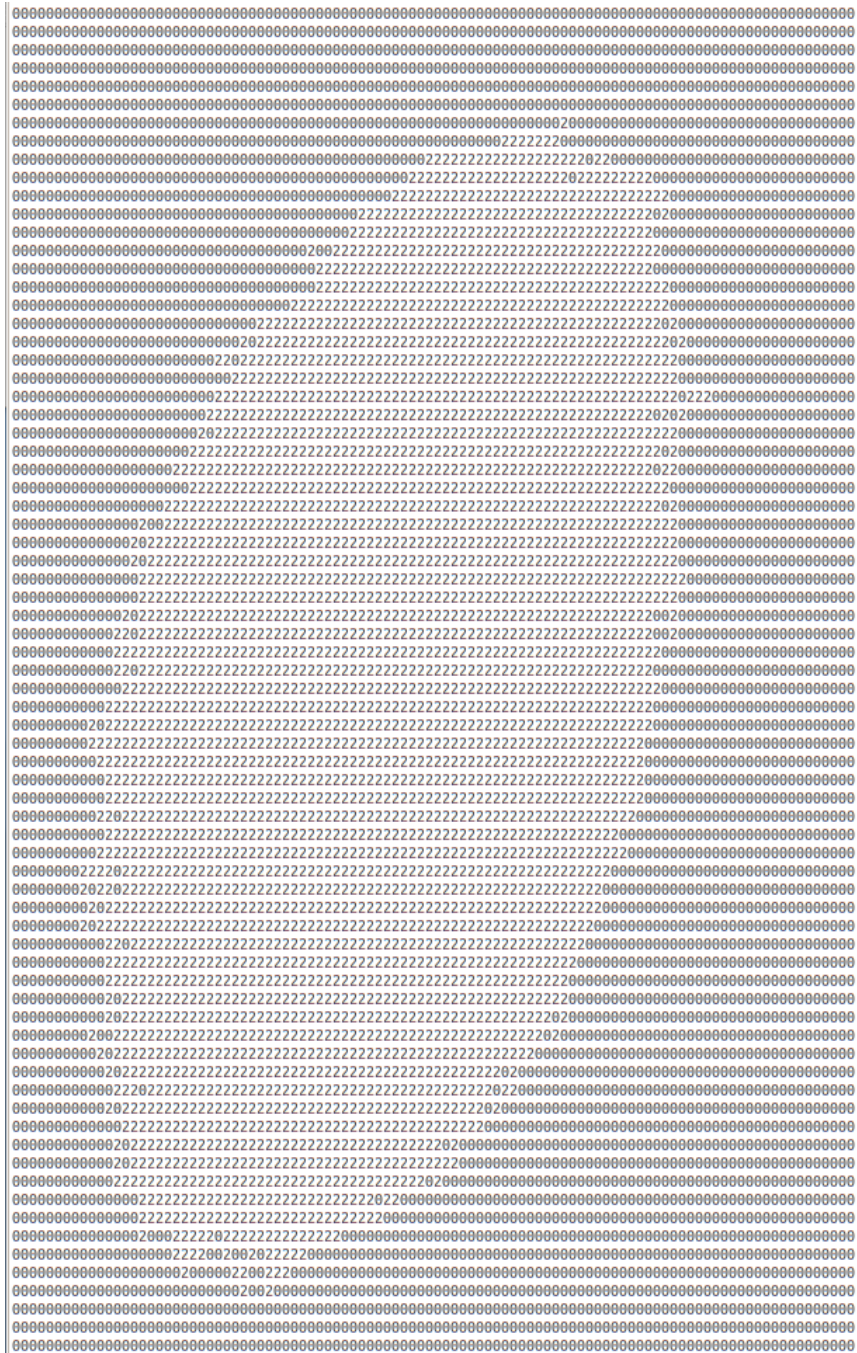


Figura 4.5: Mapa com o objeto identificado via FoF, no exemplo a galáxia NGC2916.

A figura 4.5 mostra um exemplo do mapa criado através da aplicação do algoritmo *FoF*.

- Identificação dos bins de cores: Utilizando a cor  $g-r$  em cada píxel, os píxeis foram divididos em 4 *bins* de cor, onde cada *bin* possui o mesmo número de píxeis. Uma vez que uma dada população estelar está correlacionada com suas cores, separar os

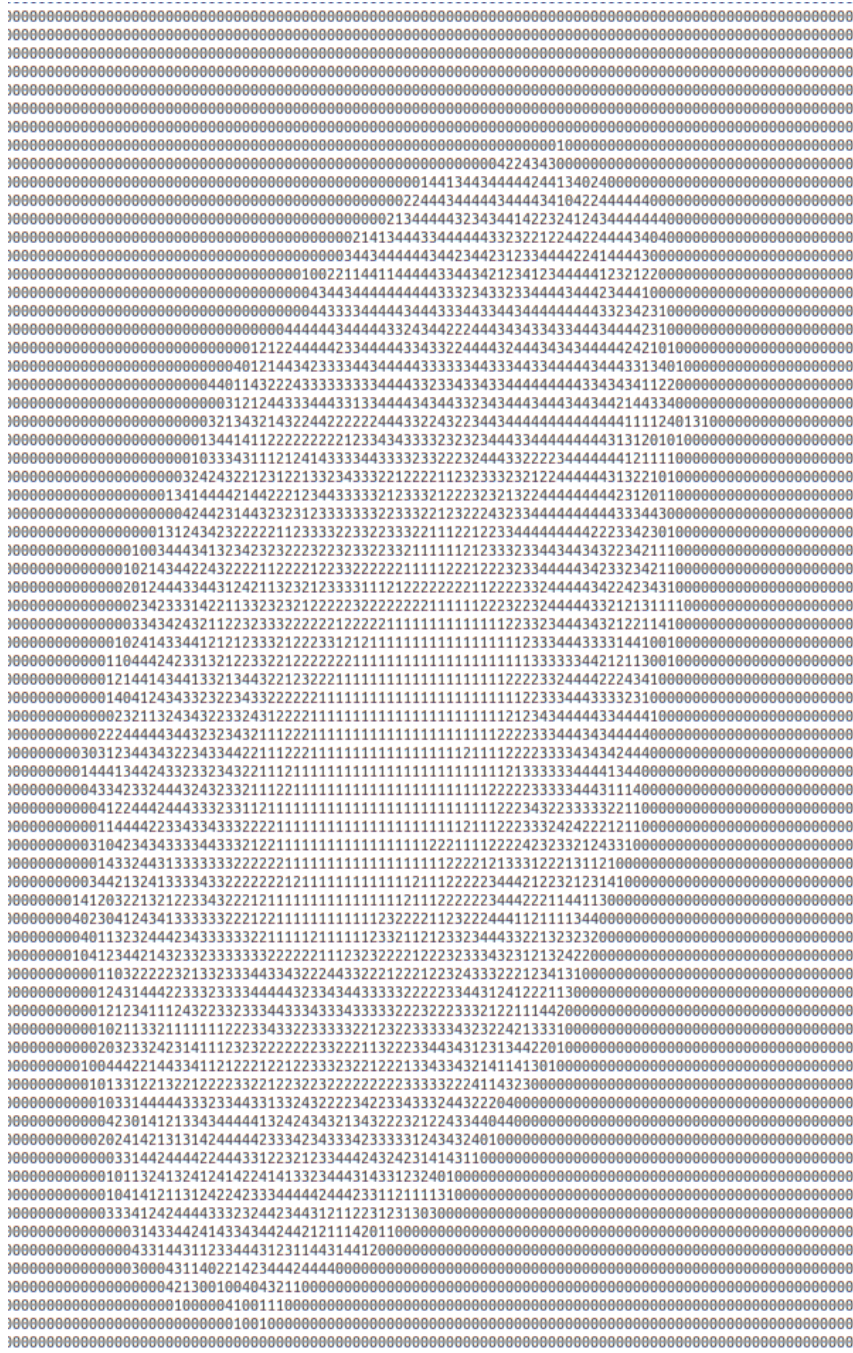


Figura 4.6: Mapa de Distribuição espacial de cor, no exemplo a galáxia NGC2916.

píxeis em 4 bins traz informações preliminares interessantes a respeito das populações estelares de uma galáxia.

- Mapa das cores: Com os píxeis divididos em 4 grupos de cores, é possível analisar a distribuição espacial das mesmas, utilizando um conjunto de estimadores estatísticos. A rotina também exibe um mapa para as populações, onde os píxeis associados a SP



mais azuis recebem o valor 1, os píxeis associados a SP mais vermelhas recebem o valor 4 e os intermediários recebem 2 e 3. Além do mapa, que é apenas um auxiliar para averiguar os resultados do processamento, também são gerados arquivos de texto com as populações. Na figura 4.6, está um exemplo de mapa de distribuição espacial de populações gerado pela rotina S3P.

- Identificação das populações: Com as magnitudes medidas em cada píxel, fazemos uma PCA usando o programa **PCA\_S3P** e associamos a cada píxel um tipo espectral definido pelo valor da primeira PCA das magnitudes associadas aquele píxel. Em seguida, dividimos a primeira PCA em 4 bins, atribuindo uma população a cada bin, analogamente ao que fizemos com as cores na etapa anterior.
- Análise das populações: Após a binagem, segmentação, recorte, identificação dos objetos e definição das populações, foi realizada então uma análise morfológica mais elaborada de cada objeto. Os itens dessa análise estão descritos no próximo capítulo.

Assim sendo, como produtos da rotina S3P, são gerados arquivos de texto com os quatro grupos de cores, com as contagens em cada novo píxel da galáxia, a cor g-r, e um último arquivo com todas as informações a respeito do processamento, com os dados do céu, da binagem e segmentação na banda r, mapas de segmentação, mapa de estruturas identificadas pelo método FoF, mapa de populações de cores, além dos parâmetros morfológicos que serão apresentados no próximo capítulo. O programa **PCA\_S3P** produz um arquivo com os píxeis e as componentes principais associadas a cada píxel.



## Estimadores Estatísticos da Distribuição de Populações Estelares

A descrição morfológica de um objeto requer tanto características topológicas quanto geométricas. Na prática, é interessante ter tantas informações quanto possível expressas em termos de alguns parâmetros robustos e significativos.

Para analisar a morfologia de uma dada população estelar (SP) em uma galáxia, primeiramente é criada uma imagem binária, com intensidades iguais a 1 (píxeis brancos) para os píxeis pertencentes a uma dada população e com intensidade igual a 0 (píxeis pretos) no caso contrário.

Os estimadores estatísticos discutidos nas próximas sessões são aplicados nessas imagens binárias, onde caracterizamos um objeto como sendo um conjunto de píxeis brancos associados a uma dada população.

Assim, produzimos um conjunto de quantidades estatísticas para descrever e quantificar a morfologia de cada população estelar nas galáxias. Estas quantidades são:

- Raio médio e dispersão;
- Coeficiente de Gini;
- Funcionais de Minkowski.

Cada uma dessas estatísticas serão descritas a seguir.

## 5.1 Raio Médio e Dispersão

Se  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$  é o conjunto de píxeis associados com uma dada  $SP$ , seu centro é definido como  $(\bar{x}, \bar{y})$  onde

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i,$$

o raio médio será dado por

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i,$$

onde

$$R_i = \left( (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 \right)^{1/2},$$

e a dispersão do raio definida como

$$\sigma_R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^{1/2}.$$

Pode ser útil normalizar estas quantidades pelo o *raio equivalente*: se  $N_T$  é o número de píxeis do objeto inteiro (i.e., contendo todas as populações), o raio equivalente é definido como

$$R_E = \left( \frac{N_T}{\pi} \right)^{1/2}.$$

Normalizados dessa forma, os raios médios são uma medida da concentração de cada população.

## 5.2 Coeficiente de Gini

O Coeficiente de Gini é uma medida de dispersão estatística, proposta pelo estatístico e sociólogo italiano Corrado Gini (Gini, 1912). Utilizado principalmente em estudos na área de Economia, para quantificar distribuição de renda ou riquezas, o Coeficiente de Gini (a partir daqui apenas CG) mede as desigualdades em uma distribuição de frequências. O CG é calculado de tal modo que uma distribuição completamente igualitária tem  $CG = 0$  e uma distribuição completamente concentrada tem  $CG = 1$ . Dado um conjunto de dados  $X_i$ , o CG pode ser definido e calculado como a média da diferença absoluta entre todas as combinações de  $X_i$ , dada pela equação 5.1. Glasser (1962), propôs um modo mais fácil e eficiente de calcular o CG, através de uma somatória dos  $X_i$  ordenados na forma apresentada em 5.2.

$$CG = \frac{1}{2\bar{X}n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |X_i - X_j| \quad (5.1)$$

$$CG = \frac{1}{\bar{X}n(n-1)} \sum_{i=1}^n (2i - n - 1)X_i \quad (5.2)$$

Abraham et al. (2003) mostrou que o Coeficiente de Gini da contagem nos píxeis da imagem possui uma correlação com a concentração de luz nas galáxias, podendo ser utilizado como um parâmetro útil em estudos sobre a morfologia das galáxias.

### 5.3 Funcionais de Minkowski

Os Funcionais de Minkowski são ferramentas extremamente úteis em análises de imagens, morfologia matemática e geometria integral, uma vez que quantificam padrões morfológicos nas imagens (Santalo, 1976; Rosenfeld e Kak, 1976; Serra, 1982; Mecke, 1993). A vantagem do uso dos Funcionais de Minkowski (a partir daqui apenas FM) é que essas medidas topológicas e geométricas podem ser aplicadas efetivamente em imagens binárias (Mecke, 1996; Rehse, 2008).

Em particular, em análises morfológicas de imagem, os FM são ferramentas úteis para a caracterização das imagens, tendo sido utilizado em astronomia, no estudo das estruturas em larga escala (Hikage et al., 2003; Costa-Duarte et al., 2011).

Em duas dimensões, os FM de um objeto são a área da superfície, o perímetro total e a característica de Euler-Poincaré (ou *conectividade*, número de regiões independentes conectadas menos o número de buracos em cada região). Assumindo que temos uma imagem binária com  $N$  píxeis, onde  $N_w$  é o número de píxeis "brancos" (membros da SP considerada) e  $N_b$  é o número de píxeis "pretos" (abaixo do limiar),

$$N = N_w + N_b.$$

Caracterizando um objeto como sendo um conjunto de píxeis associados a uma certa SP, os FM normalizados de cada objeto podem ser definidos como sendo:

- área da superfície:

$$A = \frac{N_w}{N}$$

- perímetro:

$$P = \frac{N_{bw}}{N}$$

onde  $N_{bw}$  representa o número de píxeis na fronteira branco-preto;

- Característica de Euler-Poincaré (CEP): número de regiões independentes conexas menos o número de buracos em cada região)

$$\chi_{abs} = C_w - C_b$$

$$\chi_{norm} = \frac{C_w - C_b}{N}$$

onde  $C_w$  e  $C_b$  são o número de conjuntos contínuos de píxeis brancos e pretos, respectivamente. A primeira equação corresponde a CEP absoluta e a segunda equação corresponde a CEP normalizada pelo número de píxeis da imagem.

Dentre os três Funcionais de Minkowski definidos acima, neste trabalho, será utilizado apenas o último, a Característica de Euler-Poincaré, sendo que os demais funcionais será utilizado em trabalhos futuros.

No próximo capítulo, vamos aplicar estes estimadores estatísticos às populações estelares identificadas nas galáxias para quantificar a morfologia dessas populações.

# Resultados

Dada a importância dos estudos de populações estelares como um modo de entender a formação e evolução das galáxias, neste capítulo serão apresentados os resultados da análise de populações estelares num *approach* pixel a pixel, através da análise de alguns estimadores estatísticos e análise PCA das magnitudes em cada pixel da galáxia. Na seção 6.1 será realizada a caracterização das populações estelares através da análise PCA e a determinação das 4 populações estelares que serão utilizadas nesse estudo. Na seção 6.2 serão expostos os resultados da análise da distribuição das populações estelares nas galáxias da amostra e nas seções 6.3, 6.4, 6.5 serão apresentados os resultados a respeito da determinação dos raios médios e cores, Coeficiente de Gini e Característica de Euler-Poincaré, respectivamente, das populações estelares.

Com a finalidade de deixar este capítulo mais claro, utilizaremos uma galáxia de cada sub-amostra (elíptica: NGC6125; espiral: NGC4185; espiral tardia: NGC3991) para exemplificar as análises, sendo que as imagens e gráficos das demais galáxias estarão no apêndice A.

### 6.1 PCA e Populações Estelares Pixel a Pixel

Como apresentado no capítulo 3, a análise PCA é uma ferramenta de amplo uso em diversas áreas da astronomia e que tem um grande potencial no estudo de tipos espectrais e populações estelares. Assim como apresentado na seção 3.3, a primeira componente principal calculada para as magnitudes <sup>1</sup> dos pixels de uma galáxia possui uma correlação muito boa com a população estelar dos mesmos. Ainda, nessa mesma seção 3.3, tomando

---

<sup>1</sup> Aqui, estamos referenciando como magnitudes as contagens, com o céu subtraído e calibradas como explicitado na seção 4.2.1, de modo que a PCA calculada seja proporcional ao logaritmo do fluxo no pixel.

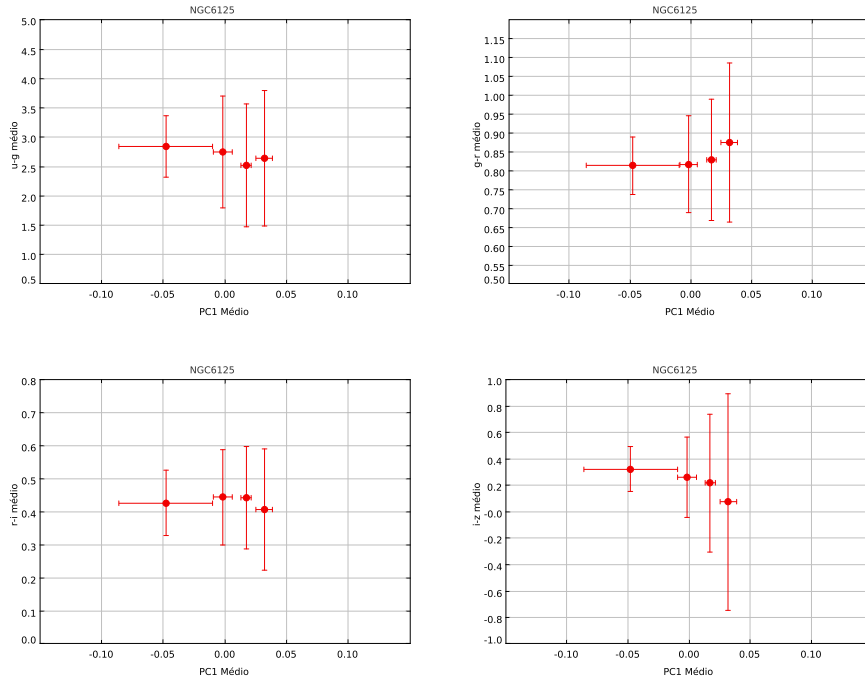


Figura 6.1: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC6125.

a galáxia NGC2916 como exemplo, foram apresentados gráficos com a correlação entre a primeira e segunda componentes principais, além da correlação entre a primeira componente principal e as cores em cada píxel. Nas figuras A.5, A.10 e A.15, apresentamos as correlações entre as cores e a primeira componente principal para todas as galáxias elípticas, espirais e para as espirais tardias, respectivamente.

Em todos os casos a correlação entre a primeira componente principal e as cores  $u-g$  e  $i-z$  possui uma dispersão mais alta do que as demais. Isso acontece, principalmente, porque as galáxias da amostra possuem menor emissão nas bandas  $u$  e  $z$  em comparação com as demais bandas e, assim, suas imagens nas bandas  $u$  e  $z$  são mais ruidosas. Dessa forma, quando as galáxias são segmentadas, utilizando como referência a banda  $r$ , as contagens nas regiões periféricas, nessas bandas, ficam mais incertas. Em nossa análise, foi decidido utilizar a cor  $g-r$  para correlacionar com as medidas de raios e componentes principais.

Além das várias propriedades estatísticas que serão abordadas neste trabalho, o principal foco do estudo é compreender como se distribuem espacialmente as populações estelares dentro de uma galáxia e entender como tais distribuições podem ajudar a interpretar a evolução dessas galáxias. Dado esse ponto de vista, utilizaremos a primeira componente



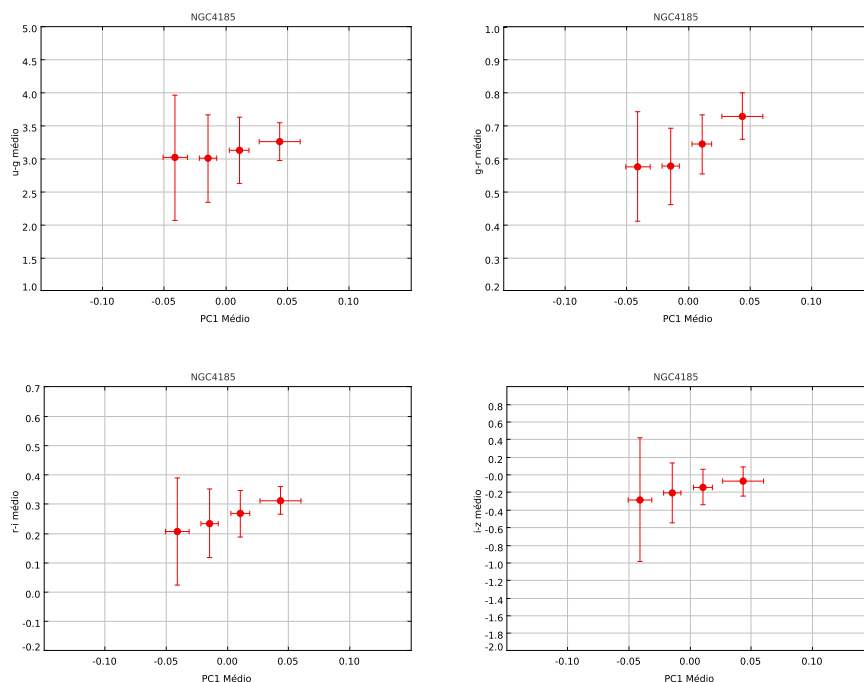


Figura 6.2: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC4185.

principal, calculada via análise PCA das cores dos píxeis das galáxias, como um *proxy* das populações estelares. Para entender como as mesmas se distribuem, iremos ordenar de modo crescente a primeira componente principal e dividi-la em 4 *bins* com o mesmo número de píxeis. Cada *bin* será referenciado como uma das 4 populações estelares a serem analisadas. O *bin* com menores valores da primeira componente principal será a população estelar 1 (P1), o segundo bin será a população 2 (P2), o terceiro *bin* será a população 3 (P3) e, por fim, o *bin* com os maiores valores da primeira componente principal será referenciado como população 4 (P4). Ainda, dada a arbitrariedade do sentido das componentes principais, convencionamos que quanto maior (menor) o PC1 mais vermelha (mais azul) será a população.

Nas seções a seguir iremos analisar cada população estelar em si e também no contexto da galáxia como um todo.

## 6.2 Distribuição Espacial de Populações Estelares

Dentro do estudo do processo de evolução de galáxias, uma das questões chaves é entender como tais objetos se formam e evoluem, tanto do ponto de vista espacial quanto

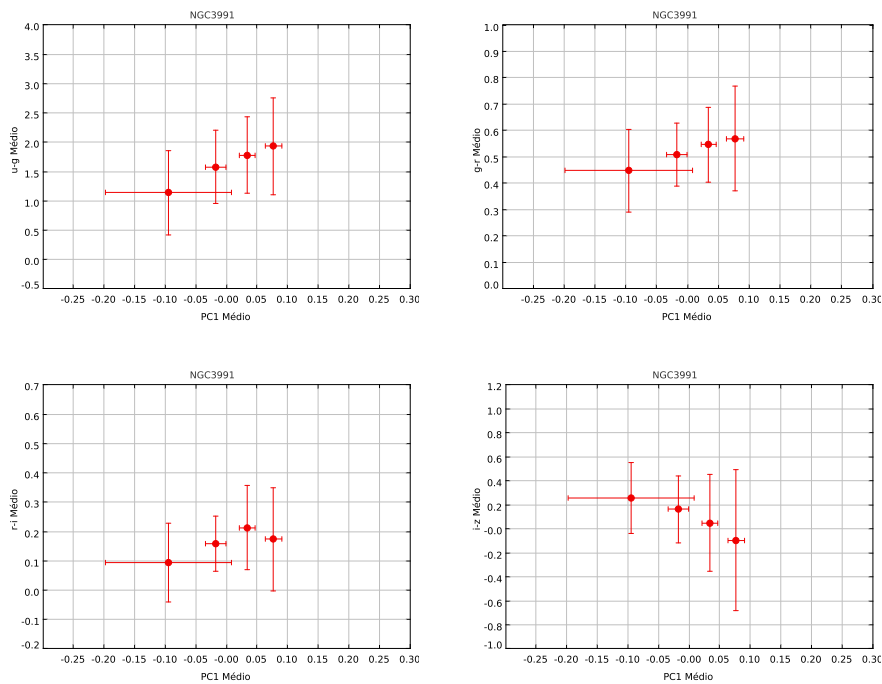


Figura 6.3: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para ngc3991.

temporal. Nesse sentido, as populações estelares são ferramentas de extrema importância, uma vez que podem ser entendidas como registros fósseis dos processos que tiveram lugar ao longo da evolução da galáxia. Ainda que não seja possível determinar suas posições anteriores (tanto devido a sua evolução passiva quanto a efeitos ambientais, fusões, acreção de gás e outros) e, conseqüentemente a evolução dos seus movimentos, é possível estudar sua evolução através das relações entre suas atuais posições, suas cores, idades, metalicidades e outras propriedades.

Para entender como evoluem as populações estelares dentro das galáxias, foram analisadas as distribuições espaciais de cada uma das 4 populações estelares (P1, P2, P3 e P4) nas galáxias da amostra. Na figura 6.4 são apresentadas as distribuições espaciais das populações estelares de todas as galáxias da amostra, onde a população 1 é representado pela cor azul, a população 2 pela cor verde, a população 3 pela cor amarela e, por fim, a população 4 pela cor vermelha. Tomando que quanto menor a primeira componente principal mais azul uma população, é notável que as populações mais azuis estejam na região externa enquanto que as mais vermelhas estão no centro, em todas as galáxias.

Nas figuras 6.5, 6.6 e 6.7 estão detalhadas as distribuições espaciais das galáxias NGC6125,

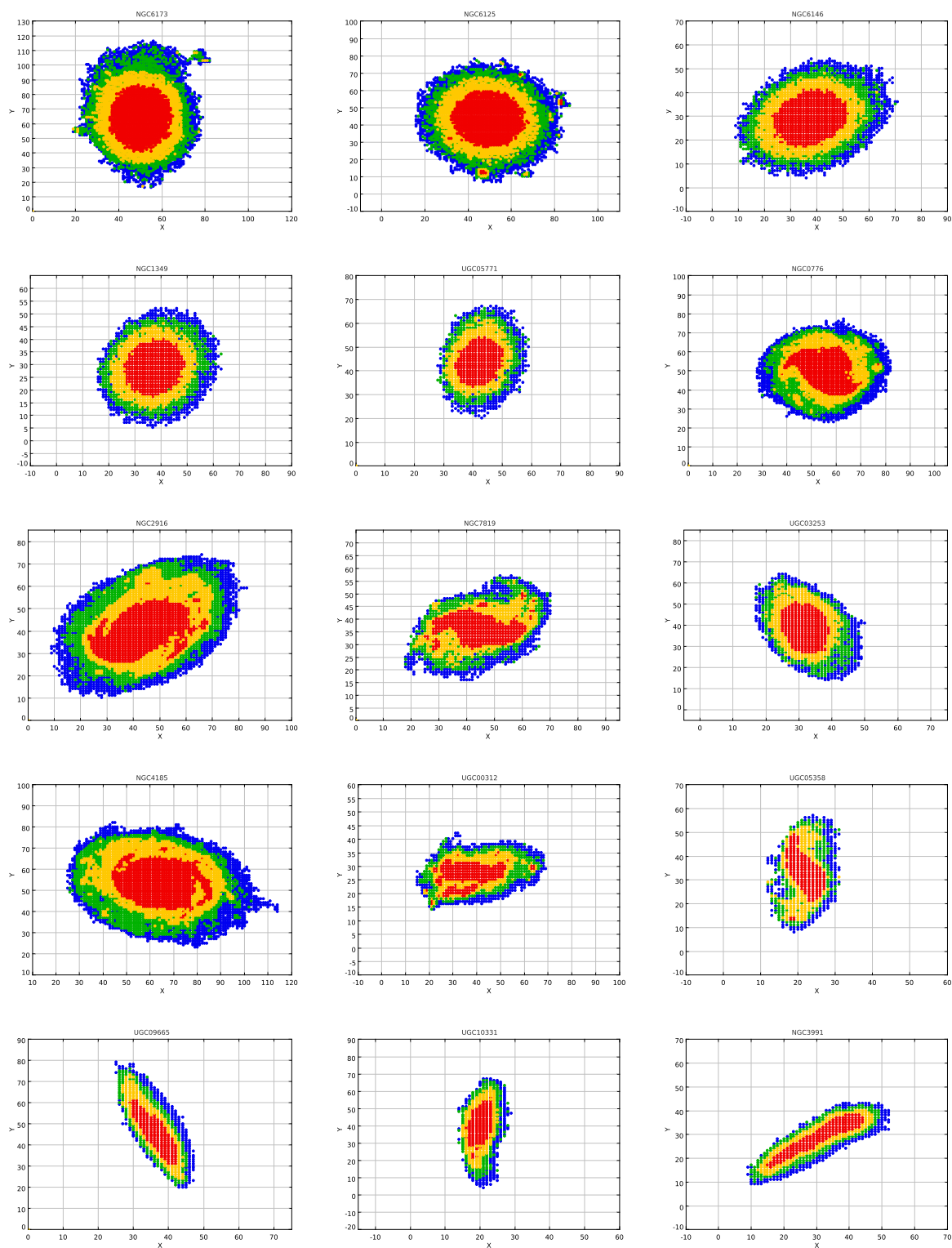


Figura 6.4: Distribuição espacial das populações estelares.

NGC4185 e NGC3991.

A galáxia elíptica NGC6125 exibe uma distribuição espacial de populações estelares

mais vermelha no centro e que se torna mais azul conforme segue em direção a periferia da galáxia, como as demais galáxias dessa subamostra. A população P4 está concentrada na região central, com alguns píxeis mais externos, que provavelmente sejam decorrentes da limpeza de *foreground* ineficiente. As demais populações se distribuem ao redor do centro, em regiões anelares concêntricas.

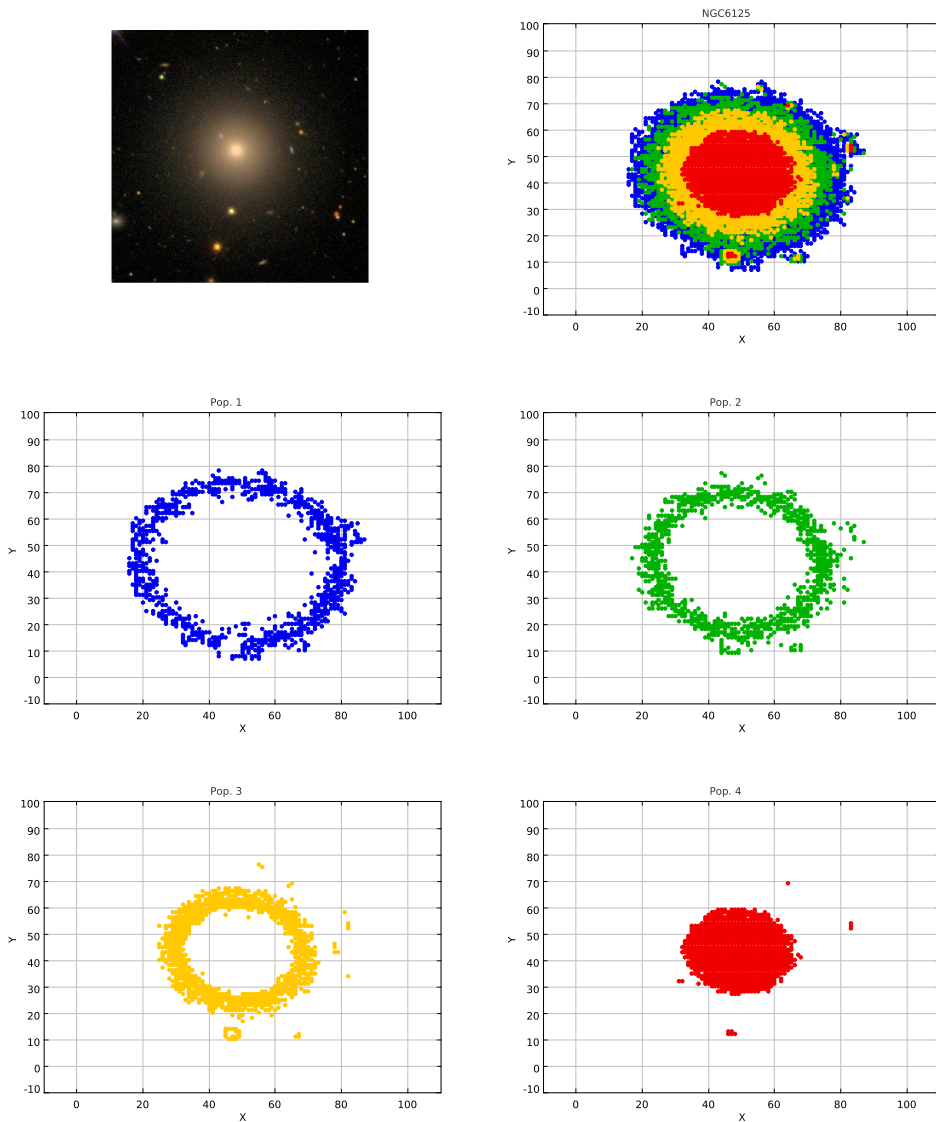


Figura 6.5: Distribuição espacial das populações estelares.

Na galáxia NGC4185, bem como nas demais galáxias espirais, além de a população P4 (mais vermelha) estar na região central da galáxia, na distribuição espacial dessa população é perceptível os sinais de braços espirais. É interessante notar ainda que a população P1 possui uma sobredensidade no canto inferior esquerdo, enquanto que P2 também pos-

sui uma sobredensidade no canto inferior direito. Essa característica também deve estar associada aos braços espirais da galáxia.

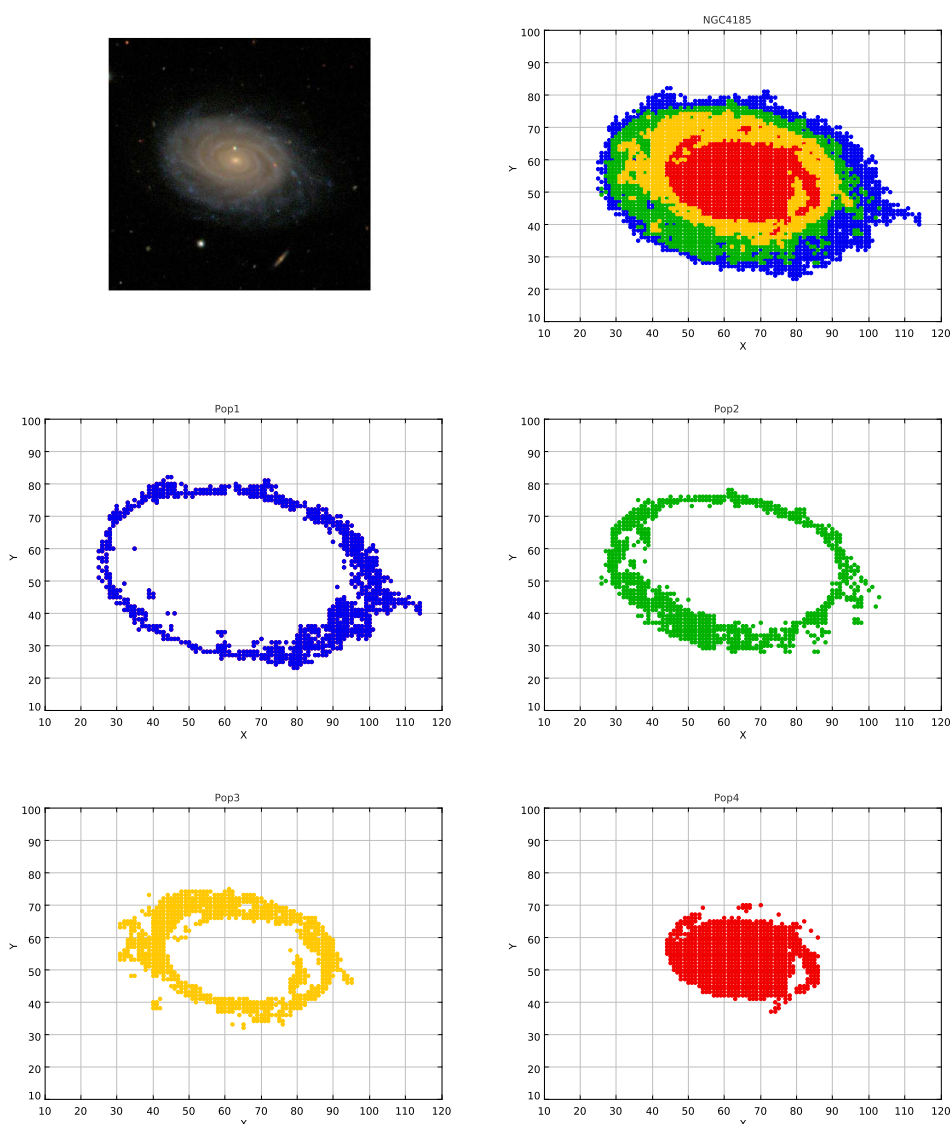


Figura 6.6: Distribuição espacial das populações estelares.

A galáxia NGC3991, assim como as demais galáxias, apresenta uma população central mais vermelha (P4) e mais azul em direção às extremidades. A galáxia UGC00312 exibe uma distribuição de populações estelares menos bem definida que as demais, mostrando que as suas populações estão mais espalhadas ao longo de sua extensão. Já a galáxia UGC05358, por sua vez, tem sua população mais vermelha (P4) distribuída numa região com aparente estrutura espiral.

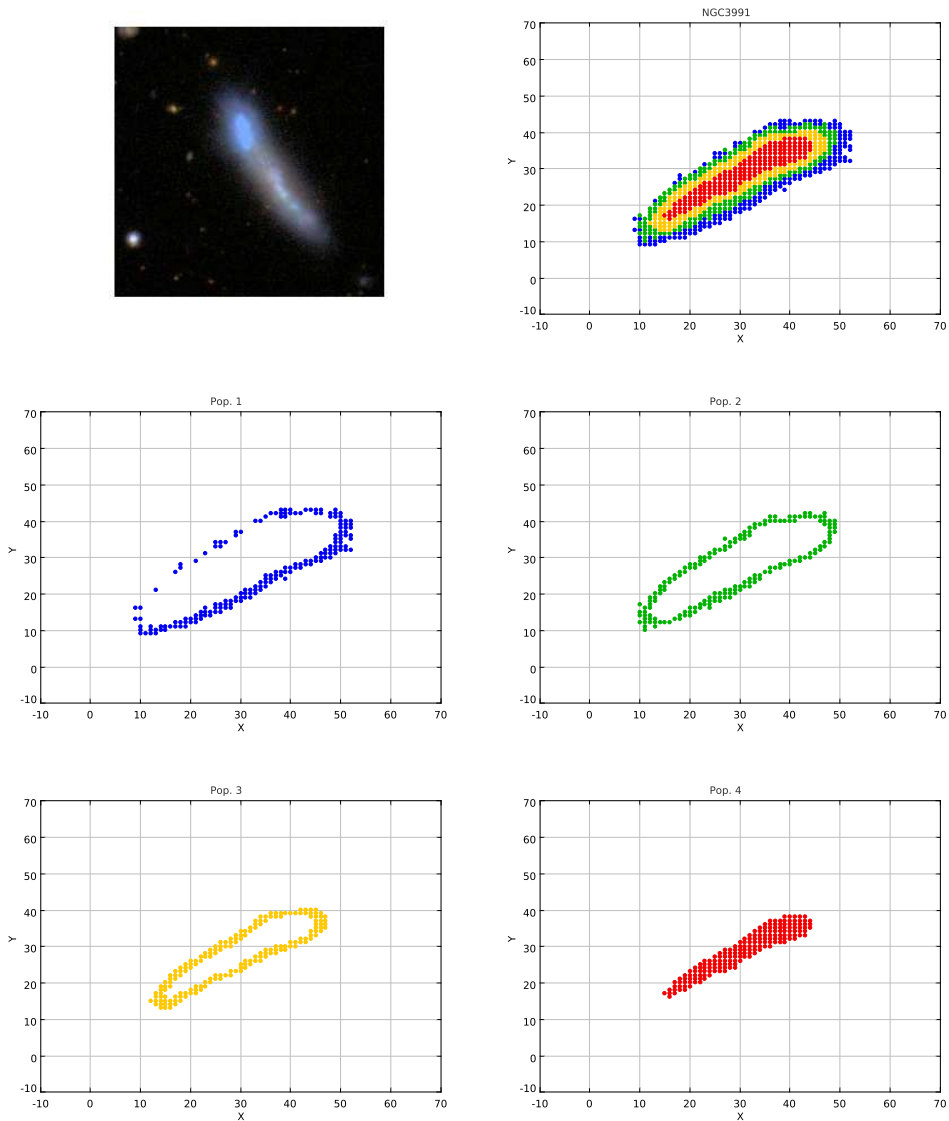


Figura 6.7: Distribuição espacial das populações estelares.

### 6.3 Cores e Raios Médios

Seja o Raio de Petrosian  $\mathfrak{R}_P$  o raio no qual a razão entre o brilho superficial anelar neste raio e o brilho superficial dentro dele é igual a 0.2. Definindo um raio normalizado pelo Raio de Petrosian  $\mathfrak{R}_P$  como sendo

$$R_N = \frac{R_i}{\mathfrak{R}_P}$$

calculamos o raio de cada píxel, em cada uma das 4 populações, para cada galáxia da amostra. Na tabela 6.1 é exibido os raios normalizados médios e cor  $g-r$  média de cada

população estelar, em cada galáxia, além das respectivas dispersões em cada medida. Nessa tabela, o raio  $R_i$  e a cor  $g - r_i$  correspondem a população  $i$ , com  $i = 1, 2, 3, 4$ .

*Tabela 6.1* - Raio normalizado médio e cor  $g-r$  média para cada população. Entre parênteses está a dispersão de cada medida.

Galáxia	$R_1$	$(g - r)_1$	$R_2$	$(g - r)_2$	$R_3$	$(g - r)_3$	$R_4$	$(g - r)_4$
NGC6173	1.06(0.22)	0.88(0.19)	0.90(0.20)	0.82(0.16)	0.67(0.15)	0.79(0.10)	0.36(0.14)	0.80(0.04)
NGC6125	1.04(0.09)	0.87(0.21)	0.91(0.10)	0.82(0.16)	0.71(0.12)	0.81(0.12)	0.38(0.15)	0.81(0.07)
NGC6146	1.02(0.14)	0.88(0.24)	0.88(0.14)	0.83(0.17)	0.68(0.12)	0.83(0.10)	0.36(0.14)	0.84(0.04)
NGC1349	0.70(0.07)	0.84(0.21)	0.60(0.07)	0.81(0.15)	0.47(0.08)	0.81(0.11)	0.25(0.09)	0.88(0.09)
UGC05771	0.72(0.13)	0.85(0.19)	0.63(0.12)	0.78(0.15)	0.50(0.16)	0.83(0.11)	0.26(0.10)	0.87(0.07)
NGC0776	0.77(0.06)	0.75(0.18)	0.64(0.09)	0.70(0.11)	0.52(0.12)	0.72(0.10)	0.29(0.11)	0.77(0.13)
NGC2916	0.91(0.15)	0.46(0.17)	0.75(0.13)	0.42(0.11)	0.57(0.14)	0.42(0.09)	0.34(0.15)	0.55(0.12)
NGC7819	0.66(0.15)	0.51(0.16)	0.58(0.14)	0.50(0.12)	0.47(0.16)	0.55(0.11)	0.29(0.15)	0.63(0.09)
UGC03253	0.71(0.15)	0.49(0.15)	0.62(0.14)	0.50(0.11)	0.49(0.15)	0.49(0.09)	0.26(0.10)	0.61(0.10)
NGC4185	0.72(0.12)	0.57(0.16)	0.61(0.11)	0.57(0.11)	0.48(0.12)	0.64(0.09)	0.26(0.11)	0.72(0.07)
UGC00312	0.60(0.19)	0.31(0.19)	0.56(0.17)	0.18(0.14)	0.39(0.16)	0.26(0.13)	0.28(0.15)	0.27(0.18)
UGC05358	0.57(0.23)	0.46(0.20)	0.53(0.23)	0.44(0.14)	0.52(0.20)	0.43(0.12)	0.30(0.19)	0.45(0.10)
UGC09665	0.65(0.31)	0.55(0.18)	0.63(0.30)	0.52(0.14)	0.59(0.28)	0.56(0.11)	0.28(0.16)	0.70(0.09)
UGC10331	0.75(0.35)	0.43(0.18)	0.68(0.27)	0.39(0.15)	0.51(0.23)	0.39(0.12)	0.26(0.15)	0.46(0.09)
NGC3991	0.61(0.38)	0.56(0.19)	0.67(0.39)	0.54(0.14)	0.60(0.39)	0.50(0.11)	0.47(0.32)	0.44(0.15)

A figura 6.8 exibe a cor média de cada população em função do raio normalizado médio, para as 3 galáxias exemplo, onde ainda é possível correlacionar com suas respectivas populações. A galáxia elíptica NGC6125 apresenta cor  $g-r$  média menor na região central da galáxia, exibindo portanto um gradiente de cor positivo, onde as populações mais vermelhas estão nas regiões mais externas. Essa mesma tendência também é observada nas galáxias NGC6146 e NGC6173. Já as galáxias NGC1349 e UGC05771 exibem cor  $g-r$  média aproximadamente igual na região mais interna e mais externa. Esse aparente gradiente positivo das galáxias elípticas pode ser uma consequência de estarmos utilizando apenas cor e raios médios, além do fato de que esse gradiente é quase *flat*, sugerindo que, na verdade, as cores das populações estelares nesses objetos são bastantes homogêneas.

A espiral NGC4185 exibe cor  $g-r$  média decrescente com o raio ponderado médio, evidenciando um gradiente de cor negativo, i.e., ao contrário da subamostra de galáxias elípticas, as populações mais vermelhas estão na região central. Essa mesma tendência

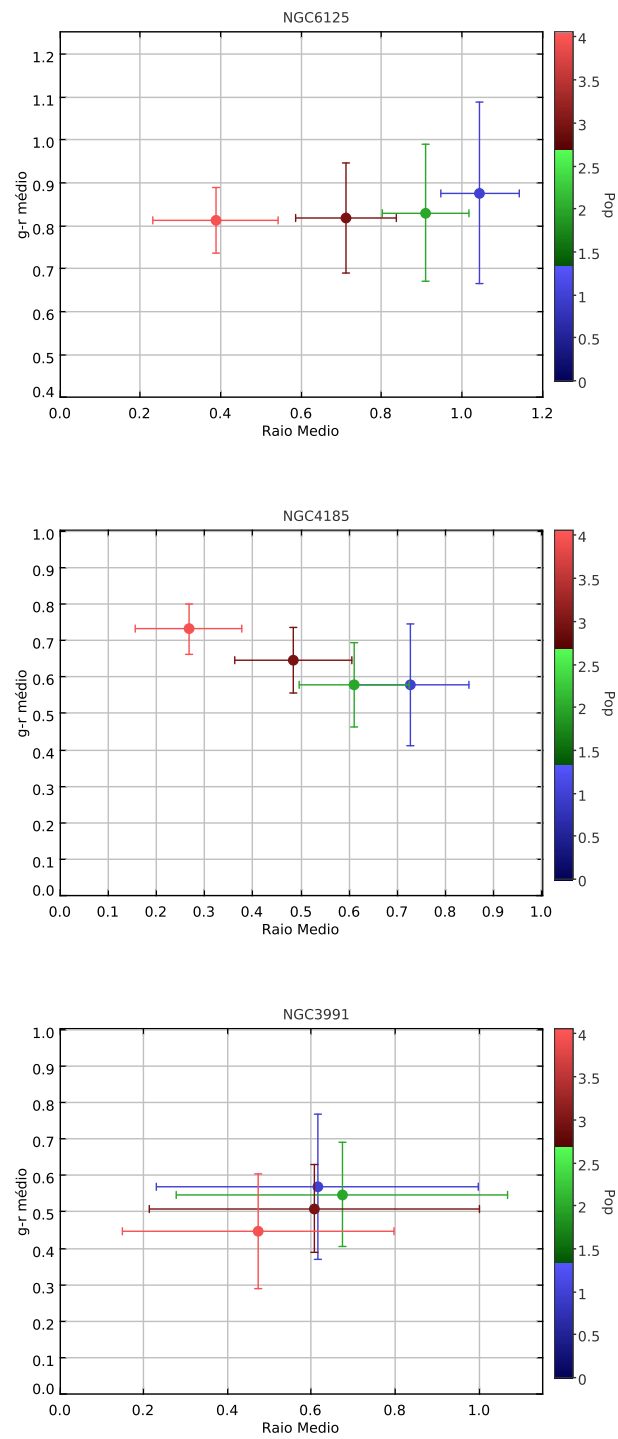
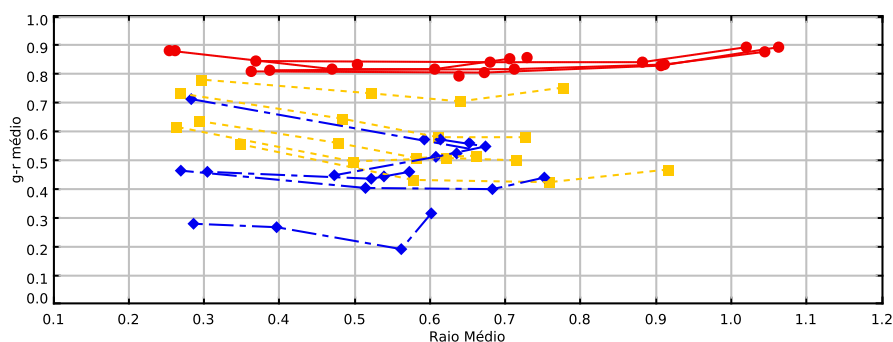


Figura 6.8: Raios médios normalizados e a cor g-r em cada população, para as galáxias NGC6125, NGC4185 e NGC3991.



está presente nas demais galáxias dessa subamostra, sendo o gradiente de cor da galáxia UGC03253 mais plano nas populações P1-P3. Ainda, a galáxia NGC2916 apresentou cor média aproximadamente igual nas populações P2-P3, sendo mais azuis que P1 e P4 (região mais interna e externa). É interessante notar que a inclinação do gradiente de cor nas galáxias espirais se mostrou mais acentuado do que as elípticas, evidenciando que as populações nessa subamostra possuem cores realmente mais azuis nas regiões externas do que nas regiões internas.

O último gráfico da figura 6.8 mostra que a galáxia NGC3991 tende a ser mais azul na população central (P4), embora os raios e cores médias das populações P1-P3 estejam com muita dispersão. Assim como no caso das elípticas, as galáxias UGC10331 e UGC05358 dessa subamostra também exibem as cores médias bastantes próximas uma das outras evidenciando que o gradiente de cor  $g-r$  é aproximadamente plano, i.e., as populações são aproximadamente uniformes. Apenas a galáxia UGC09665 exhibe uma população P4 claramente mais vermelha que as demais populações.



*Figura 6.9:* Raios médios normalizados e a cor  $g-r$  em cada população, para todas as galáxias da amostra. Nota-se que as cores médias das elípticas (pontos e linha contínua vermelha) são maiores do que as espirais (quadrados e linha pontilhada amarela) e espirais tardias (losangos e linha semi-contínua azul), devido a suas populações estelares mais velhas e vermelhas.

Para demonstrar a diferença entre as cores  $g-r$  médias, em cada população, para cada subamostra de galáxias, na figura 6.9 estão as cores médias em função do raio normalizado médio, onde as galáxias elípticas estão representadas pelos pontos vermelhos, as espirais por quadrados amarelos e as espirais tardias por losangos azuis. Nessa comparação fica mais evidente o gradiente quase plano das galáxias elípticas e as diferença das duas espirais tardias, cujos gradientes são menos inclinados.

## 6.4 Coeficiente de Gini

Utilizando o Coeficiente de Gini (CG), podemos obter informações a respeito da concentração da distribuição de contagens nos píxeis em cada população. Lembrando que  $CG=1$  corresponde a uma distribuição de contagens totalmente concentrada e  $CG=0$  uma população com distribuição equitativa (com todos os píxeis contendo o mesmo valor de contagem), na tabela 6.2 são apresentados os Coeficientes de Gini de cada população. Ainda que todos os CG estejam bastante próximos de  $CG=0$ , até mesmo pelo modo como foram determinadas as populações, é notável o fato de que o CG das populações diminuem da população 1 (mais azul) para a população 4 (mais vermelha), mostrando que as populações mais internas se tornam cada vez mais concentradas a medida que a população estelar se torna mais vermelha e velha.

Tabela 6.2 - Coeficientes de Gini para as 4 populações estelares, para cada galáxia.

Galáxia	Pop1	Pop2	Pop3	Pop4
NGC6173	0.00313	0.0375	0.0376	0.0123
NGC6125	0.0145	0.0488	0.0442	0.00623
NGC6146	0.0293	0.0653	0.0288	0.00559
NGC1349	0.0365	0.0205	0.0141	0.00525
UGC05771	0.0669	0.0359	0.0124	0.00366
NGC0776	0.0458	0.0176	0.0131	0.0113
NGC2916	0.0567	0.0210	0.0158	0.0131
NGC7819	0.0236	0.0129	0.00565	0.00368
UGC03253	0.0498	0.0160	0.0112	0.00668
NGC4185	0.0275	0.0122	0.00830	0.00465
UGC00312	0.0274	0.0173	0.0174	0.0202
UGC05358	0.00895	0.0138	0.00650	0.00513
UGC09665	0.0573	0.0290	0.0192	0.00870
UGC10331	0.0254	0.0233	0.0199	0.0163
NGC3991	0.0125	0.0353	0.0396	0.0838

Na figura 6.10 é apresentada relação entre os Coeficientes de Gini e as populações para as 3 galáxias exemplo. Em todas as galáxias elípticas, observamos que o CG é muito próximo de  $CG=0$ , indicando que as contagens em todas as populações são bem distribuídas. Além disso, vemos que o Coeficiente de Gini tende a diminuir com a população, indicando que a distribuição de píxeis se torna mais igualitária na região central. Ainda,

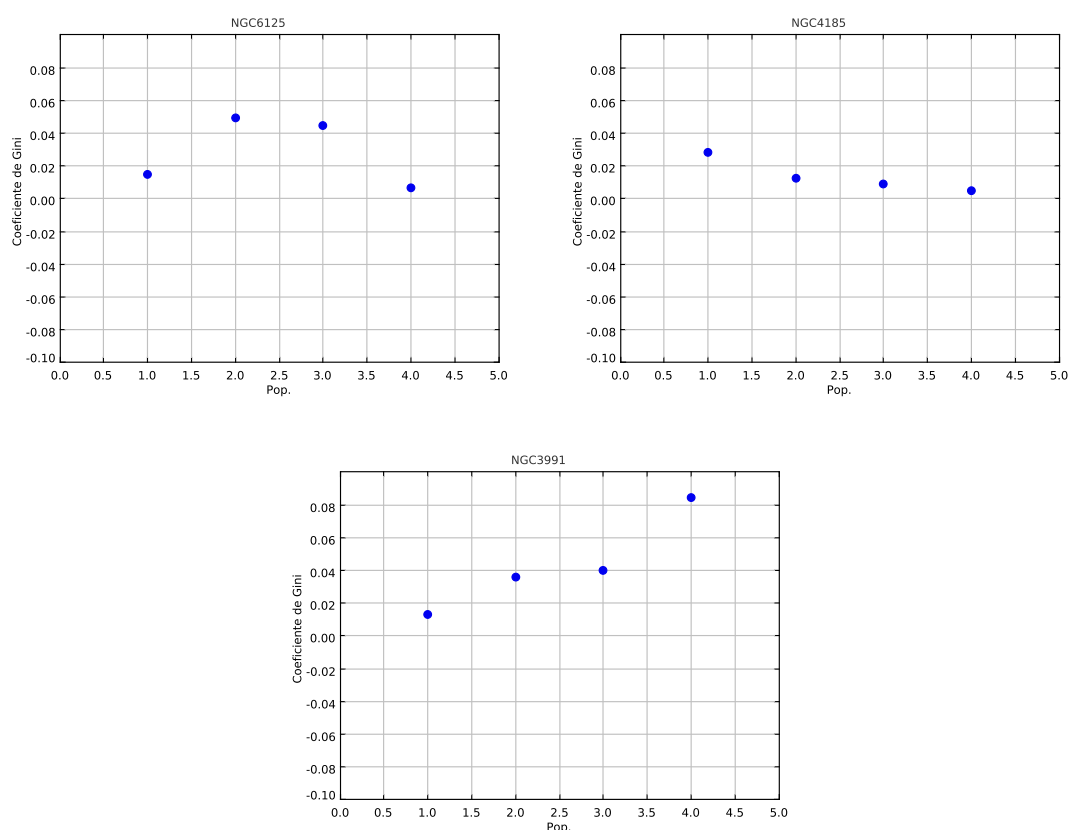


Figura 6.10: Coeficiente de Gini de cada população, para as galáxias NGC6125, NGC4185 e NGC3991.

é de interesse ver que nas galáxias NGC6173, NGC6125 e NGC6146 o CG da população mais externa P1 contraria essa tendência, sendo mais bem distribuída que a população P2 ou P3.

Nas galáxias espirais, observa-se que o CG também se mantém decrescente com as populações em todas as galáxias, mostrando que as populações estelares centrais são mais concentradas. A mesma tendência está presente nas galáxias espirais tardias, exceto na galáxia NGC3991 cujo CG é maior na região central, indicando que nessa galáxia a distribuição nessa região é mais desigual que nas regiões periféricas. Ainda, é notável que a relação entre as populações e os Coeficiente de Gini para as galáxias UGC00312, UGC05358 e UGC10331 é quase constante.

Para efeitos de comparação, na figura 6.11 estão os Coeficiente de Gini em função das populações para todas as galáxias. Como na comparação com as cores médias, as galáxias elípticas estão representadas por pontos vermelhos, as espirais por quadrados amarelos

e as espirais tardias por losangos azuis. Nessa comparação se torne bastante evidente a discrepância da galáxia NGC3991 com a tendência das demais galáxias.

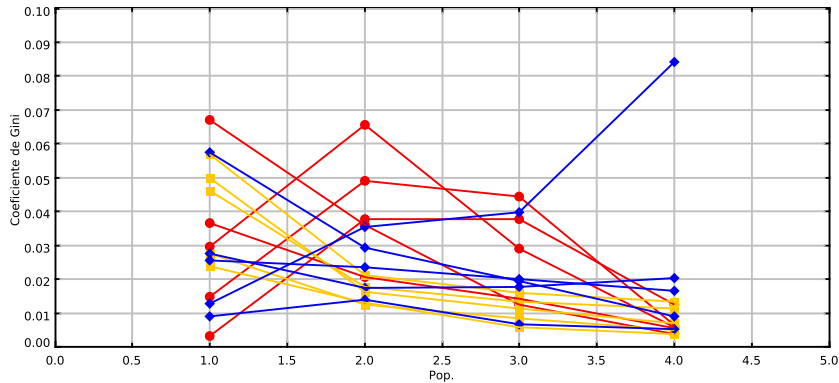


Figura 6.11: Coeficientes de Gini de todas as galáxias da amostra. Em geral, tanto as elípticas (pontos vermelhos) quanto as espirais (quadrados amarelos) e as espirais tardias (losangos azuis) tendem a decrescente com o aumento do raio, exceto a galáxia espiral tardia NGC3991.

## 6.5 Funcionais de Minkowski

Sendo a Característica de Euler-Poincaré (CEP) uma medida topológica da conectividade entre píxeis contínuos pretos e brancos, queremos analisar se essa medida pode ser útil no estudo da morfologia e topologia das distribuições estelares, fornecendo informações a respeito da conectividade e porosidade dos píxeis de cada população. A CEP de uma distribuição é uma medida da porosidade ou conectividade de uma estrutura (Roque et al., 2009). A figura 6.12 exhibe a CEP de cada população das galáxias exemplo, tanto em valor absoluto (a esquerda) quanto normalizada (a direita). Ainda, na tabela 6.3 estão apresentados os valores absolutos da CEP de todas as galáxias.

Analisando a Característica de Euler-Poincaré nas galáxias elípticas, não é observado nenhum comportamento padrão. Considerando que quanto maior a CEP menor a conectividade, aparentemente as populações das galáxias elípticas tendem a ser mais porosas do que as espirais e as espirais tardias. Nas galáxias espirais, excetuando-se a galáxia NGC7819, as população aparentam se tornar mais conexas na região central. Essa mesma tendência aparece nas espirais tardias, exceto na galáxia UGC00312. Essas tendências podem ser observadas na figura 6.13, onde é apresentado a correlação da CEP normalizada

pelo número de píxeis em cada população em função das populações.

*Tabela 6.3* - Funcionais de Minkowski: Característica de Euler-Poincaré para cada população de cor.

Galáxia	CEP Absoluta				CEP Normalizada			
	Pop1	Pop2	Pop3	Pop4	Pop1	Pop2	Pop3	Pop4
NGC6173	197	237	191	219	0.199	0.240	0.194	0.222
NGC6125	161	196	156	170	0.188	0.229	0.182	0.199
NGC6146	108	101	101	105	0.205	0.192	0.192	0.200
NGC1349	86	91	92	74	0.212	0.225	0.227	0.183
UGC05771	67	59	52	50	0.254	0.224	0.197	0.190
NGC0776	91	98	95	55	0.173	0.187	0.187	0.105
NGC2916	118	104	119	87	0.148	0.131	0.150	0.109
NGC7819	55	77	77	40	0.153	0.215	0.214	0.111
UGC03253	57	56	48	32	0.198	0.195	0.167	0.111
NGC4185	153	156	145	81	0.178	0.182	0.168	0.094
UGC00312	24	41	43	24	0.094	0.162	0.170	0.095
UGC05358	41	33	36	27	0.235	0.189	0.206	0.156
UGC09665	24	25	23	9	0.136	0.142	0.134	0.051
UGC10331	28	31	25	22	0.169	0.189	0.152	0.134
NGC3991	18	27	20	13	0.103	0.155	0.114	0.074

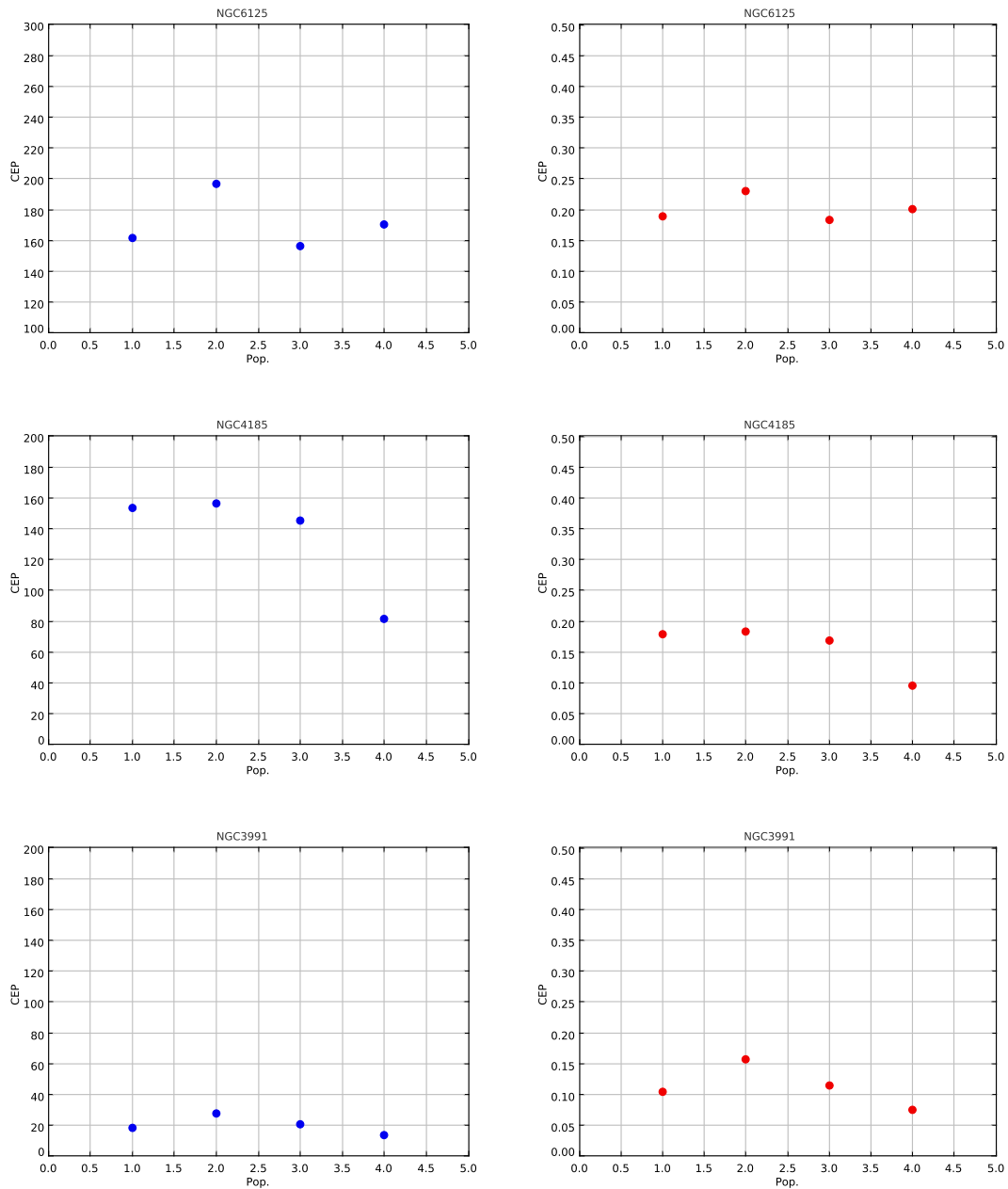


Figura 6.12: Característica de Euler-Poincaré de cada população, para as galáxias NGC6125, NGC4185 e NGC3991. A esquerda está CEP absoluta e a direita está a CEP normalizada.

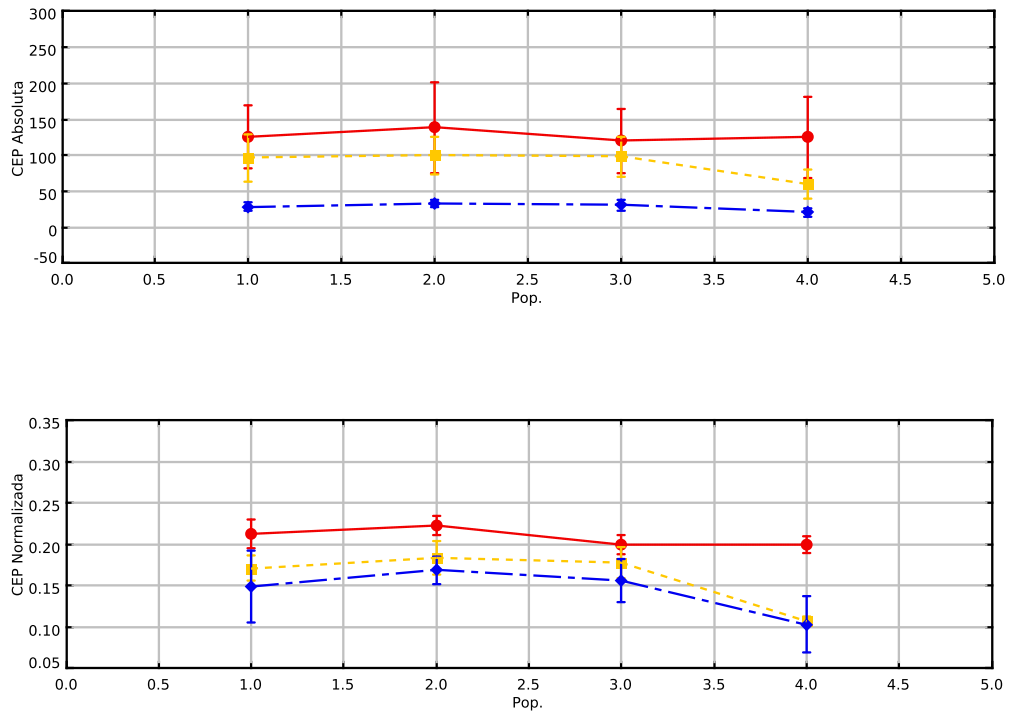


Figura 6.13: Característica de Euler-Poincaré normalizada de todas as galáxias da amostra.





## Conclusões e Perspectivas

Neste último capítulo, serão apresentadas as principais conclusões do trabalho (seção 7.1) e as perspectivas de aplicação em trabalhos futuros (seção 7.2).

### 7.1 Conclusões

Populações estelares são registros fósseis dos processos pelos quais as galáxias passaram durante sua formação e evolução. Utilizando uma abordagem píxel a píxel, analisamos uma pequena amostra de 15 galáxias de diferentes tipos morfológicos com um certo conjunto de estimadores estatísticos a fim de estudar a viabilidade de tal metodologia.

A análise PCA das magnitudes em cada píxel foi utilizada na classificação e determinação de populações estelares. A primeira componente principal (PC1) mostrou boa correlação com as cores em cada píxel, de modo que foi possível utilizá-la como um *proxy* para as populações estelares, através de sua ordenação e binagem em 4 populações. Dada as características fotométricas das imagens, a análise usou como base de estudos a cor  $g-r$  dos píxeis.

Analisando espacialmente cada uma dessas populações para todas as galáxias, viu-se que as populações estelares se organizam em regiões bem definidas, sendo que as populações mais vermelhas, e portanto mais velhas, ficam confinadas basicamente a região central das galáxias, com suas cores ficando mais azuis e jovens à medida que atingem as regiões periféricas. Essa constatação vai ao encontro do cenário *inside-out* que propõe que as galáxias evoluem de dentro para fora (Bell et al., 2004; Daddi et al., 2005; Muñoz-Mateos et al., 2007; Wang et al., 2011). Ainda, notou-se que nas galáxias espirais as características de braços ficaram perceptíveis, indicando que deve haver uma quantidade específica de pop-

ulações estelares que maximize a capacidade de revelar detalhes acerca da distribuição espacial desses braços. Além disso, constatou-se que, em algumas galáxias, a limpeza de *foreground* não foi suficiente, sinalizando que é preciso atentar mais nessa questão em trabalhos futuros.

Corroborando com a distribuição espacial das populações estelares, a análise da cor  $g-r$  média em função dos raios normalizados médios realçou a questão da evolução *inside-out*. A análise do gradiente de cor nas galáxias elípticas mostrou que esse tipo de galáxia possui um gradiente aproximadamente plano, aspecto esse que pode estar conectado tanto ao fato de galáxias desse tipo terem cessado sua formação estelar há muito tempo, evoluindo passivamente, quanto aos efeitos das fusões secas que tendem a misturar as populações, diluindo as diferenças (Di Matteo et al., 2009). Nos casos onde o gradiente se apresentou ligeiramente positivo, seria interessante analisar o meio no qual as galáxias se encontram, para estudar se há alguma possibilidade de ter sido desencadeado algum surto de formação mais recente próximo as regiões centrais, principalmente devido a fusões molhadas (Toomre e Toomre, 1972; Renzini, 2006).

Já os gradientes de cor nas galáxias espirais e espirais tardias se mostraram negativos, ou seja, indicando que nesses objetos a evolução *inside-out* é bastante notável (Huang et al., 2013). Além disso, nota-se que duas galáxias espirais tardias possuem gradiente quase plano, evidenciando também que suas populações são bastantes homogêneas no sentido de que, ao contrário do caso das elípticas, há formação estelar recente em toda a extensão da galáxia (Hunter, 1997; Cioni et al., 2000).

A análise da contagens nos píxeis das populações mostrou que todas as distribuições possuem Coeficiente de Gini deveras próximo de  $CG=0$ , denotando que os valores das contagens das populações se distribuem de modo bastante igualitário. Comparando as populações umas com as outras, percebe-se que as contagens nos píxeis das populações centrais tendem a ser as mais bem distribuídas que as populações adjacentes. Essa característica se faz pertinente, uma vez que é na região central que há uma maior densidade de estrelas velhas que estão evoluindo passivamente (Katz, 1991; Arimoto, 1996; Kobayashi, 2004; Merlin e Chiosi, 2006). A única galáxia que contrariou tal tendência foi a galáxia NGC3991.

A análise da Característica de Euler-Poincaré (CEP) objetiva estudar a conectividade das populações estelares. Entendendo a CEP como uma medida da *porosidade* da dis-

tribuição da população, verificou-se que, ainda que não haja uma regularidade entre o valor da CEP e a população, a CEP das populações estelares das galáxias elípticas são maiores do que as galáxias espirais e espirais tardias, indicando que essas galáxias possuem populações estelares menos conexas e, por tanto, mais porosas.

Num primeiro momento, a análise da CEP das populações estelares não revelou muitas informações sobre as mesmas, entretanto, essa falta de tendência pode estar associada ao pequeno número de objetos utilizado no presente estudo. É possível que a análise de uma amostra estatisticamente significativa mostre que analisar a conectividade/porosidade das populações pode vir a ser ainda bastante útil.

Conforme visto no capítulo 6, a abordagem píxel a píxel das populações estelares nas galáxias se mostrou uma abordagem bastante frutífera, podendo trazer um novo olhar sobre a forma como entendemos a distribuição espacial das populações estelares dentro das galáxias e abrindo inúmeras possibilidades de estudo.

## 7.2 Perspectivas

Uma vez que esta nova abordagem se mostrou promissora, pretende-se ampliar esta análise para uma amostra de dados maior, tais como as fornecidas por grandes *surveys* como o SDSS, J-PAS ou ALHAMBRA. A perspectiva é que tal metodologia possibilite um estudo ainda mais aprofundado de como a distribuição espacial e as medidas das principais características das populações estelares influenciam na formação e evolução das galáxias.

Um próximo passo natural desse projeto é a automatização das análises, de forma que seja possível aplicar tal *approach* em um grande número de dados, podendo assim alcançar resultados estatisticamente relevantes, sendo capaz inclusive de mostrar tendências ainda inimagináveis.

Por último, pretende-se ampliar esta técnica para que seja possível utilizar dados com informações espectrais (IFU) ou em um número maior de bandas, tais como os dados que serão ofertados pelos projetos J-PAS (56 bandas) e ALHAMBRA (20 bandas).



## Referências Bibliográficas

- Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., Allam S. S., Allende Prieto C., An D., Anderson K. S. J., Anderson S. F., Annis J., Bahcall N. A., et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, *ApJS*, 2009, vol. 182, p. 543
- Abraham R. G., van den Bergh S., Nair P., P. P., A New Approach to Galaxy Morphology. I. Analysis of the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release, *ApJ*, 2003, vol. 588, p. 218
- Aihara H., Allende Prieto C., An D., Anderson S. F., Aubourg É., Balbinot E., Beers T. C., Berlind A. A., Bickerton S. J., Bizyaev D., The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III, *ApJS*, 2011, vol. 193, p. 29
- Alongi M., Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Fagotto F., Greggio L., Nasi E., Evolutionary sequences of stellar models with semiconvection and convective overshoot. I -  $Z = 0.008$ , *A&AS*, 1993, vol. 97, p. 851
- Andreon S., Gargiulo G., Longo G., Tagliaferri R., Capuano N., Wide field imaging - I. Applications of neural networks to object detection and star/galaxy classification, *MNRAS*, 2000, vol. 319, p. 700
- Arimoto N., Stellar Population Synthesis Models for Elliptical Galaxies. In *From Stars to Galaxies: the Impact of Stellar Physics on Galaxy Evolution*, vol. 98 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 1996, p. 287
- Baade W., The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula., *ApJ*, 1944, vol. 100, p. 137

- Baldry I. K., Glazebrook K., Brinkmann J., Ivezić Ž., Lupton R. H., Nichol R. C., Szalay A. S., Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies, *ApJ*, 2004, vol. 600, p. 681
- Barker M. K., Sarajedini A., Geisler D., Harding P., Schommer R., The Stellar Populations in the Outer Regions of M33. III. Star Formation History, *AJ*, 2007, vol. 133, p. 1138
- Belcheva M. K., Livanou E., Kontizas M., Nikolov G. B., Kontizas E., Spatial distribution of stellar populations in the Magellanic Clouds: implementation to Gaia, *A&A*, 2011, vol. 527, p. A31
- Bell E. F., Wolf C., Meisenheimer K., Rix H.-W., Borch A., Dye S., Kleinheinrich M., Wisotzki L., McIntosh D. H., Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since  $z \sim 1$ , *ApJ*, 2004, vol. 608, p. 752
- Bruzual G., Charlot S., Stellar population synthesis at the resolution of 2003, *MNRAS*, 2003, vol. 344, p. 1000
- Calzetti D., Star Formation Rate Indicators, *ArXiv e-prints*, 2012
- Carruba V., An analysis of the Hygiea asteroid family orbital region, *MNRAS*, 2013
- Chabrier G., Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function, *PASP*, 2003, vol. 115, p. 763
- Cid Fernandes R., Asari N. V., Sodré L., Stasińska G., Mateus A., Torres-Papaqui J. P., Schoenell W., Uncovering the chemical enrichment and mass-assembly histories of star-forming galaxies, *MNRAS*, 2007, vol. 375, p. L16
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasińska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 363
- Cioni M.-R. L., Habing H. J., Israel F. P., The morphology of the Magellanic Clouds revealed by stars of different age: results from the DENIS survey, *A&A*, 2000, vol. 358, p. L9
- Colless M., First results from the 2dF Galaxy Redshift Survey, *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, 1999, vol. 357, p. 105

- Colless M., Boyle B., Redshift Surveys with 2DF, *Highlights of Astronomy*, 1998, vol. 11, p. 473
- Connolly A. J., Szalay A. S., Bershadsky M. A., Kinney A. L., Calzetti D., Spectral Classification of Galaxies: an Orthogonal Approach, *AJ*, 1995, vol. 110, p. 1071
- Costa-Duarte M. V., Sodré Jr. L., Durret F., Morphological properties of superclusters of galaxies, *MNRAS*, 2011, vol. 411, p. 1716
- Daddi E., Renzini A., Pirzkal N., Cimatti A., Malhotra S., Stiavelli M., Xu C., Pasquali A., Rhoads J. E., Brusa M., di Serego Alighieri S., Ferguson H. C., Koekemoer A. M., Moustakas L. A., Panagia N., Windhorst R. A., Passively Evolving Early-Type Galaxies at  $1.4 < z < 2.5$  in the Hubble Ultra Deep Field, *ApJ*, 2005, vol. 626, p. 680
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H. G., Buta R. J., Paturel G., Fouque P., Third Reference Cat. of Bright Galaxies (RC3) (de Vaucouleurs+ 1991), *VizieR Online Data Catalog*, 1995, vol. 7155, p. 0
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin Jr. H. G., Second reference catalogue of bright galaxies. Containing information on 4,364 galaxies with references to papers published between 1964 and 1975., 1976
- de Vaucouleurs G. H., de Vaucouleurs A., Shapley H., Reference catalogue of bright galaxies, 1964
- Di Matteo P., Pipino A., Lehnert M. D., Combes F., Semelin B., On the survival of metallicity gradients to major dry-mergers, *A&A*, 2009, vol. 499, p. 427
- Díaz E., Zandivarez A., Merchán M. E., Muriel H., Two Degree Field Galaxy Redshift Survey and Sloan Digital Sky Survey Galaxy Group Density Profiles, *ApJ*, 2005, vol. 629, p. 158
- Dottori H., Bica E., Claria J. J., Puerari I., Spatial Distributions of Young Large Magellanic Cloud Clusters as Tracers of a Bar Perturbation, *ApJ*, 1996, vol. 461, p. 742
- Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed., *ApJ*, 1962, vol. 136, p. 748

- Faber S. M., Quadratic programming applied to the problem of galaxy population synthesis., *A&A*, 1972, vol. 20, p. 361
- Fall S. M., Efstathiou G., Formation and rotation of disc galaxies with haloes, *MNRAS*, 1980, vol. 193, p. 189
- Ferguson A. M. N., Clarke C. J., The evolution of stellar exponential discs, *MNRAS*, 2001, vol. 325, p. 781
- Folkes S. R., Lahav O., Maddox S. J., An artificial neural network approach to the classification of galaxy spectra., *MNRAS*, 1996, vol. 283, p. 651
- Freeman K., Bland-Hawthorn J., The New Galaxy: Signatures of Its Formation, *ARA&A*, 2002, vol. 40, p. 487
- García Benito R., Pérez Jiménez E., González Delgado R. R. C. F., Sánchez S. F., Amorim A. L., Califa Collaboration The mass growth in galaxies: CALIFA's perspective. In Highlights of Spanish Astrophysics VII , 2013, p. 218
- Gargiulo A., Saracco P., Longhetti M., La Barbera F., Tamburri S., Spatially resolved colours and stellar population properties in early-type galaxies at  $z \sim 1.5$ , *MNRAS*, 2012, vol. 425, p. 2698
- Gini C., Variabilità e mutabilità, reprinted in *Memorie di Metodologia Statistica*, 1912
- Girardi L., Bressan A., Chiosi C., Bertelli G., Nasi E., Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. VI.  $Z=0.0001$ ., *A&AS*, 1996, vol. 117, p. 113
- Glasser G. J., Variance formulas for the mean difference and coefficient of concentration, *Journal of the American Statistical Association*, 1962, vol. 57
- Gonidakis I., Livanou E., Kontizas E., Klein U., Kontizas M., Belcheva M., Tsalmantza P., Karampelas A., Structure of the SMC. Stellar component distribution from 2MASS data, *A&A*, 2009, vol. 496, p. 375
- González Delgado R., Pérez E., Cid Fernandes R., García-Benito R., de Amorim A. L., Sánchez S. F., Husemann B., López Fernández R., Cortijo-Ferrero CALIFA survey: The spatially resolved star formation history of massive galaxies, *ArXiv e-prints*, 2013



- 
- Harnois-Déraps J., Pen U.-L., Non-Gaussian error bars in galaxy surveys - II, *MNRAS*, 2013
- Helou G., Madore B. F., Schmitz M., Wu X., Corwin Jr. H. G., Lague C., Bennett J., Sun H., The NASA/IPAC Extragalactic Database.. In *Information On-Line Data in Astronomy* , vol. 203 of *Astrophysics and Space Science Library*, 1995, p. 95
- Hikage C., Schmalzing J., Buchert T., Suto Y., Kayo I., Taruya A., Vogeley M. S., Hoyle F., Gott III J. R., Brinkmann J., *Minkowski Functionals of SDSS Galaxies I : Analysis of Excursion Sets*, *PASJ*, 2003, vol. 55, p. 911
- Hopkins P. F., Bundy K., Murray N., Quataert E., Lauer T. R., Ma C.-P., Compact high-redshift galaxies are the cores of the most massive present-day spheroids, *MNRAS*, 2009, vol. 398, p. 898
- Hotelling H., *Analysis of a Complex of Statistical Variables Into Principal Components*, *Journal of Educational Psychology*, 1933
- Huang M.-L., Kauffmann G., Chen Y.-M., Moran S. M., Heckman T. M., Davé R., Johansson J., Spatially resolved star formation histories of nearby galaxies: evidence for episodic star formation in discs, *MNRAS*, 2013, vol. 431, p. 2622
- Hubble E., A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae, *Proceedings of the National Academy of Science*, 1929, vol. 15, p. 168
- Hubble E. P., Photographic investigations of faint nebulae, *Publications of the Yerkes Observatory*, 1920, vol. 4, p. 2
- Hubble E. P., A general study of diffuse galactic nebulae., *ApJ*, 1922, vol. 56, p. 162
- Hubble E. P., Extragalactic nebulae., *ApJ*, 1926, vol. 64, p. 321
- Huchra J., Davis M., Latham D., Tonry J., A survey of galaxy redshifts. IV - The data, *ApJS*, 1983, vol. 52, p. 89
- Hunter D., *Star Formation in Irregular Galaxies: A Review of Several Key Questions*, *PASP*, 1997, vol. 109, p. 937

- Husemann B., Jahnke K., Sánchez S. F., Barrado D., Bekeraite S., Bomans D. J., Castillo-Morales A., Catalán-Torrecilla C., Cid Fernandes R., Falcón-Barroso J., García-Benito R., González Delgado R., CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. II. First public data release, *A&A*, 2013, vol. 549, p. A87
- Ivezic Z., Tyson J. A., Axelrod T., Burke D., Claver C. F., Cook K. H., Kahn S. M., Lupton R. H., Monet D. G., Pinto P. A., Strauss M. A., Stubbs C. W., Jones L., Saha A., Scranton R., Smith C., LSST Collaboration LSST: From Science Drivers To Reference Design And Anticipated Data Products. In American Astronomical Society Meeting Abstracts 213 , vol. 41 of Bulletin of the American Astronomical Society, 2009, p. 460.03
- Katz N., Dissipationless collapse in an expanding universe, *ApJ*, 1991, vol. 368, p. 325
- Kauffmann G., Heckman T. M., White S. D. M., Charlot S., Tremonti C., Peng E. W., Seibert M., Brinkmann J., Nichol R. C., SubbaRao M., York D., The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for  $10^5$  low-redshift galaxies, *MNRAS*, 2003, vol. 341, p. 54
- Kelz A., Verheijen M. A. W., Roth M. M., Bauer S. M., Becker T., Paschke J., Popow E., Sánchez S. F., Laux U., PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. II. The Wide Integral Field Unit PPak, *PASP*, 2006, vol. 118, p. 129
- Kobayashi C., GRAPE-SPH chemodynamical simulation of elliptical galaxies - I. Evolution of metallicity gradients, *MNRAS*, 2004, vol. 347, p. 740
- Kong X., Charlot S., Brinchmann J., Fall S. M., Star formation history and dust content of galaxies drawn from ultraviolet surveys, *MNRAS*, 2004, vol. 349, p. 769
- Kučinskas A., Bridžius A., Vansevičius V., Globular Clusters in the Large Magellanic Cloud: An Impact from GAIA Photometry, *Ap&SS*, 2002a, vol. 280, p. 159
- Kučinskas A., Bridžius A., Vansevičius V., Stellar Populations in the Large Magellanic Cloud: The Impact from GAIA. In EAS Publications Series , vol. 2 of EAS Publications Series, 2002b, p. 383

- Lara-López M. A., López-Sánchez Á. R., Hopkins A. M., On the Three-dimensional Structure of the Mass, Metallicity, and Star Formation Rate Space for Star-forming Galaxies, *ApJ*, 2013, vol. 764, p. 178
- Larson R. B., Tinsley B. M., Photometric Properties of Model Spherical Galaxies, *ApJ*, 1974, vol. 192, p. 293
- Le Borgne J.-F., Bruzual G., Pelló R., Lançon A., Rocca-Volmerange B., Sanahuja B., Schaerer D., Soubiran C., Vílchez-Gómez R., STELIB: A library of stellar spectra at  $R \sim 2000$ , *A&A*, 2003, vol. 402, p. 433
- Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D., González Delgado R. M., Robert C., Kune D. F., de Mello D. F., Devost D., Heckman T. M., Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation, *ApJS*, 1999, vol. 123, p. 3
- Lin D. N. C., Pringle J. E., The formation of the exponential disk in spiral galaxies, *ApJ*, 1987, vol. 320, p. L87
- Maragoudaki F., Kontizas M., Kontizas E., Dapergolas A., Morgan D. H., The LMC stellar complexes in luminosity slices. Star formation indicators, *A&A*, 1998, vol. 338, p. L29
- Maragoudaki F., Kontizas M., Morgan D. H., Kontizas E., Dapergolas A., Livanou E., The recent structural evolution of the SMC, *A&A*, 2001, vol. 379, p. 864
- Marino R. A., Gil de Paz A., Sánchez S. F., Castillo-Morales A., CALIFA Team Studying nearby disk galaxies with the CALIFA survey., *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 2012, vol. 19, p. 290
- Marzke R., McCarthy P. J., Persson E., Oemler A., Dressler A., Yan M. B. L., Carlberg R., Abraham R., Ellis R., Firth A., Mackay C., McMahon R. G., The Las Campanas Infrared Survey. In *Photometric Redshifts and the Detection of High Redshift Galaxies*, vol. 191 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 1999, p. 148
- Mateus A., Sodré L., Cid Fernandes R., Stasińska G., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - IV. A nature via nurture scenario for galaxy evolution, *MNRAS*, 2007, vol. 374, p. 1457

- Mateus A., Sodré L., Cid Fernandes R., Stasińska G., Schoenell W., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited, *MNRAS*, 2006, vol. 370, p. 721
- McGurk R. C., Kimball A. E., Ivezić Ž., Principal Component Analysis of Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra, *AJ*, 2010, vol. 139, p. 1261
- Mecke K. R., , Munich, 1993, Tese de Doutorado
- Mecke K. R., Morphological characterization of patterns in reaction-diffusion systems, *Phys. Rev. E*, 1996, vol. 53, p. 4794
- Merlin E., Chiosi C., Formation and evolution of early-type galaxies. II. Models with quasi-cosmological initial conditions, *A&A*, 2006, vol. 457, p. 437
- Morgan W. W., The Integrated Spectral Types of Globular Clusters, *PASP*, 1956, vol. 68, p. 509
- Muñoz Bermejo J., Asensio Ramos A., Allende Prieto C., A PCA approach to stellar effective temperatures, *ArXiv e-prints*, 2013
- Muñoz-Mateos J. C., Gil de Paz A., Boissier S., Zamorano J., Jarrett T., Gallego J., Madore B. F., Specific Star Formation Rate Profiles in Nearby Spiral Galaxies: Quantifying the Inside-Out Formation of Disks, *ApJ*, 2007, vol. 658, p. 1006
- Murtagh F., Heck A., *Multivariate Data Analysis 2 edn.* Springer, 1987
- Naab T., Ostriker J. P., A simple model for the evolution of disc galaxies: the Milky Way, *MNRAS*, 2006, vol. 366, p. 899
- Nikolaev S., Weinberg M. D., Stellar Populations in the Large Magellanic Cloud from 2MASS, *ApJ*, 2000, vol. 542, p. 804
- Owensworth J. R., Conselice C. J., Mortlock A., Hartley W. G., Buitrago F., Evolution of massive galaxy structural properties and sizes via star formation in the GOODS NICMOS Survey, *MNRAS*, 2012, vol. 426, p. 764
- Pearson K., On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *Philosophical Magazine*, 1901

- 
- Pérez E., Cid Fernandes R., González Delgado R. M., García-Benito R., Sánchez S. F., Husemann B., Mast D., Rodón J. R., Kupko D., Backsmann N., de Amorim A. L., van de Ven G., Walcher J., The Evolution of Galaxies Resolved in Space and Time: A View of Inside-out Growth from the CALIFA Survey, *ApJ*, 2013, vol. 764, p. L1
- Rehse S., Characterization of the dynamics of block copolymer microdomains with local morphological measures, *Phys. Rev. E*, 2008
- Renzini A., Stellar Population Diagnostics of Elliptical Galaxy Formation, *ARA&A*, 2006, vol. 44, p. 141
- Roque W. L., Souza A. C. A., Barbieri D. X., Característica de Euler-Poincaré aplicada para identificar baixa densidade óssea a partir de imagens tomográficas de vértebras, *Revista Brasileira de Reumatologia*, 2009, vol. 49
- Rosenfeld A., Kak C., *Digital Picture Processing*, Academic, 1976
- Roth M. M., Kelz A., Fechner T., Hahn T., Bauer S.-M., Becker T., Böhm P., Christensen L., Dionies F., Paschke J., Popow E., Wolter D., Schmoll J., Laux U., Altmann W., PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance, *PASP*, 2005, vol. 117, p. 620
- Ruiz-Lara T., Florido E., Pérez I., Sánchez-Blázquez P., Falcón-Barroso J., Cacho R., Stellar populations in the outskirts of spiral galaxies using IFU CALIFA data. In *Highlights of Spanish Astrophysics VII*, 2013, p. 367
- Sánchez S. F., Kennicutt R. C., Gil de Paz A., van de Ven G., Vílchez J. M., Wisotzki L., Walcher C. J., Mast D., Aguerri J. A. L., Albiol-Pérez S., Alonso-Herrero A., Alves J., Colaborations. C., CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation, *A&A*, 2012, vol. 538, p. A8
- Sánchez S. F., Kennicutt R. C., Gil de Paz A., van den Ven G., Vilchez J. M., Wisotzki L., Marino R. A., Mármol-Queraltó E., Mast D., Viironen K., CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey: early report. In *Highlights of Spanish Astrophysics VI*, 2011, p. 339

- Sánchez S. F., Rosales-Ortega F. F., Jungwiert B., Iglesias-Páramo J., Vílchez J. M., Marino R. A., Walcher C. J., Husemann B., Mast D., Monreal-Ibero A., Cid Fernandes R., Pérez E., Califa Collaboration Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate?, *A&A*, 2013, vol. 554, p. A58
- Sandage A., Tammann G. A., A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies, 1980
- Santaló L. A., *Integral Geometry and Geometric Probability*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1976
- Serra J., *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic, 1982, vol. 1 and 2
- Shapley H., Ames A., A survey of the external galaxies brighter than the thirteenth magnitude, *Annals of Harvard College Observatory*, 1932, vol. 88, p. 41
- Shectman S. A., Landy S. D., Oemler A., Tucker D. L., Lin H., Kirshner R. P., Schechter P. L., The Las Campanas Redshift Survey, *ApJ*, 1996, vol. 470, p. 172
- Sodré L., Cuevas H., Global regularities in integrated galaxy spectra, *MNRAS*, 1997, vol. 287, p. 137
- Sodré Jr. L., Cosmology with large galaxy redshift surveys. In *American Institute of Physics Conference Series*, vol. 1471 of *American Institute of Physics Conference Series*, 2012a, p. 22
- Sodré Jr. L., Optical Galaxy redshift surveys. In *SF2A-2012: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2012b, p. 481
- Sodré Jr. L., Stasińska G., The emission line sequence of normal spiral galaxies, *A&A*, 1999, vol. 345, p. 391
- Spinrad H., Taylor B. J., The Stellar Content of the Nuclei of Nearby Galaxies. II. a Note on NGC 4594, *ApJ*, 1972, vol. 171, p. 397
- Spite M., GAIA and the Stellar Populations in the Magellanic Clouds. In *EAS Publications Series*, vol. 2 of *EAS Publications Series*, 2002, p. 287
- Strateva I., Ivezić Ž., Knapp G. R., Narayanan V. K., Strauss M. A., Gunn J. E., Lupton R. H., Schlegel D., Bahcall N. A., Brinkmann J., Brunner R. J., Budavári T., Color

- 
- Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1861
- Tinsley B. M., Evolution of the Stars and Gas in Galaxies, *Fund. Cosmic Phys.*, 1980, vol. 5, p. 287
- Tinsley B. M., Gunn J. E., Evolutionary synthesis of the stellar population in elliptical galaxies. I - Ingredients, broad-band colors, and infrared features, *ApJ*, 1976, vol. 203, p. 52
- Toomre A., Toomre J., Galactic Bridges and Tails, *ApJ*, 1972, vol. 178, p. 623
- Trac H., Mitsouras D., Hickson P., Brandenberger R., Topology of the Las Campanas Redshift Survey, *MNRAS*, 2002, vol. 330, p. 531
- Vale Asari N., Stasińska G., Cid Fernandes R., Gomes J. M., Schlickmann M., Mateus A., Schoenell W., The evolution of the mass-metallicity relation in SDSS galaxies uncovered by astropaleontology, *MNRAS*, 2009, vol. 396, p. L71
- van der Marel R. P., Magellanic Cloud Structure from Near-Infrared Surveys. II. Star Count Maps and the Intrinsic Elongation of the Large Magellanic Cloud, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1827
- van der Marel R. P., Cioni M.-R. L., Magellanic Cloud Structure from Near-Infrared Surveys. I. The Viewing Angles of the Large Magellanic Cloud, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1807
- Verheijen M. A. W., Bershadsky M. A., Andersen D. R., Swaters R. A., Westfall K., Kelz A., Roth M. M., The Disk Mass project; science case for a new PMAS IFU module, *Astronomische Nachrichten*, 2004, vol. 325, p. 151
- Wang J., Kauffmann G., Overzier R., Catinella B., Schiminovich D., Heckman T. M., Moran S. M., Haynes M. P., Giovanelli R., Kong X., The GALEX Arecibo SDSS survey - III. Evidence for the inside-out formation of Galactic discs, *MNRAS*, 2011, vol. 412, p. 1081
- Wood D. B., Multicolor Photoelectric Photometry of Galaxies, *ApJ*, 1966, vol. 145, p. 36

Wuyts S., Cox T. J., Hayward C. C., Franx M., Hernquist L., Hopkins P. F., Jonsson P., van Dokkum P. G., On Sizes, Kinematics, M/L Gradients, and Light Profiles of Massive Compact Galaxies at  $z \sim 2$ , *ApJ*, 2010, vol. 722, p. 1666

Yip C. W., Connolly A. J., Vanden Berk D. E., Ma Z., Frieman J. A., SubbaRao M., Szalay A. S., Richards G. T., Hall P. B., Schneider D. P., Hopkins A. M., Trump J., Brinkmann J., Spectral Classification of Quasars in the Sloan Digital Sky Survey: Eigenspectra, Redshift, and Luminosity Effects, *AJ*, 2004, vol. 128, p. 2603

Zhao G.-B., Pogosian L., Silvestri A., Zylberberg J., Cosmological Tests of General Relativity with Future Tomographic Surveys, *Physical Review Letters*, 2009, vol. 103, p. 241301



# Apêndice



## Apêndice - Resultados

### *A.1 PCA e Populações Estelares Píxel a Píxel*

A seguir são apresentadas as correlações entre a primeira componente principal e as cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  para as galáxias elípticas A.1.1, espirais A.1.2 e espirais tardias A.1.3. Dada a arbitrariedade da orientação da PCA, convencionou-se que quanto maior a primeira componente principal, maior a cor dos píxeis.

#### *A.1.1 Galáxias Elípticas*

PCA em função das cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  para as 4 populações estelares, nas galáxias da subamostra de galáxias elípticas.

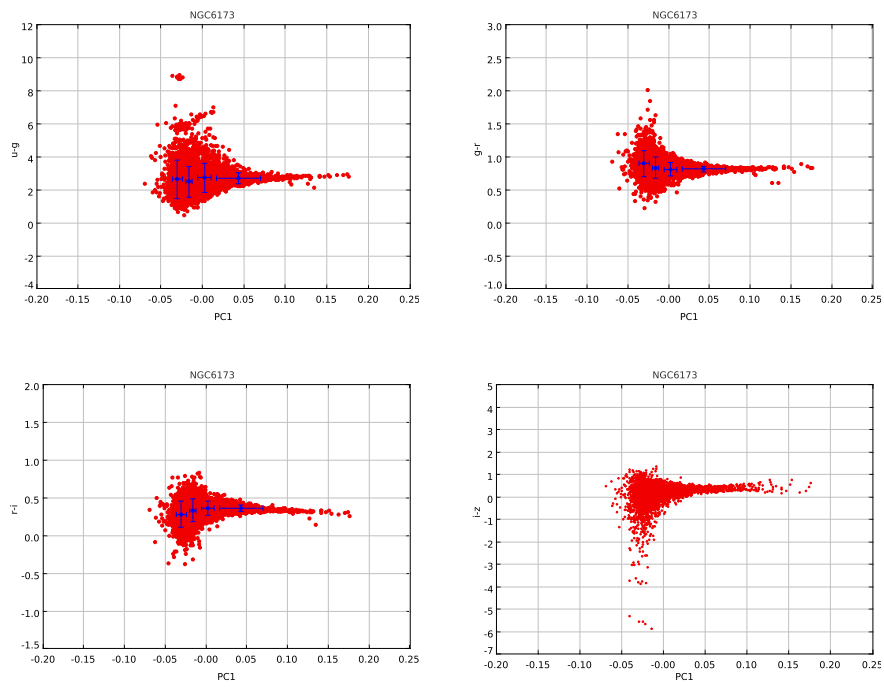


Figura A.1: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC6173.

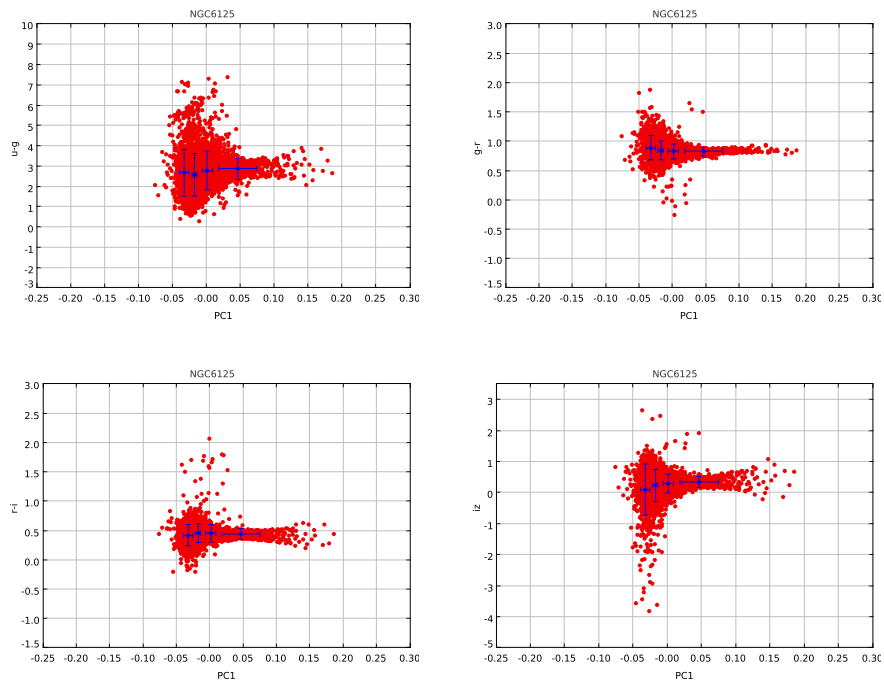


Figura A.2: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC6125.

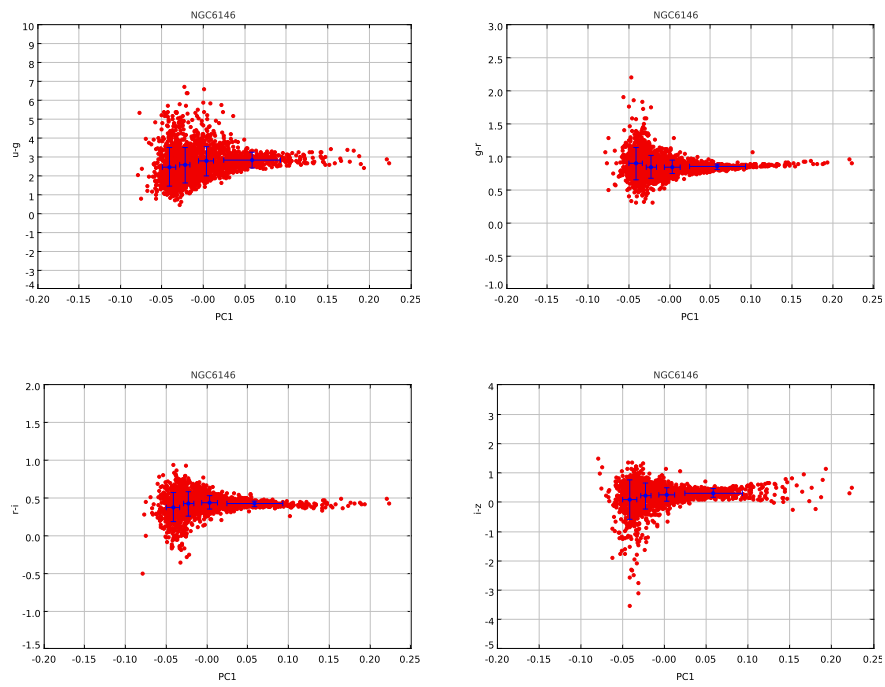


Figura A.3: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC6146.

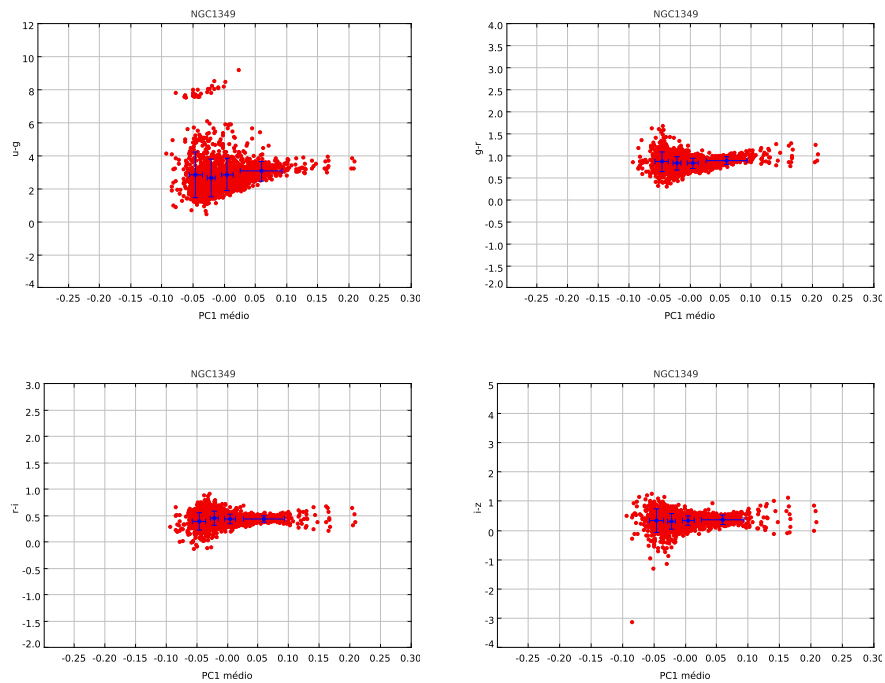


Figura A.4: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC1349.

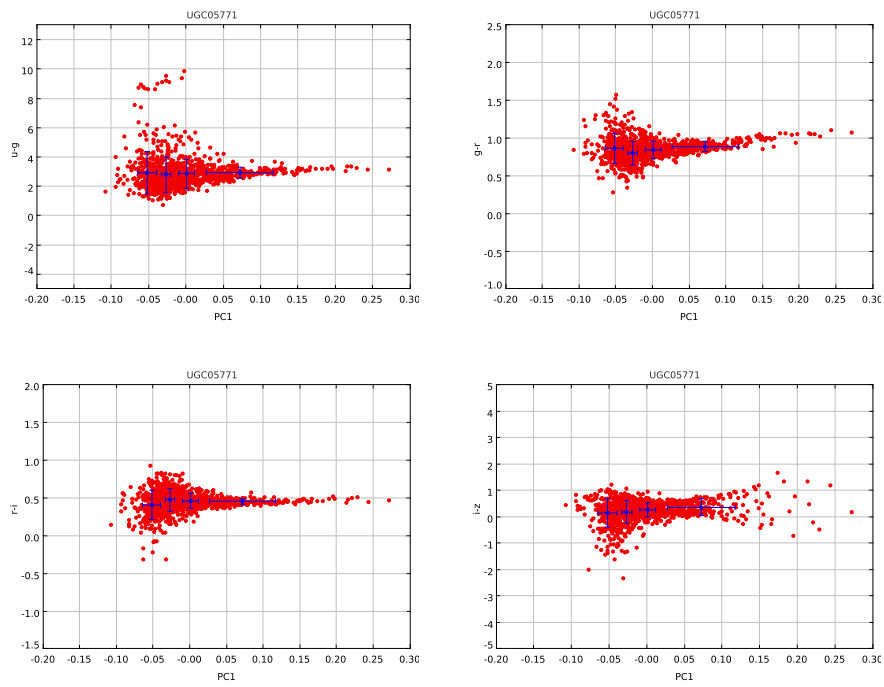


Figura A.5: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC05771.

### A.1.2 Galáxias Espirais

PCA em função das cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  para as 4 populações estelares, nas galáxias da subamostra de galáxias espirais.

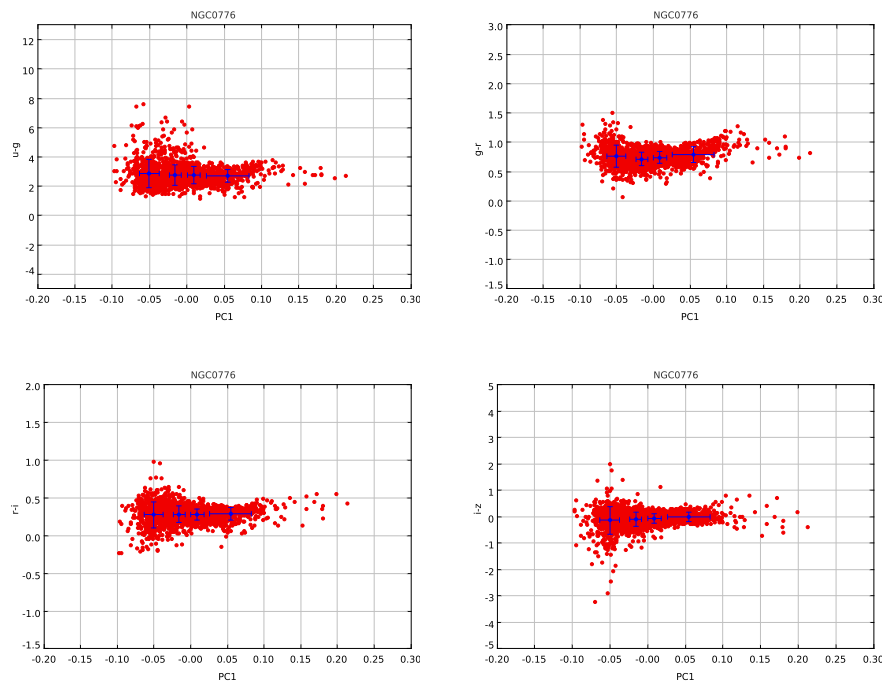


Figura A.6: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC0776.

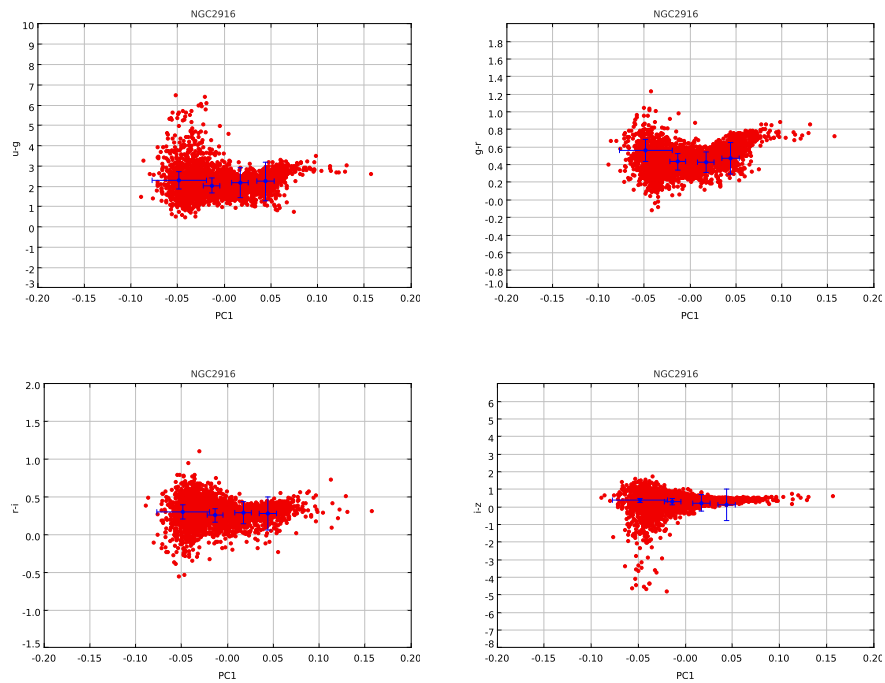


Figura A.7: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC2916.

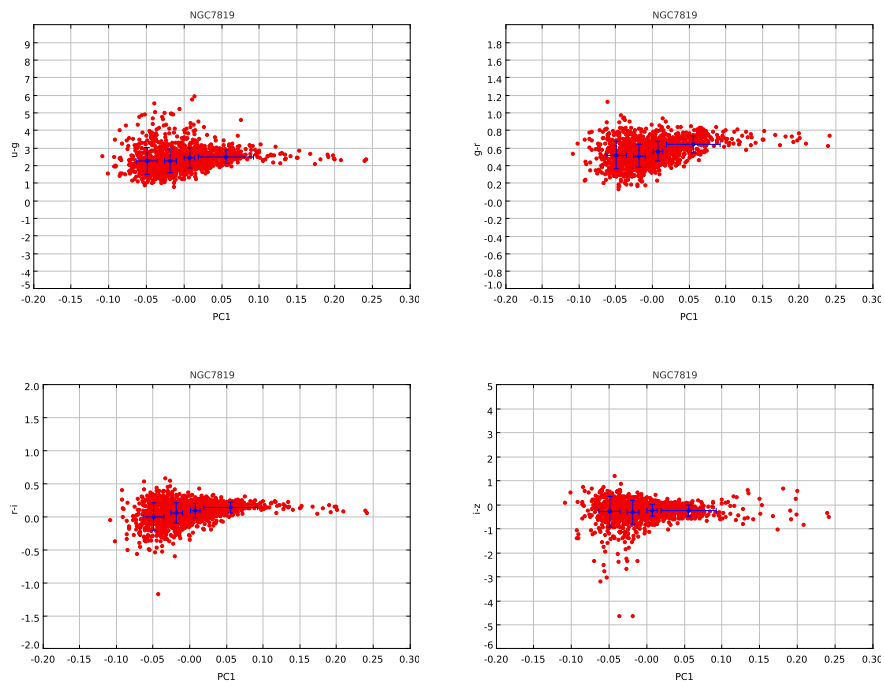


Figura A.8: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC7819.

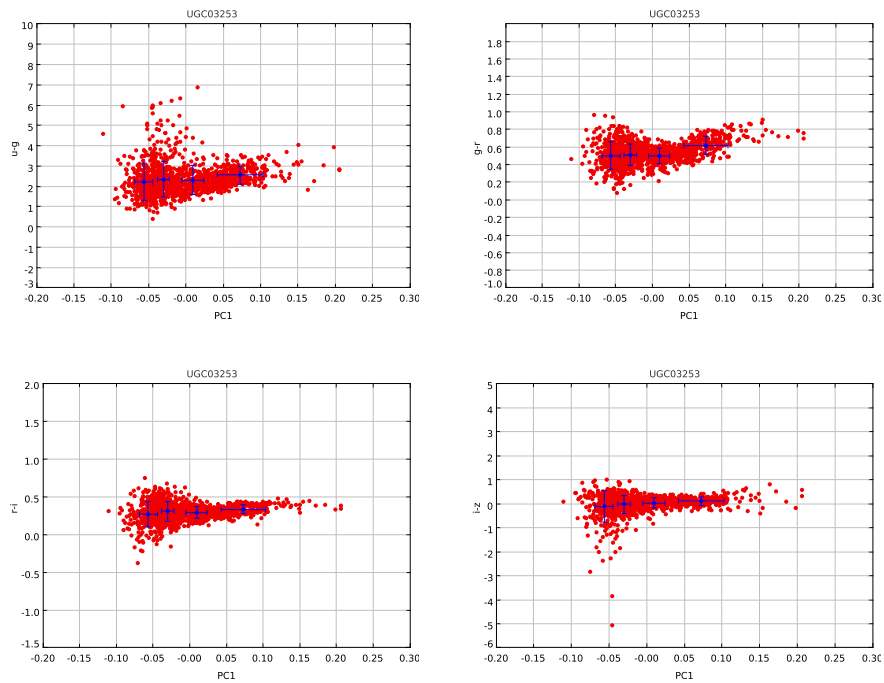


Figura A.9: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC03253.



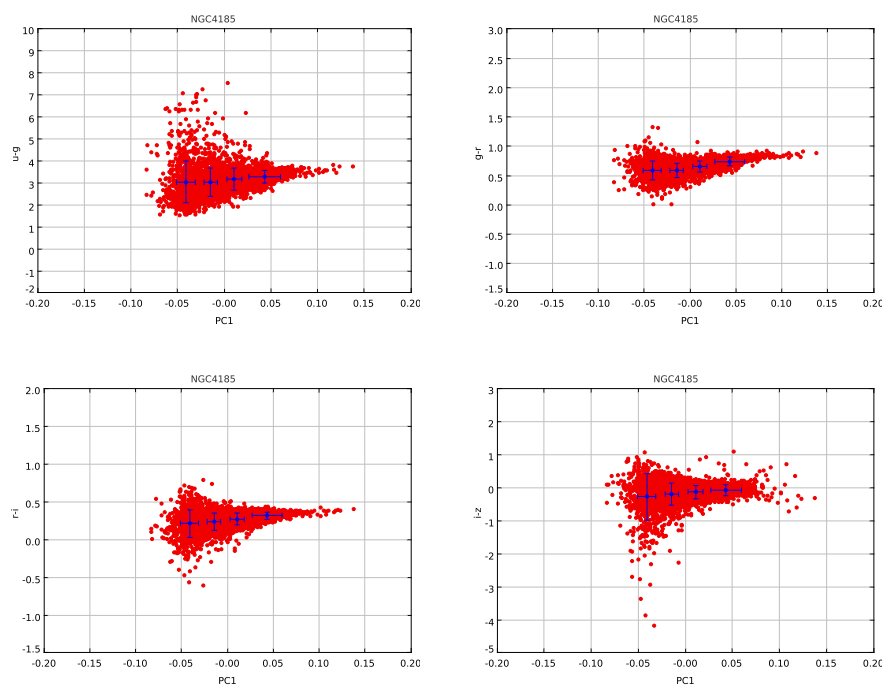


Figura A.10: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC4185.

### A.1.3 Galáxias Espirais Tardias

PCA em função das cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  para as 4 populações estelares, nas galáxias da subamostra de galáxias espirais tardias.

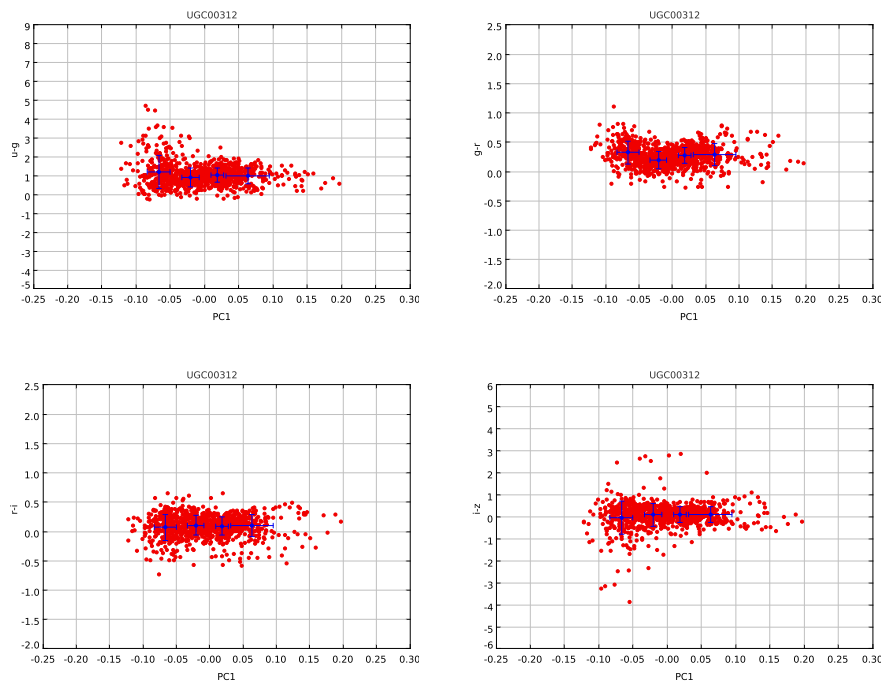


Figura A.11: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC00312.

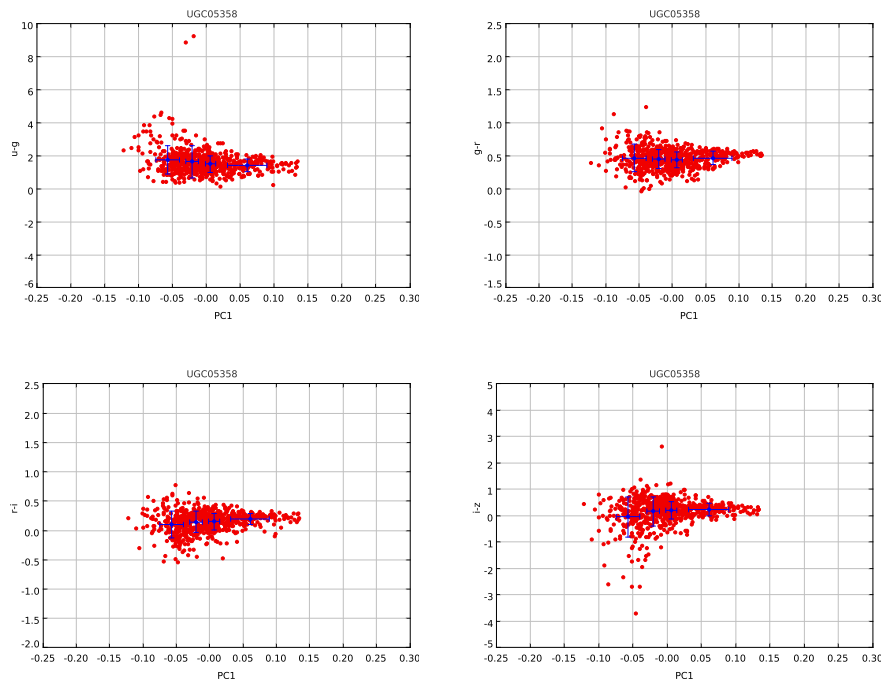


Figura A.12: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC05358.

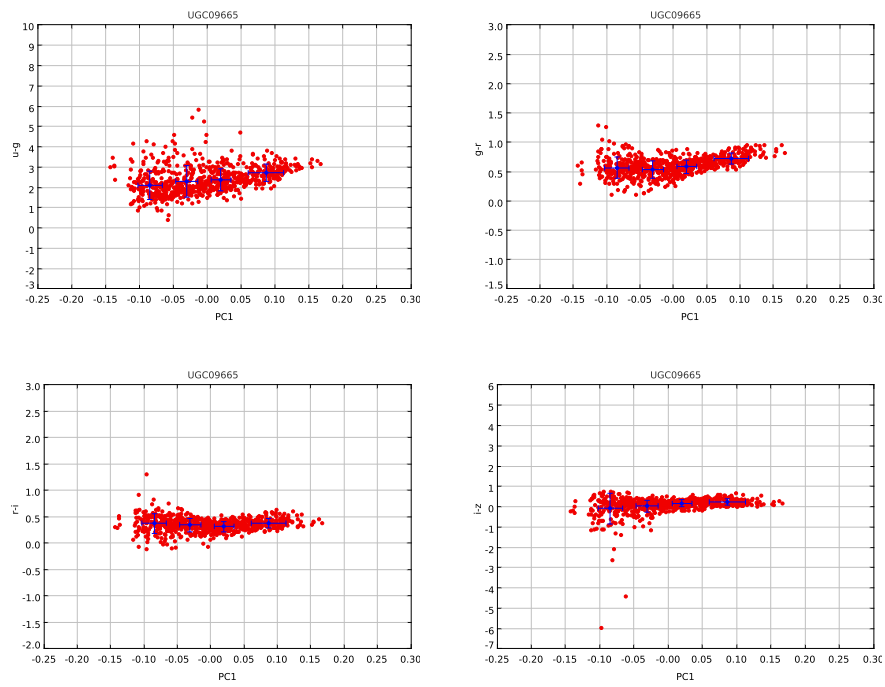


Figura A.13: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC09665.

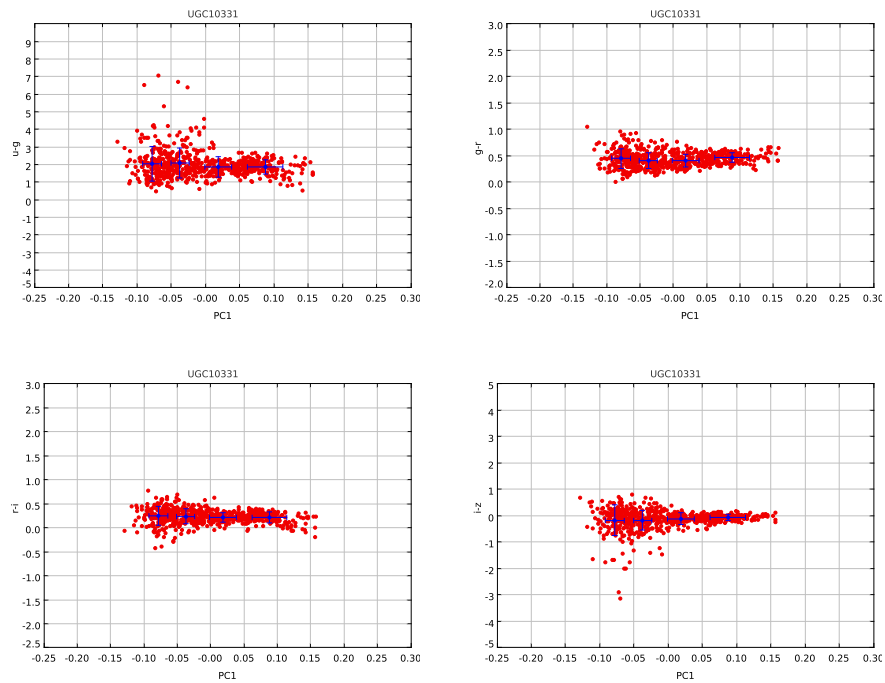


Figura A.14: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para UGC10331.

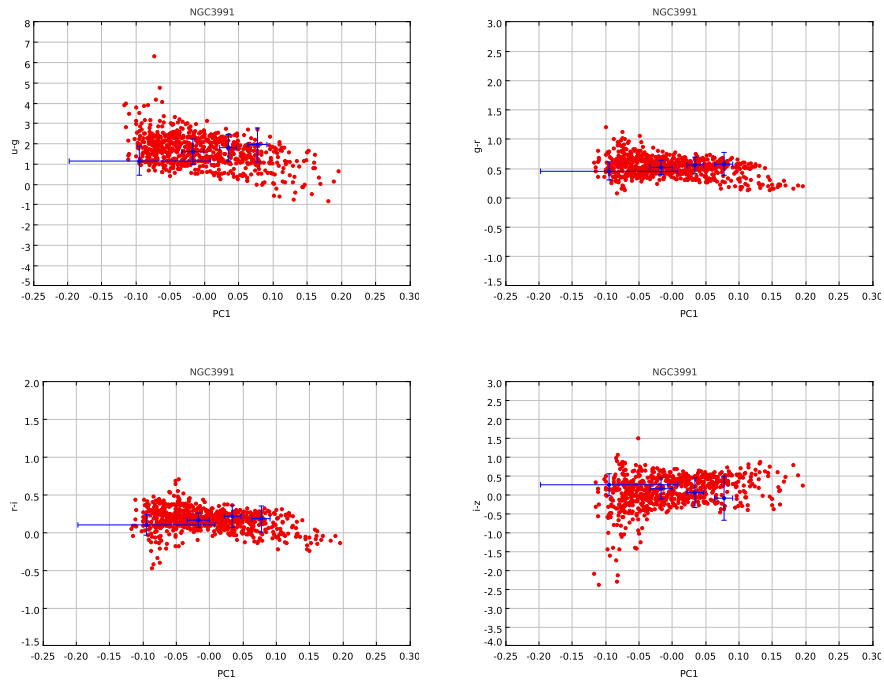


Figura A.15: Análise PCA nos píxeis: As cores  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $r-i$  e  $i-z$  em função da 1<sup>a</sup> componente principal, para NGC3991.

## A.2 Cores e Raios Médios

A seguir são apresentadas as correlações entre a cor  $g-r$  média e o raio normalizado médio de cada população estelar, para as galáxias elípticas (figura A.16), espirais (figura A.17) e espirais tardias (figura A.18).

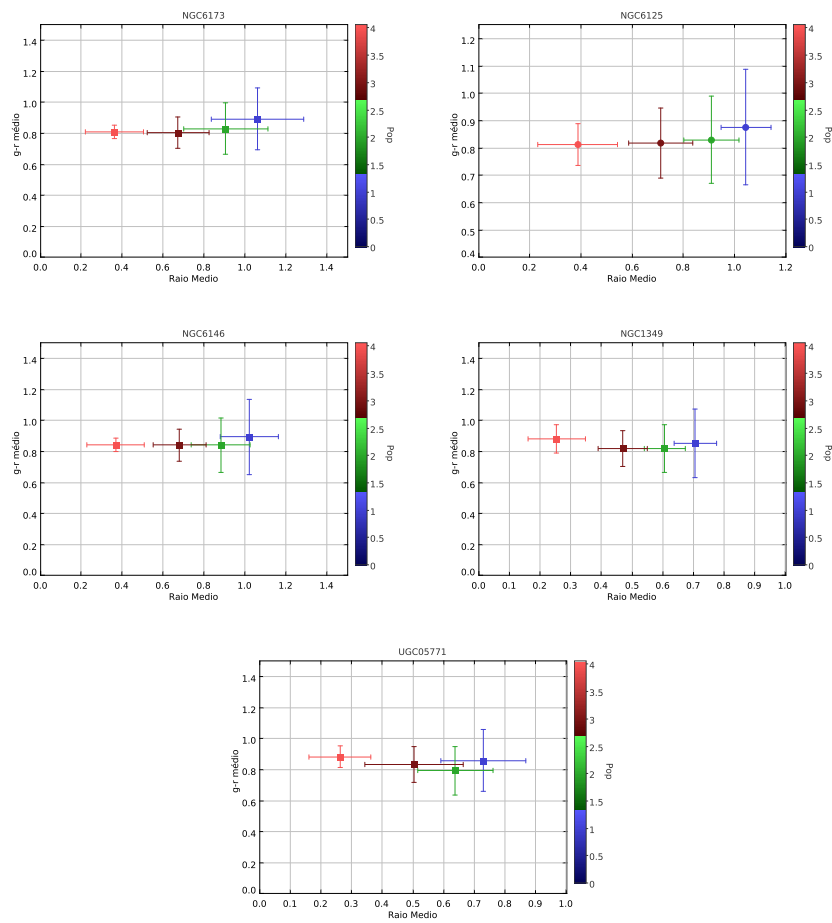


Figura A.16: Raios médios normalizados e a cor g-r em cada população, para as galáxias NGC6173, NGC6125, NGC6146, NGC1349 e UGC05771.

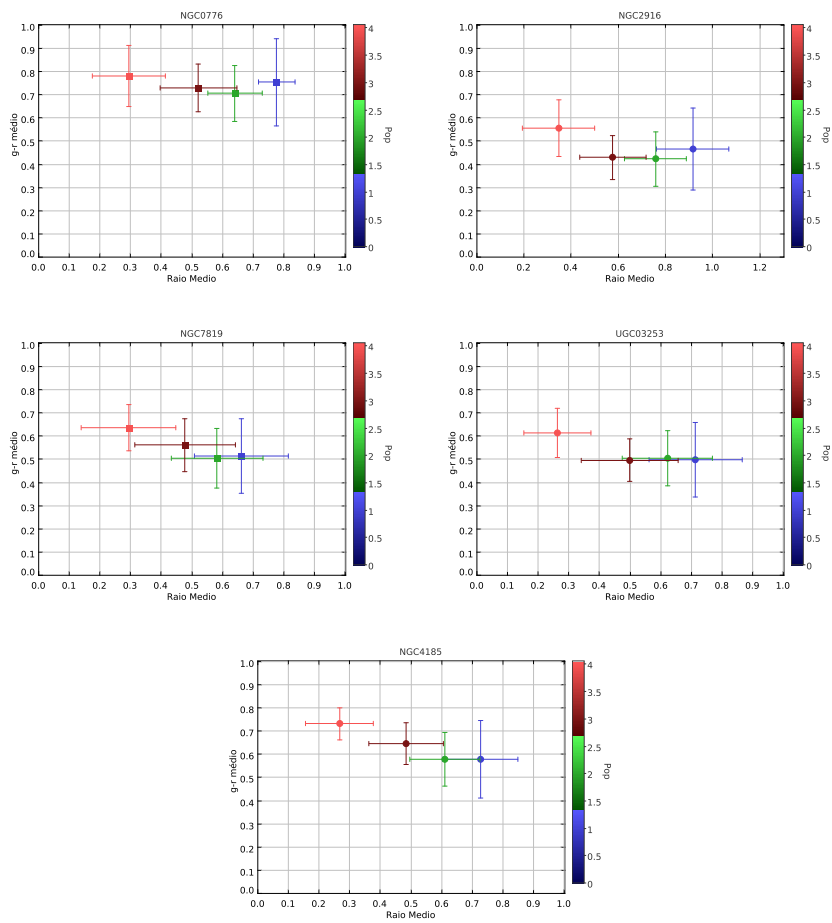


Figura A.17: Raios médios normalizados e a cor g-r em cada população, para as galáxias NGC0776, NGC2916, NGC7819, UGC03253 e NGC4185.

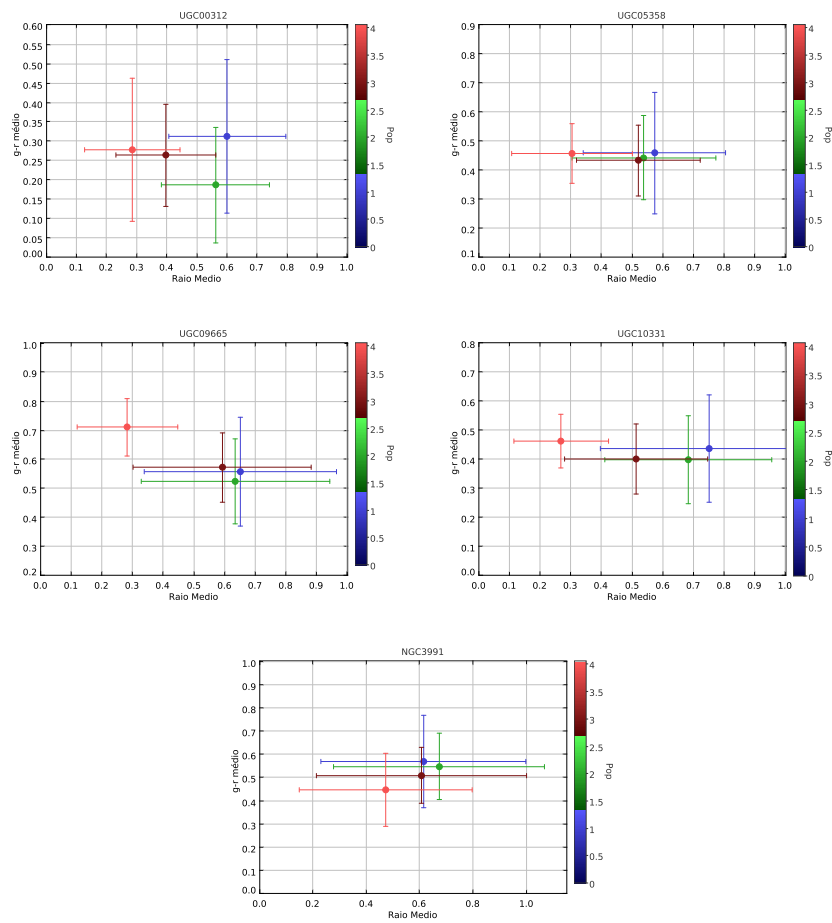


Figura A.18: Raios médios normalizados e a cor g-r em cada população, para as galáxias UGC00312, UGC05358, UGC09665, UGC10331 e NGC3991.

### A.3 Coeficientes de Gini

A seguir são apresentadas as correlações entre o Coeficientes de Gini e as populações estelares, para as galáxias elípticas (figura A.19), espirais (figura A.20) e espirais tardias (figura A.21).

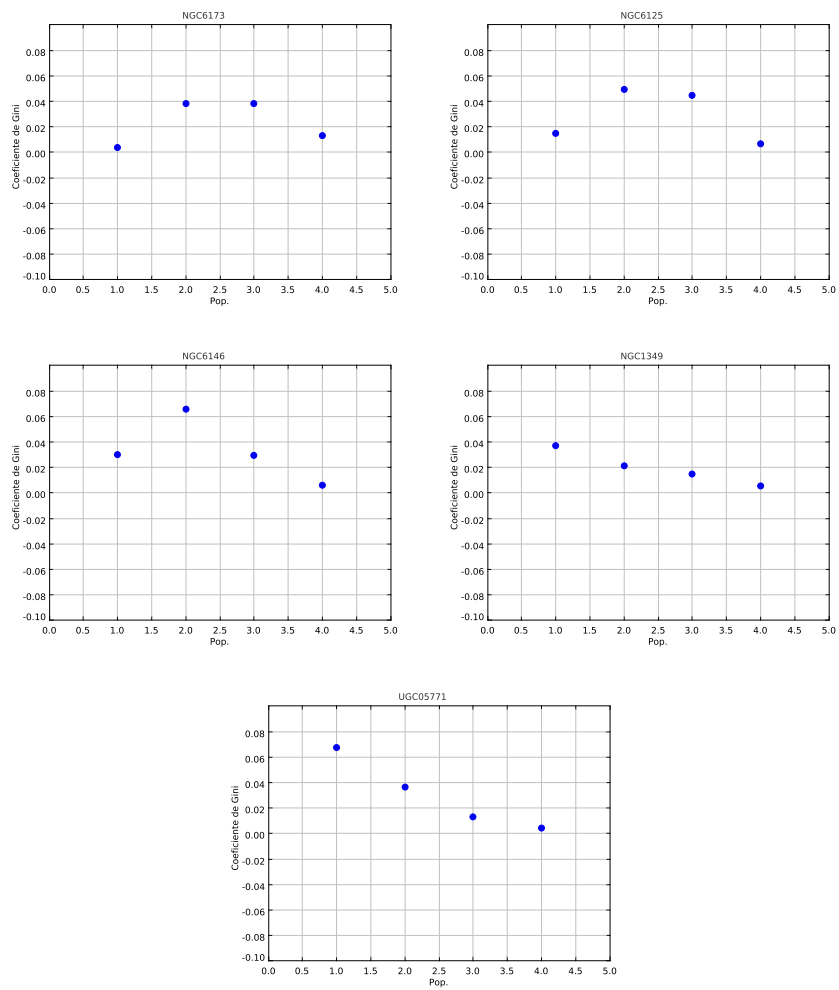


Figura A.19: Coeficiente de Gini para as galáxias NGC6173, NGC6125, NGC6146, NGC1349 e UGC05771.



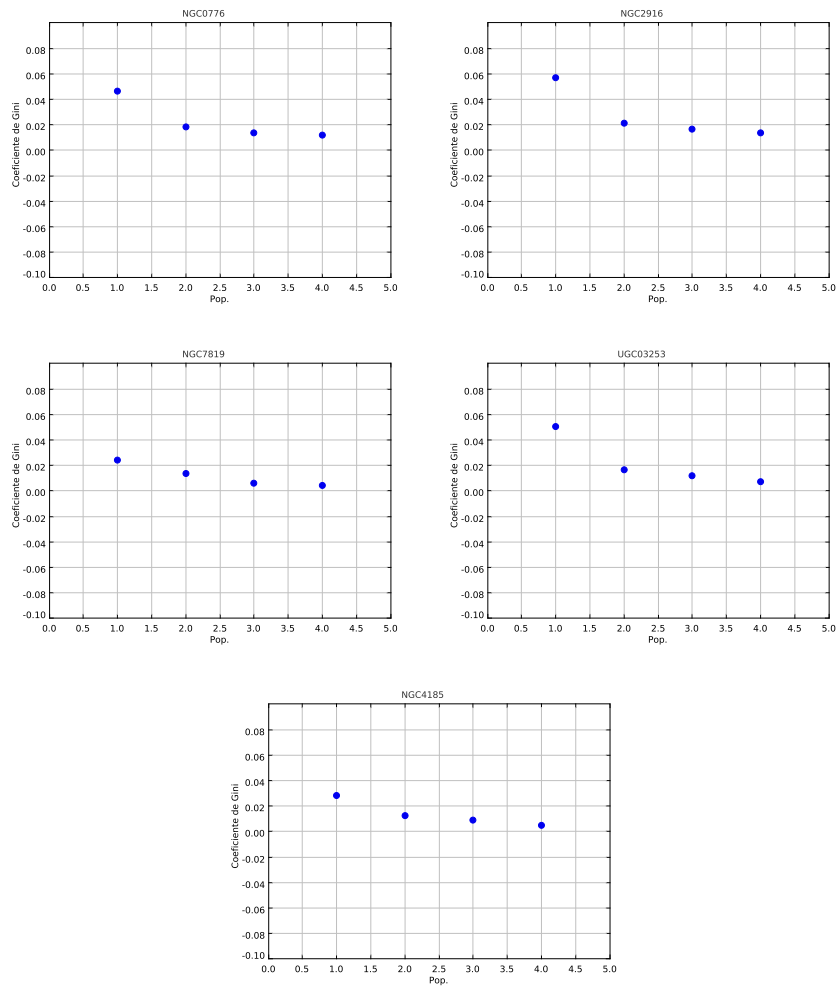


Figura A.20: Coeficiente de Gini para as galáxias NGC0776, NGC2916, NGC7819, UGC03253 e NGC4185.

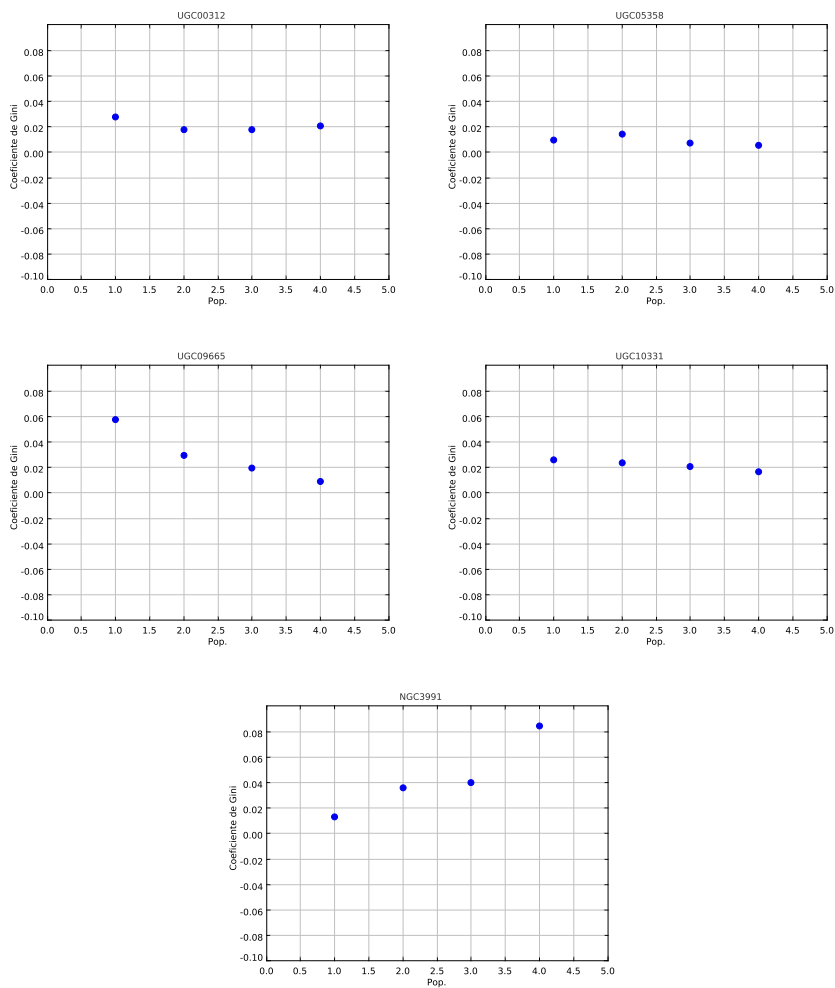


Figura A.21: Coeficiente de Gini para as galáxias UGC00312, UGC05358, UGC09665, UGC10331 e NGC3991.

#### A.4 Funcionais de Minkowski

A seguir são apresentadas as correlações entre a Característica de Euler-Poincaré e as populações estelares, para as galáxias elípticas (figura A.22), espirais (figura A.23) e espirais tardias (figura A.24). Nas figuras a esquerda está representada a CEP absolutas e a direita a CEP normalizada, de cada galáxia.

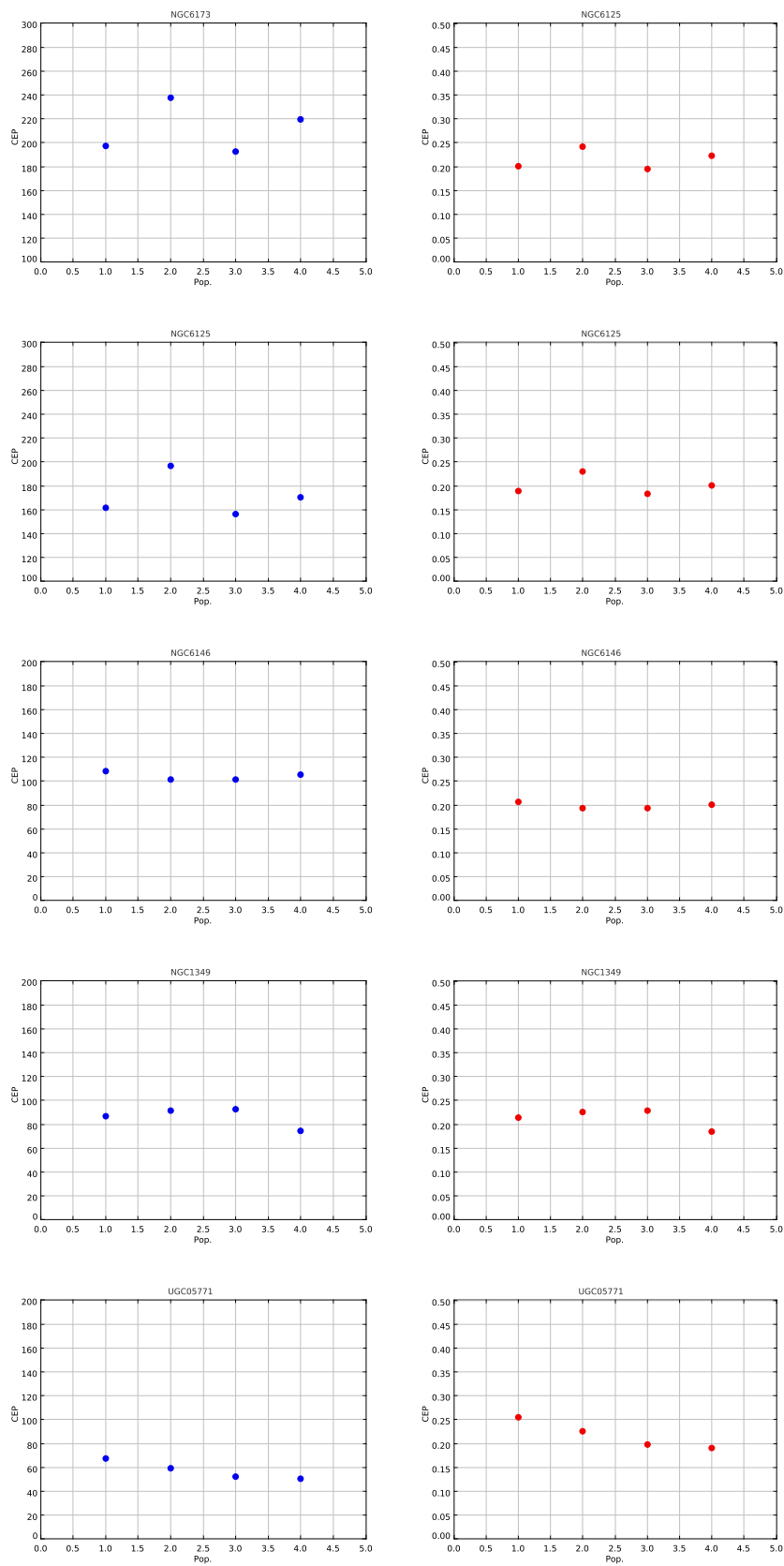


Figura A.22: Característica de Euler-Poincaré, absoluta (pontos azuis) e normalizada (pontos vermelhos), para as galáxias NGC6173, NGC6125, NGC6146, NGC1349 e UGC05771.

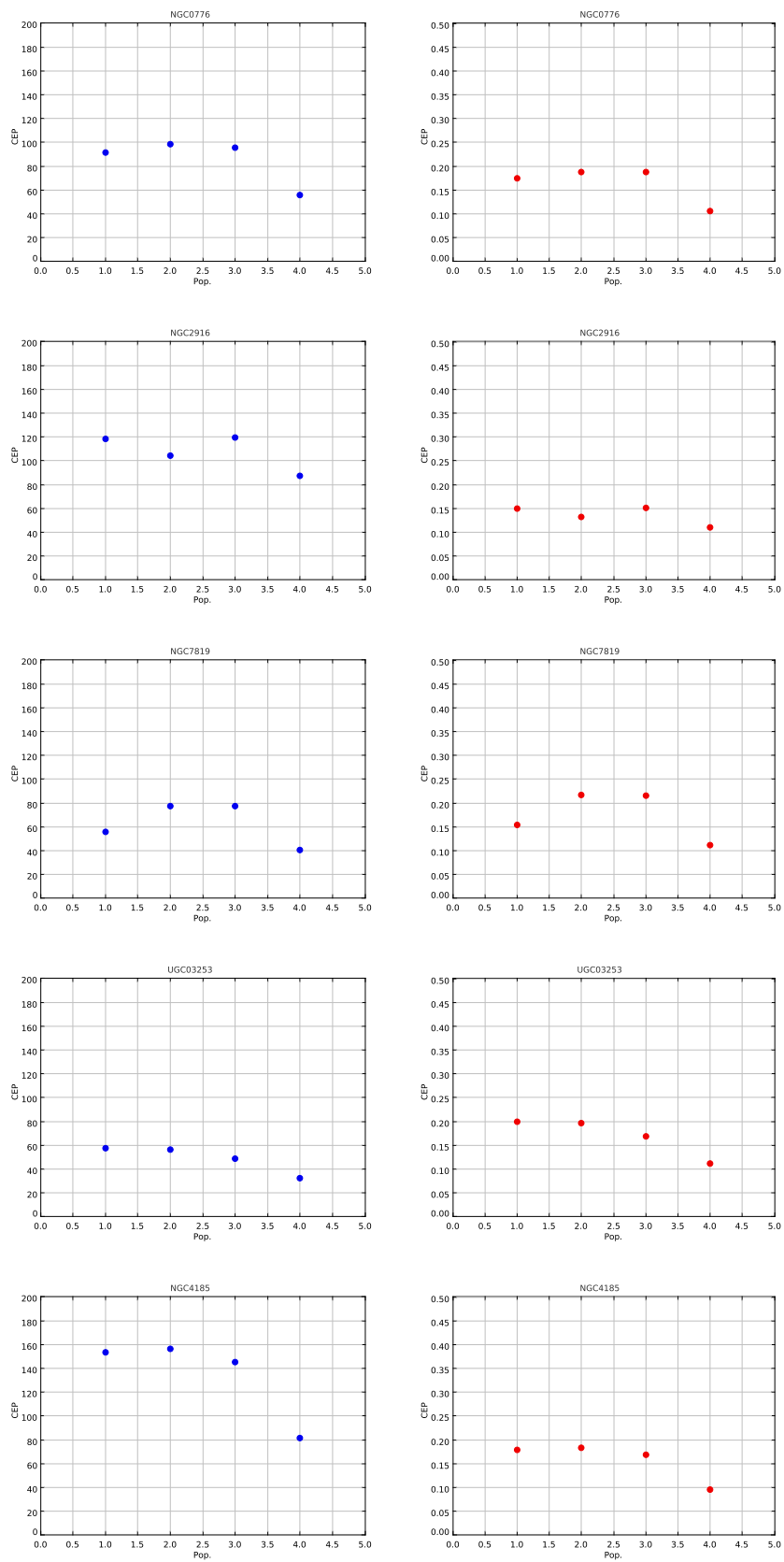


Figura A.23: Característica de Euler-Poincaré, absoluta (pontos azuis) e normalizada (pontos vermelhos), para as galáxias NGC0776, NGC2916, NGC7819, UGC03253 e NGC4185.

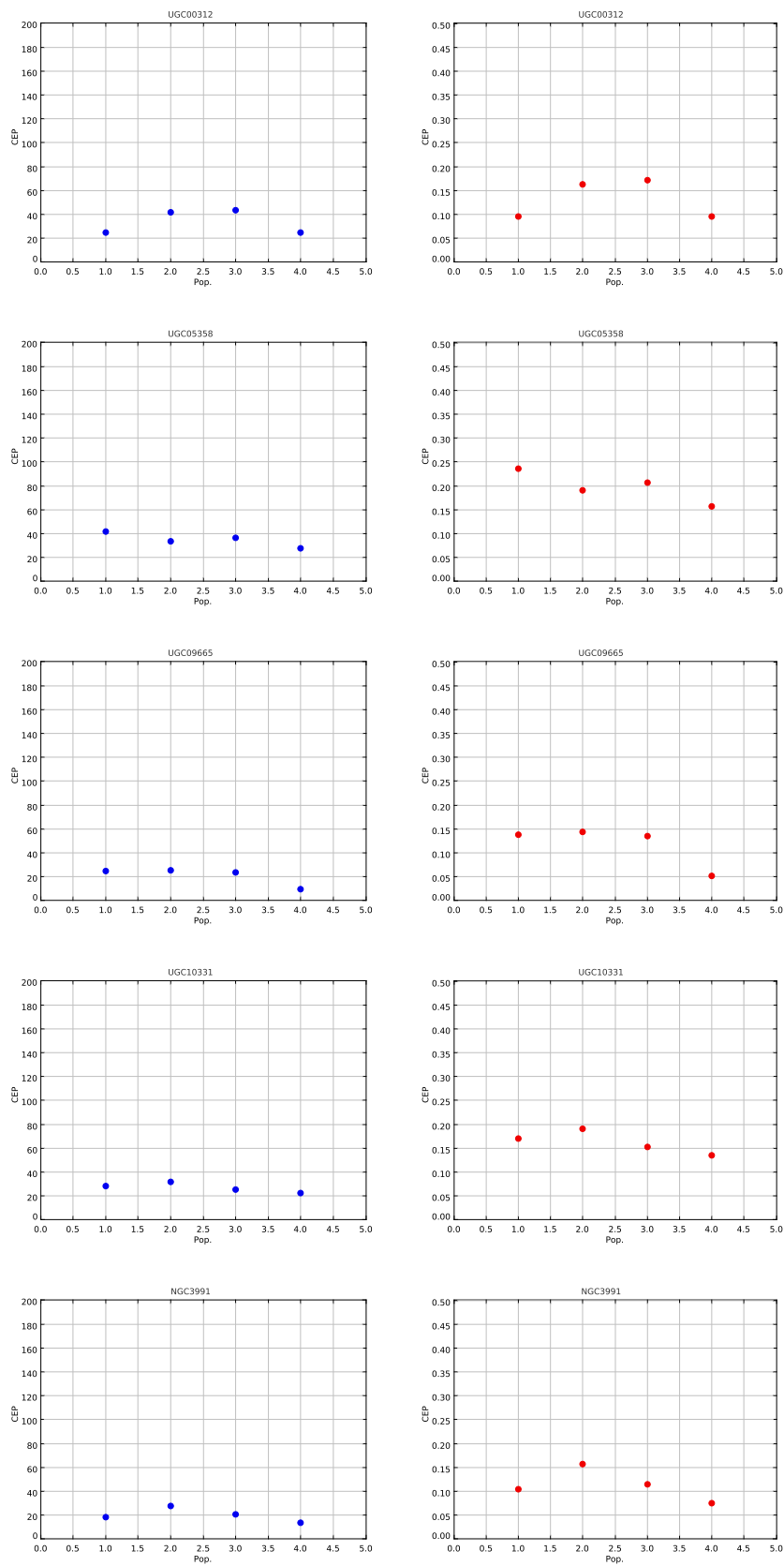


Figura A.24: Característica de Euler-Poincaré, absoluta (pontos azuis) e normalizada (pontos vermelhos), para as galáxias UGC00312, UGC05358, UGC09665, UGC10331 e NGC3991.