



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Astronomia

**“Estudo Preliminar do Espalhamento do
Plano Fundamental de Galáxias Tipo
“Early” do Universo Local”**

Aluna: Beatriz Henriques Ferreira Ramos

Orientador: Paulo S. Pellegrini (Observatório Nacional)

Projeto de Final de Curso para a Obtenção do Título de Astrônoma.

Maio 2002

“Além da Terra, além do Céu,
no trampolim do sem-fim das estrelas,
no rastro dos astros,
na magnólia das nebulosas.
Além, muito além do sistema solar,
até onde alcançam o pensamento e o coração, vamos!
Vamos conjugar
o verbo fundamental essencial,
o verbo transcendente, acima das gramáticas
e do medo e da moeda e da política,
o verbo sempreamar,
o verbo pluriamar,
razão de ser e de viver.”

Carlos Drummond de Andrade

Agradecimentos

A minha família, que me apoiou de todos os modos, a todas as horas, e suportou minhas mudanças de humor e inseguranças (que não foram poucas). Por todo carinho e paciência, “passagens de ônibus” e caronas.

A todos os meus amigos e familiares, que têm mais fé em mim do que eu mesma, até aqueles que nem sempre entenderam como escolhi esse caminho.

Aos meus queridos amigos do curso, por me estimularem a continuar na Astronomia através de seu próprio entusiasmo por essa carreira, e pelos inúmeros e memoráveis momentos de entretenimento.

Em especial, a Diana, Juliana e Leda, por estarem presentes e me ajudarem a evoluir. Por a todo momento se disporem a me escutar e a me empurrar para frente, seja dentro ou fora da Astronomia.

Ao meu orientador Paulo S. Pellegrini, pela compreensão e paciência em me ensinar, pela oportunidade de fazer esse trabalho e ir além do que eu julgava a princípio ser capaz.

Ao grupo responsável pelo projeto ENEAR, pelo esforço e dedicação cujo resultado foi uma base de dados tal que tornou possível esse trabalho.

A Carlos H. Veiga e Reinaldo R. de Carvalho, pela orientação que me enriqueceu durante minha jornada.

A João Kohl e Rundsthen Vasques, pelo tempo que cederam para me ajudar com minhas dúvidas.

Aos meus professores, em particular do Observatório do Valongo, que sem dúvida contribuíram em minha formação e mostraram como na vida temos sempre muito a aprender.

Resumo

Galáxias elípticas são usualmente apresentadas como sistemas simples, supostamente em equilíbrio dinâmico (virial). Estes objetos cobrem um grande intervalo de tamanhos, luminosidades e dinâmica interna.

Existem, ainda assim, relações bem estabelecidas entre seus parâmetros fundamentais. É o caso do denominado Plano Fundamental: uma relação entre três desses parâmetros (raio efetivo, dispersão central de velocidades e brilho superficial médio) definindo um plano, onde galáxias do tipo “early” (elípticas e lenticulares) são encontradas. É de grande interesse verificar se essa relação é universal e o que causa o seu pequeno espalhamento.

Aqui nos concentramos em avaliar essa questão do ponto de vista da morfologia das galáxias e do meio ambiente. Embora a formação das galáxias seja um processo que supostamente ocorre a partir de condições físicas iniciais quase idênticas, as diferentes morfologias (elíptica e lenticular) ou histórias evolutivas diferentes poderiam deixar marcas no Plano Fundamental e dar algumas pistas importantes para a compreensão de um cenário mais realista para a origem e evolução de galáxias.

Com esse propósito, utilizamos os dados do projeto ENEAR, que conta com uma amostra homogênea e representativa do Universo local e determinações de distâncias reais para todos os objetos. Constatamos a identidade do indicador de distâncias (relação $D_n - \sigma$) do projeto ENEAR com o Plano Fundamental e comparamos os planos obtidos para amostras em meios de alta e baixa densidades, assim como verificamos se há diferença entre os definidos por elípticas e por lenticulares. Também realizamos uma comparação com outros resultados encontrados na literatura. Notamos que determinadas classes de galáxias apresentam um maior espalhamento, especialmente em função do brilho superficial central. Entretanto, mais de 80% das galáxias tipo “early” são bem descritas pelo Plano Fundamental, não se encontrando qualquer dependência desta relação com a morfologia dos objetos e o meio ambiente.

Palavras-chave: Galáxias: elípticas e lenticulares – galáxias: Plano Fundamental

Abstract

Elliptical galaxies are usually presented as simple systems, supposedly in dynamical (virial) equilibrium. These objects span a wide range of sizes, luminosities and internal dynamics.

However, there are well-established relations between their fundamental parameters. This is the case of the so-called Fundamental Plane: a relation between three of these parameters (effective radius, central velocity dispersion and mean surface brightness) defining a plane, where early-type galaxies (ellipticals and lenticulars) are found. It is of great interest to verify if this relation is universal and what causes its small scattering.

Here we evaluate this issue in regard to the morphology of galaxies and the environment. Although galaxy formation is a process that supposedly occurs in almost identical conditions, the different morphologies (elliptical and lenticular) or different evolution histories could manifest themselves in the Fundamental Plane and give significant clues for understanding a more realistic scenario of galaxies origin and evolution.

With this purpose, we used the data from the ENEAR project, which assembled a homogeneous and representative sample of the local Universe, as well as true distances for all objects. We confirmed the equivalency of the distance indicator ($D_n - \sigma$ relation) of the ENEAR project with the Fundamental Plane and compared the planes obtained with samples in high and low environment densities and for ellipticals and lenticulars separately. Results from other authors are also mentioned. Some particular types of galaxies show a bigger scattering, specially when analyzing the central surface brightness. However, more than 80% of the early-type galaxies are well described by the Fundamental Plane, no dependency being found of this relation with either the objects morphology or their environment.

Keywords: Galaxies: ellipticals and lenticulars – galaxies: Fundamental Plane

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
1. Introdução	1
1.1. Breve Revisão sobre Galáxias Tipo “Early”	1
1.2. Cenários de Formação de Galáxias	4
1.3. Distribuição Espacial de Galáxias e Possível Conexão com a Formação	6
1.4. Propriedades de Galáxias do Tipo “Early”	7
1.5. Relações Paramétricas	12
2. Plano Fundamental - Uma Relação Universal?	14
3. Dados	25
3.1. Projeto ENEAR	25
3.2. Relação D_n - σ Como Indicador de Distância	28
3.3. Critérios para Definir Aglomerações	31
4. A Dependência do Plano Fundamental com Diferentes Parâmetros	33
5. Conclusões e Perspectivas Futuras	49
Referências	52
Anexo: Morfologias do tipo “Early”	56

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1</i>	Relação Morfologia-Densidade	3
<i>Figura 2.1</i>	Relações Paramétricas de elípticas e lenticulares	15
<i>Figura 2.2</i>	Plano Fundamental de JFK96	16
<i>Figura 2.3</i>	Plano Fundamental de Colless et al. (2001)	16
<i>Figura 2.4</i>	Plano Fundamental de Bernardi et al. (2002)	17
<i>Figura 3.1</i>	Exemplo de decomposições de perfis em bojo e disco	27
<i>Figura 3.2</i>	Relação $D_n - \sigma$	29
<i>Figura 3.3</i>	Relação $D_n - \sigma$ com dados do ENEAR	30
<i>Figura 4.1</i>	Relações Paramétricas de elípticas e lenticulares (ENEAR)	35
<i>Figura 4.2</i>	Plano Fundamental com dados do ENEAR em 3-D	36
<i>Figura 4.3</i>	Plano Fundamental com dados do ENEAR (amostra reduzida)	37
<i>Figura 4.4</i>	Resíduos do Plano Fundamental	40
<i>Figura 4.5</i>	Resíduos do Plano Fundamental em função de $r_e - E \times S0$	42
<i>Figura 4.6</i>	Idem – Alta e baixa densidades	43
<i>Figura 4.7</i>	Resíduos do Plano Fundamental em função de $\sigma - E \times S0$	44
<i>Figura 4.8</i>	Idem – Alta e baixa densidades	45
<i>Figura 4.9</i>	Resíduos do Plano Fundamental em função de $\langle \mu_e \rangle - E \times S0$	46
<i>Figura 4.10</i>	Idem – Alta e baixa densidades	47
<i>Ilustrações do Anexo</i>	Diferentes morfologias	56
	Elíptica anã	57
	Galáxia CD em aglomerado rico e regular	57

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1.1.</i> Parâmetros típicos para galáxias de morfologia “early”	9
<i>Tabela 2.1.</i> Coeficientes do Plano Fundamental da literatura	18
<i>Tabela 3.1.</i> Distribuição da amostra por morfologia e meio ambiente	32
<i>Tabela 4.1.</i> Plano Fundamental separado por morfologia e meio ambiente	48

1. Introdução

1.1. Breve Revisão sobre Galáxias Tipo “Early”

No decorrer das últimas décadas, a Astrofísica Extragaláctica reuniu uma enorme quantidade de dados e informações relativas à distribuição espacial e propriedades intrínsecas de galáxias, com o objetivo de compreender melhor estes objetos, suas características, origem e evolução. Embora na transição dos anos 70 – 80, alguns catálogos de galáxias contendo informações fotométricas já disponibilizavam um vasto material para estudo (ex. Shapley-Ames 1932; Zwicky et al. 1961-68; de Vaucouleurs et al. 1976, Sandage e Tammann 1981), apenas cerca de 2000 galáxias tinham distâncias conhecidas. Na prática, isto significava uma restrição significativa para a compreensão de uma variedade de propriedades desses objetos, o que gerou, neste período, um grande interesse no desenvolvimento de esforços de levantamentos de redshifts, como uma estimativa de distâncias baseada na expansão de Hubble. Realizados no decorrer dos anos 80, mapeamentos de galáxias como o CfA Redshift Survey (Huchra et al. 1983, 1999), o Southern Sky Redshift Survey (da Costa et al. 1988, 1998) e Stromlo/APM Redshift Survey (Loveday et al. 1996) não somente contribuíram para a determinações de distâncias e o estudo das propriedades estatísticas da distribuição de galáxias em grande escala, como propiciaram o estudo de propriedades intrínsecas de galáxias com dados homogêneos e amostras completas. Esses trabalhos foram decorrentes da espectroscopia realizada nos mapeamentos, que permitiu uma variedade de estudos como a dinâmica interna, as populações estelares e propriedades de formação estelar em galáxias. Atualmente, números da ordem de 10^5 - 10^6 galáxias representam a meta dos levantamentos modernos como o 2dF Redshift Survey (<http://msowww.anu.edu.au/2dFGRS/>) e o Sloan Digital Sky Survey (que reúne espectroscopia e fotometria; <http://www.sdss.org/>) e novas técnicas de observação se estabeleceram, exigindo uma mudança de atuação profissional na área, na última década, especialmente com a incorporação de novas tecnologias, alto grau de informatização no processo de obtenção, armazenamento, tratamento e análise dos terabytes disponíveis.

Com a quantidade de dados reunida ao longo dos anos, houve um progresso extraordinário, acrescentando um vasto conhecimento sobre as características mais proeminentes das galáxias, conhecidas até os anos 70: a diversidade de morfologias e a tendência de aglomeração. De fato, propriedades de galáxias foram descobertas, assim como relações entre alguns de seus parâmetros fundamentais e suas dependências com o meio ambiente, além do fato de que simulações numéricas mostram-se poderosas ferramentas para diversos estudos de formação e evolução de galáxias e, sob o ponto de vista observacional, o Universo distante gradativamente vem sendo desvendado.

Em particular, algumas propriedades gerais de galáxias já podem ser tomadas como bem determinadas, ao longo da seqüência de morfologias estabelecida de modo independente e simultâneo por Hubble (1926) e Lundmark (1926), e revisada por de Vaucouleurs (1959) e Sandage (1961, 1975). As principais propriedades em função do tipo morfológico estão descritas em Roberts e Haynes (1994).

As galáxias de morfologias denominadas “early”, envolvendo galáxias elípticas e lenticulares (também denominadas S0), são constituídas de populações estelares dominantes mais velhas, contêm muito pouco ou nenhum gás frio e, por isso, apresentam muito baixo ou nenhum indício de formação estelar. Podem ser caracterizadas como objetos de baixa rotação e apresentam relações bem definidas entre parâmetros como raios característicos, sua dispersão central de velocidades estelares, parâmetros fotométricos indicadores de sua luminosidade total ou brilho superficial central e cor (ex. Dressler, 1984; Kormendy e Djorgovski, 1989; Zeeuw e Franx, 1991).

As galáxias de morfologias denominadas “late”, e classificadas como espirais, apresentam um bojo com características semelhantes às elípticas e lenticulares. É característico desses objetos um disco de expressiva rotação contendo uma população estelar jovem, onde existe muito gás disponível para formação de estrelas, e uma relação paramétrica entre sua luminosidade e velocidade máxima de rotação (ex. Tully e Fisher, 1977; Kennicutt, 1998, Battaner e Florido 2000, van der Kruit, 2001).

As duas diferentes classes de morfologia estão distribuídas espacialmente de acordo com o ambiente, conforme determinado pela relação morfologia-densidade (Dressler 1980, ver Figura 1.1), que mostra que galáxias tipo “early” são encontradas

preferencialmente em meios de maior densidade de galáxias, enquanto nos menos densos prevalecem as de tipo “late”.

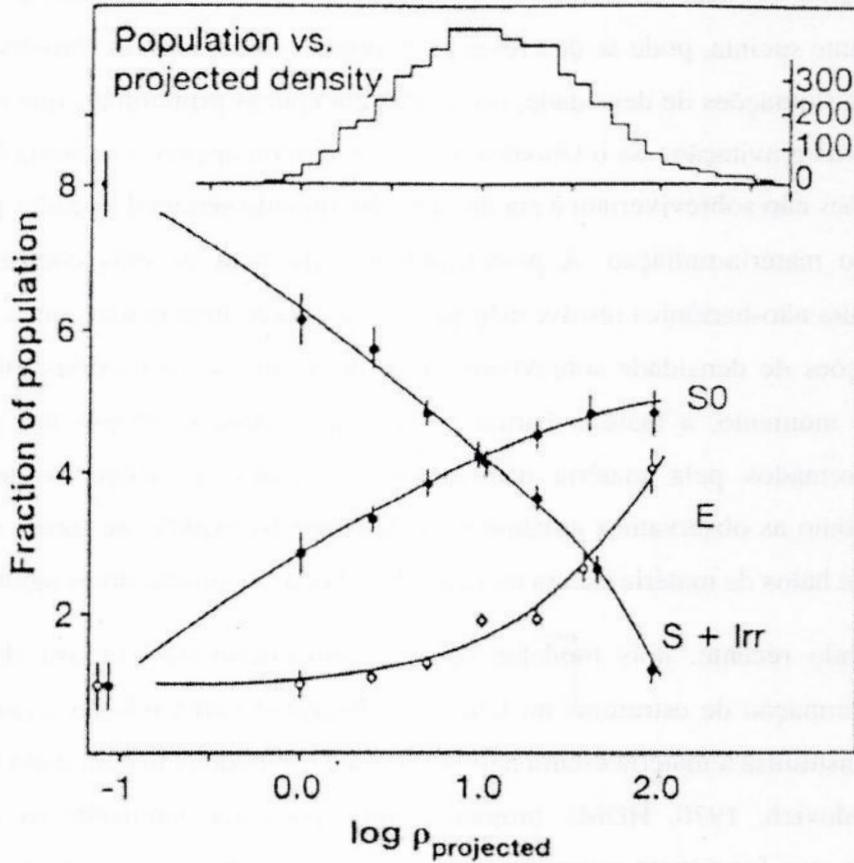


Figura 1.1 Na parte inferior do gráfico temos a variação da fração de tipos morfológicos E, S0 e Espirais+Irregulares em função da densidade projetada (em galáxias/Mpc²), em 55 aglomerados ricos e em campos menos densos. A parte superior mostra a distribuição numérica de galáxias em intervalos da mesma densidade. Reproduzido de Elmegreen (1998).

1.2. Cenários de Formação de Galáxias

Qualquer cenário que pretenda descrever como as galáxias se formam e evoluem para os estados em que as observamos, precisa explicar os resultados e relações acima mencionados.

Na verdade, esses observáveis são os principais testes para os modelos que competem para explicar os processos de formação e evolução de galáxias. De uma forma bastante sucinta, pode-se descrever as estruturas observadas no Universo como o resultado de flutuações de densidade, originadas em épocas primordiais, que evoluíram sob o efeito da gravitação. Se o Universo fosse constituído apenas de matéria bariônica, tais flutuações não sobreviveriam à era da radiação, quando seriam dissipadas pelo forte acoplamento matéria-radiação. A proposição da existência de uma componente de matéria escura não-bariônica resolve esta questão, pois, não interagindo com a radiação, suas flutuações de densidade sobrevivem até o desacoplamento matéria-radiação. A partir deste momento, a matéria bariônica, livre da radiação, colapsa nos poços de potencial formados pela matéria não-bariônica, criando, ao longo do tempo, as estruturas como as observamos atualmente. Este processo explica, de forma natural, a existência de halos de matéria escura ao redor de galáxias e permeando os aglomerados.

No passado recente, dois modelos opostos competiram na tentativa de melhor explicar a formação de estruturas no Universo, divergindo com relação a que tipo de partícula constituiria a matéria escura não-bariônica. Um modelo, denominado Hot Dark Matter (Zeldovich, 1970, HDM), propunha como partícula dominante os neutrinos relativísticos, que formariam primeiramente grandes estruturas, as quais posteriormente se fragmentariam e formariam as galáxias (cenário “top-down”). O outro, denominado Cold Dark Matter (Peebles, 1982, CDM), propunha que partículas não relativísticas (como os axions), seriam dominantes e suas flutuações de densidade primeiro formariam aglomerações pequenas, que se aglutinariam em sistemas cada vez maiores (cenário “bottom-up”). Diversos testes observacionais, nas duas últimas décadas, têm mostrado, através de estatísticas da distribuição de galáxias, que o cenário CDM é mais compatível com os resultados obtidos (ex. Blumenthal et al. 1984), sendo considerado hoje o cenário padrão para formação de estruturas.

As perturbações de densidade, mencionadas acima, sob o efeito da gravitação, geram as nuvens de gás primordiais. Atualmente, dois modelos procuram elaborar um cenário que descreva adequadamente a formação de galáxias a partir dessas nuvens primordiais. Em um deles, as galáxias se formam a partir de um colapso dissipativo, como proposto nos trabalhos originais de Eggen, Lynden-Bell e Sandage (1962), Larson (1974, 1975) e Carlberg (1984a, b). Neste cenário, usualmente denominado de colapso monolítico, a idéia central é uma nuvem de gás que colapsa, pela dissipação de energia cinética de suas partículas devido à colisões inelásticas que ocorrem entre elas em seus movimentos aleatórios. Neste modelo, durante o colapso da nuvem protogaláctica, as estrelas são formadas de modo rápido, constituindo um esferóide, que evolui passivamente a partir daí. Este processo formaria, nesta fase, as galáxias elípticas e os bojos de galáxias lenticulares e espirais, onde as estrelas se moveriam em órbitas randômicas com diferentes velocidades. As componentes disco de espirais se formariam numa escala de tempo relativamente mais longa, através do gás acretado por queda contínua de um envelope gasoso tênue, como sugerido por Larson, Tinsley e Caldwell (1980). Neste cenário, a morfologia resultante é definida pela competição entre a eficiência de formação estelar durante o colapso monolítico (que tende a exaurir todo o gás formando estrelas) com o momento angular da protogaláxia (que tende a assentar o material primordial num disco, durante a contração). Este modelo prevê a existência de gradientes radiais de metalicidade nas galáxias, que é um fato observado. As primeiras estrelas massivas formadas enriquecem em metais o meio interestelar (com restos de explosões de supernovas tipo II) que forma novas estrelas, gradativamente aumentando a metalicidade. O material que primeiramente colapsou para centro do objeto passou por este processo de enriquecimento há mais tempo que o material colapsado mais tardiamente, o que produz um gradiente radial de metalicidade.

Uma outra proposta para um cenário de formação de galáxias é apresentado pelo modelo de aglutinação hierárquica, um processo mais lento onde a formação de uma galáxia ocorre pela coalescência de nuvens de gás primordiais. Simulações numéricas, como as de Baugh, Cole e Frenk (1996), Kaufman e Charlot (1998) e Navarro, Frenk e White (1997), mostram como um cenário deste tipo reproduz muitas das características e propriedades das galáxias. Esta hipótese é uma continuidade natural do cenário CDM de formação de estruturas no Universo a partir das primeiras flutuações de densidade.

Além disso, tem a seu favor o fato de que são observados objetos que se acredita serem resultados de “mergers” mais recentes de outras galáxias, como por exemplo, as galáxias de morfologias peculiares, as galáxias centrais de aglomerados e mesmo algumas galáxias aparentemente normais (ex. Schweizer.1982). Simulações numéricas também mostram que relações paramétricas, como as observadas em galáxias tipo “early”, são esperadas no cenário hierárquico (ex: Bekki, 1998).

1.3. Distribuição Espacial de Galáxias e Possível Conexão com a Formação

As galáxias estão, em parte, organizadas em sistemas de maior dimensão, como grupos e aglomerados. Aquelas que não estão associadas a esses sistemas, denominadas galáxias de campo ou “isoladas”, fazem parte das grandes estruturas do universo, que circundam regiões vazias de matéria luminosa (“voids”). A diferença entre grupos e aglomerados está no número de seus membros; grupos contendo dezenas de galáxias, enquanto para aglomerados a ordem desse número chega a centenas e até milhares. O número de galáxias atribuído a um sistema tem um grau de subjetividade e depende do raio atribuído ao próprio sistema e também da magnitude limite dos objetos (ex Zwicky et al 1961-68). Trabalhos mais recentes têm utilizado critérios objetivos para determinar grupos em amostras completas de galáxias (ex. Huchra e Geller, 1982; Maia, da Costa e Latham, 1989; Ramella et al. 1999).

Os aglomerados podem ser classificados de acordo com uma série de parâmetros. Com relação à distribuição de seus membros, dividem-se nos regulares, que possuem uma estrutura esférica, com uma forte concentração central, sendo comum a presença de galáxias cDs (elípticas massivas, de alta luminosidade e detentoras de um envelope extenso de material) próximas ao centro, e irregulares que, como sugere o nome, têm forma indefinida. Se contiverem um número significativamente alto (baixo) de membros, são ainda identificados como ricos (pobres). Um exemplo conhecido é Coma, o aglomerado regular rico mais próximo, estando a uma distância cinco vezes maior que Virgo, outro aglomerado rico porém irregular. Outros tipos de classificação estão ligados à presença de galáxias cDs e à morfologia das galáxias dominantes.

Como mencionado anteriormente, o meio ambiente tem pelo menos uma forte influência sobre uma propriedade das galáxias: sua morfologia. De fato, uma grande diferença entre galáxias constituintes de grupos e aglomerados e galáxias do campo está representada pela relação morfologia-densidade (Dressler, 1980), mostrada na figura 1.1, que pode ser esperada em ambos os cenários de formação de galáxias, por processos diferentes. No cenário monolítico, nos ambientes de menor densidade de galáxias, um maior número de protogaláxias consegue manter um halo de matéria ao seu redor (e que posteriormente formará um disco), devido à menor probabilidade de interações com outros objetos. No cenário hierárquico, os ambientes de maior densidade seriam mais eficientes para gerar elípticas, pois estas são, usualmente, as morfologias encontradas como produto final da maioria dos tipos de “mergers”.

Entretanto, deve-se notar que durante sua existência, as galáxias eventualmente interagem entre si, sofrendo diversos tipos de encontros. O resultado depende de um conjunto vasto de fatores, que vão desde parâmetros fundamentais das galáxias que estão interagindo, como massa e morfologia, até características do próprio encontro, como a razão entre as velocidades das galáxias e do ângulo em que o encontro se dá. Muitos objetos classificados como Peculiares podem ser entendidos como o produto de tais acontecimentos, assim como galáxias que apresentam algumas propriedades fora do padrão. Mais ainda, levando em consideração que a fusão de galáxias de massas semelhantes deve destruir qualquer gradiente radial de metalicidade, Carollo, Danziger e Buson (1993) mostram que as galáxias elípticas de massas superiores a 10^{11} massas solares provavelmente são o resultado de fusões de objetos formados anteriormente. Em particular, neste domínio estão as galáxias elípticas gigantes e cDs de aglomerados.

1.4. Propriedades de Galáxias do Tipo “Early”

Para ter-se uma visão mais ampla da diversidade apresentada por apenas uma morfologia, deve-se mencionar também que as galáxias elípticas estão presentes em diversos tamanhos e luminosidades no Universo, variando de anãs a gigantes, sendo que as primeiras são a forma mais comum em que as encontramos. Alguns autores têm ressaltado as diferenças observacionais entre elípticas anãs e gigantes (ex. Bender,

Burstein e Faber 1992). Em particular muitas das anãs são satélites de galáxias maiores, sugerindo serem “restos” do processo de formação de objetos maiores (ex. Zaritsky et al. 1997).

Da diversidade de morfologias existentes entre as galáxias, a classe denominada “early” e, em particular as galáxias Elípticas, é representada por objetos dominados por um sistema estelar aparentemente mais simples, com distribuição de brilho contínua e com alguma simetria, provavelmente um esferóide, sugerindo em princípio uma categoria mais fácil de ser estudada. De fato, na classificação morfológica de Hubble (que é essencialmente baseada na distribuição de luz que o objeto apresenta) as galáxias tipo “early” classificadas como elípticas são completamente descritas com uma denominação E_n , n significando um grau de elipticidade crescente, variando de 0 a 7. Assim, as galáxias chamadas E_0 têm aparência circular e, para valores crescentes de n , o disco elíptico tem aparência cada vez mais “achatada” até o limite máximo que é o apresentado pelo tipo E_7 . No Anexo deste trabalho são mostradas morfologias do tipo “early” selecionadas de Sandage e Tammann (1981) e exemplos de uma galáxia classificada com anã, de uma galáxia CD e um aglomerado rico e regular.

As galáxias lenticulares exibem como estrutura dominante um bojo esferoidal que se assemelha a uma galáxia elíptica. Entretanto, esta componente é circundada por um disco fino e fraco, sem braços espirais. Muitas vezes isso dificulta distinguí-las de elípticas, ainda mais se o plano do disco estiver perpendicular à linha de visada (“face-on”) ou próximo a essa posição. Em algumas, é possível se observar a formação clara de barras. Devido à presença do disco, as lenticulares possuem elipticidade maior do que a apresentada pelas E_7 . Como no caso das elípticas, as lenticulares têm sua denominação originada na sua forma: nos casos em que são observadas com o plano do disco posicionado paralelamente à linha de visada (“edge-on”), elas se assemelham a lentes convexas. Embora as galáxias lenticulares apresentem um pequeno disco, sua grande semelhança em termos estruturais, dinâmicos e de população estelar constituinte é com as galáxias elípticas, apesar de, geralmente, conterem um pouco mais de gás. Alguns autores propuseram que galáxias espirais podem ter se transformado em lenticulares pela remoção quase completa de seu gás (ex. Strom e Strom 1978).

Alguns parâmetros típicos para galáxias elípticas (anãs e normais), lenticulares e cDs são mostrados na tabela 1.1.

	Anãs	Elípticas Normais	Lenticulares	cDs
Magnitude absoluta M_B	-8 → -19	-15 → -23	-17 → -22	-22 → -25
Massa (em M_0)	$10^7 \rightarrow 10^9$	$10^8 \rightarrow 10^{13}$	$10^{10} \rightarrow 10^{12}$	$10^{13} \rightarrow 10^{14}$
Diâmetro isofotal D_{25} em $\mu=25\text{mag}/('')^2$ (kpc)	0.1 → 10	1 → 200	10 → 100	300 → 1000

Tabela 1.1 Parâmetros típicos para galáxias de morfologia “early”.

É através dos dados referentes aos contornos de brilho superficial constante a diferentes distâncias radiais na galáxia (isofotas) que se constrói um perfil de brilho superficial $I(r)$. O das galáxias elípticas, tidas como normais, é considerado bem representado pela lei de de Vaucouleurs (1948), uma relação empírica onde o brilho superficial varia com a distância ao centro da galáxia na potência $1/4$, também conhecida como lei $r^{1/4}$:

$$\log(I(r)) = \log(I(r_e)) - 3.3307 \left((r/r_e)^{1/4} - 1 \right)$$

onde r_e é o raio característico dentro do qual está contida metade da luminosidade do esferóide ¹ e $I(r_e)$ é o brilho superficial em r_e (ex: Schombert 1986, 1987). Levando em conta os comentários anteriores, é compreensível que dependendo das particularidades de uma galáxia, seu perfil de brilho pode se desviar dessa lei. Na região externa de algumas elípticas e especialmente de lenticulares, por exemplo, o perfil cai mais lentamente do que a lei de de Vaucouleurs (ex. de Carvalho, Djorgovski e da Costa 1991), sendo melhor representado por um ajuste exponencial típico de um disco: $I(r) = I_0 \exp[-(r/r_0)]$, onde I_0 é o brilho superficial central e r_0 uma escala característica. Existem autores que consideram mais adequado utilizar a lei mais geral de Sérsic (1968), semelhante a de de Vaucouleurs, exceto que distância ao centro da galáxia é elevada a um fator $1/n$, onde n é um parâmetro associado à forma. De fato, este parâmetro permite que os perfis sejam corretamente ajustados, caso a caso, já que as galáxias não são absolutamente idênticas sob o ponto de vista estrutural. Por outro lado, se uma componente disco está realmente presente, suas escalas características são perdidas e incorporadas nesta expressão mais geral.

A estrutura tridimensional dos esferóides que compõem as galáxias tipo “early” é ainda assunto de muito debate. Não é ainda claro se estes têm formas oblatas, onde dois dos eixos são iguais e maiores que o terceiro, prolatas, com a mesma descrição do caso anterior com a diferença que os eixos idênticos são menores, ou ainda tri-axiais, onde todos os três eixos são diferentes (para uma revisão, ver de Zeeuw e Franx 1991). Através de detalhes da fotometria de alguns objetos, é possível se obter indícios de sua forma, mas usualmente é necessário admitir um dos modelos a priori. Tem sido mais freqüente, atualmente, considerar que os esferóides têm formas oblatas, o que é, em parte devido é à presença de anisotropias nas direções das órbitas estelares e em parte devido a uma possível rotação, ambos os efeitos surgindo durante a complexa interação entre gás e estrelas recém formadas durante a contração da protogaláxia. Entretanto, não se pode desprezar as evidências que mostram que alguns esferóides são tri-axiais e bem mais complexos de modelar. Na verdade, complicando ainda mais esta questão, são crescentes os indícios na literatura de que algumas galáxias elípticas apresentam um pequeno disco, em suas partes mais centrais (usualmente associado à formação de um

¹ O mais correto seria denominar essas estruturas de elipsóides. Utilizaremos o termo esferóide por este ser mais usual na literatura.

buraco negro, ex. Kormendy et al. 1997), algumas apresentam sub-estruturas internas com movimento distinto daquele da galáxia (resultado de um “merger”, ver de Zeeuw e Franx 1991) e outras apresentam um disco fraco que se estende até as partes mais externas (ex. Rix, Carollo e Freeman ,1999).

Entretanto, de um modo geral, uma galáxia elíptica pode ser bem descrita como um esferóide dominante, seguindo uma lei de de Vaucouleurs, adicionado de uma possível componente disco fraca, descrita por uma lei exponencial. As evidências fotométricas de tri-axialidade de esferóides ou presença de discos em seus interiores aparecem tanto no estudo detalhado de seu perfil de brilho, como na forma das variações na elipticidade das isofotas e nas direções (“twists”) de seus eixos principais. Embora, em geral bem ajustadas por elipses, existem casos em que essas curvas se afastam bastante desta geometria. Algumas são denominadas galáxias “disky”, porque suas curvas isofotais possuem um alongamento em uma direção sugerindo a existência de um disco. Outras são denominadas “boxy”, apresentando contornos na região mais central que se desviam das elipses se assemelhando a retângulos, sugerindo uma complexa situação, que pode ser decorrente de tri-axialidade ou existência de barras. A representação das isofotas como uma série de Fourier é uma ferramenta útil nessa análise, pois alguns coeficientes da expansão estão diretamente relacionados aos desvios da isofota observada com relação ao ajuste, podendo quantificá-los.

Outro ponto importante é que galáxias elípticas (e esferóides em geral) são usualmente reconhecidas como sistemas em um estado de equilíbrio dinâmico, mantido pela dispersão de velocidades. A possibilidade de que representem sistemas virializados constitui também uma aparente facilidade adicional: sua dispersão de velocidades observada, σ , deve estar correlacionada com o potencial gravitacional do sistema:

$$\sigma^2 \propto GM/R,$$

representando uma estimativa da massa da galáxia.

1.5. Relações Paramétricas

Galáxias elípticas e lenticulares apresentam um conjunto de relações bem estabelecidas entre parâmetros associados ao tamanho, brilho, dinâmica interna e evolução química, que são de grande relevância na análise dos processos envolvidos na formação e evolução de galáxias. Muitas dessas correlações foram determinadas de forma empírica, verificadas com simulações de N-corpos e obtidas semi-analiticamente dentro de um cenário de formação de galáxias como, por exemplo, o CDM (Blumenthall et al 1984). Entre elas pode-se citar:

- a relação entre a luminosidade L da galáxia e sua dispersão de velocidades, $L \propto \sigma^4$, descoberta por Faber e Jackson (1976), mostrando que a luminosidade das galáxias elípticas está correlacionada com sua massa (estimada com σ);
- a relação entre o raio característico de de Vaucouleurs r_e e o brilho superficial médio, dentro de r_e , $\langle I \rangle_e$, descoberta por Kormendy (1977), mostrando que galáxias maiores têm brilho superficial efetivo mais fraco;
- a relação a cor e a magnitude absoluta obtida dos trabalhos de Faber (1973) e Visvanathan e Sandage (1977), mostrando que as galáxias mais luminosas têm cores mais vermelhas.

Na verdade, os trabalhos de Dressler et al. (1987) e Djorgovski e Davis (1987) mostram que as galáxias elípticas exibem uma forte correlação entre três de seus parâmetros: o raio efetivo r_e (em kpc), o brilho superficial efetivo $\langle I \rangle_e$ (ou sua expressão em magnitudes $\langle \mu \rangle_e = -2.5 \log \langle I \rangle_e$) e a dispersão de velocidades σ (em km/s). Esses parâmetros delineiam um plano bem definido, no espaço desses três observáveis mencionados acima, sendo essas relações projeções desse plano em pares desses parâmetros. Dressler et al. (1987) também mostraram que o diâmetro D_n (em kpc), de uma isofota dentro da qual o de brilho superficial médio é $20.75 \text{ mag}/(r_e)^2$, na

banda B, correlaciona bastante bem com a dispersão de velocidades σ , porque a relação D_n - σ é uma outra expressão do Plano Fundamental.

Uma vez que essas relações sejam calibradas, a determinação de um parâmetro espectroscópico (σ) e um parâmetro fotométrico ($\langle\mu\rangle_e$) temos determinada uma dimensão física na galáxia (r_e ou D_n). Desta forma, se o Plano Fundamental (ou seu equivalente D_n - σ) for uma relação universal, sua potencialidade como estimador de distâncias é inquestionável. Entretanto, algumas dúvidas podem ser levantadas quanto a essa universalidade.

Este trabalho trata especificamente de galáxias Elípticas e Lenticulares e em particular do Plano Fundamental, visando abordar a questão mencionada acima da dependência desta relação com a morfologia e meio ambiente. Utilizamos para esta análise os dados do mapeamento ENEAR, recém concluído, de distâncias e redshifts de uma amostra completa e homogênea de cerca de 1000 galáxias elípticas e lenticulares, representativa de ambientes tão distintos quanto o campo e aglomerados. No Capítulo 2, apresentamos uma breve revisão de alguns aspectos conceituais e observacionais relacionados ao Plano Fundamental, enquanto no Capítulo 3 é feita uma descrição sucinta dos dados utilizados, como foram obtidos e os critérios para classificar uma galáxia como parte de um agrupamento. Finalmente, no Capítulo 4 são apresentados os resultados da análise realizada, e perspectivas futuras encerram esta monografia no Capítulo 5.

2. Plano Fundamental - Uma Relação Universal?

Utilizando uma linha de apresentação baseada em Milvang-Jensen (1997), pode-se considerar que uma das primeiras relações fundamentais entre parâmetros de galáxias elípticas foi estabelecida empiricamente por Faber e Jackson (1976), relacionando a luminosidade L e dispersão central de velocidades σ , na forma:

$$L \propto \sigma^a$$

O fator a estimado por esses autores foi de aproximadamente 4, mas na literatura subsequente é possível encontrar valores variando entre 2.4 e 4.2. É interessante notar que, como num sistema em equilíbrio e sem rotação o Teorema do Virial fornece uma massa $M \propto \frac{\sigma^2 r_e}{G}$ (onde r_e é um raio efetivo), a dispersão central de velocidades essencialmente representa a massa e a relação de Faber-Jackson pode ser considerada similar a uma relação massa-luminosidade.

Essa dependência da Luminosidade apenas com a dispersão σ , indicaria que as galáxias elípticas seriam uma família essencialmente descrita com um só parâmetro. No entanto, esta relação apresenta um espalhamento intrínseco sugestivo da presença de outro parâmetro. De fato, em trabalhos independentes, Dressler et al. (1987) e Djorgovski e Davis (1987) mostraram que incluindo o parâmetro brilho superficial efetivo $\langle I \rangle_e$, à relação de Faber-Jackson, na forma:

$$L \propto \sigma^a \langle I \rangle_e^b$$

o espalhamento diminui significativamente. Esses autores argumentam que esta é a relação completa e o resíduo é resultado de erros de medida e que um espalhamento intrínseco, com origem no processo de formação e evolução de galáxias, deve ser muito pequeno, da ordem de alguns por cento.

Como a luminosidade é dada por $L = 2\pi \langle I \rangle_e r_e^2$, esta relação também pode ser reescrita entre (L, σ, r_e) ou $(r_e, \sigma, \langle I \rangle_e)$. Esses parâmetros delineiam um plano bem

definido, no espaço logarítmico em qualquer dos conjuntos de três parâmetros. As projeções do plano são: duas relações previamente conhecidas, já mencionadas no Capítulo 1 - a relação de Faber-Jackson (1976), a correlação entre raio e brilho superficial efetivos (Kormendy 1977) - e a não-correlação entre os parâmetros brilho superficial e σ . Essas relações são mostradas na figura 2.1 reproduzida de Kormendy e Djorgovski (1989), onde também é mostrado o Plano Fundamental obtido por Djorgovski e Davis (1987).

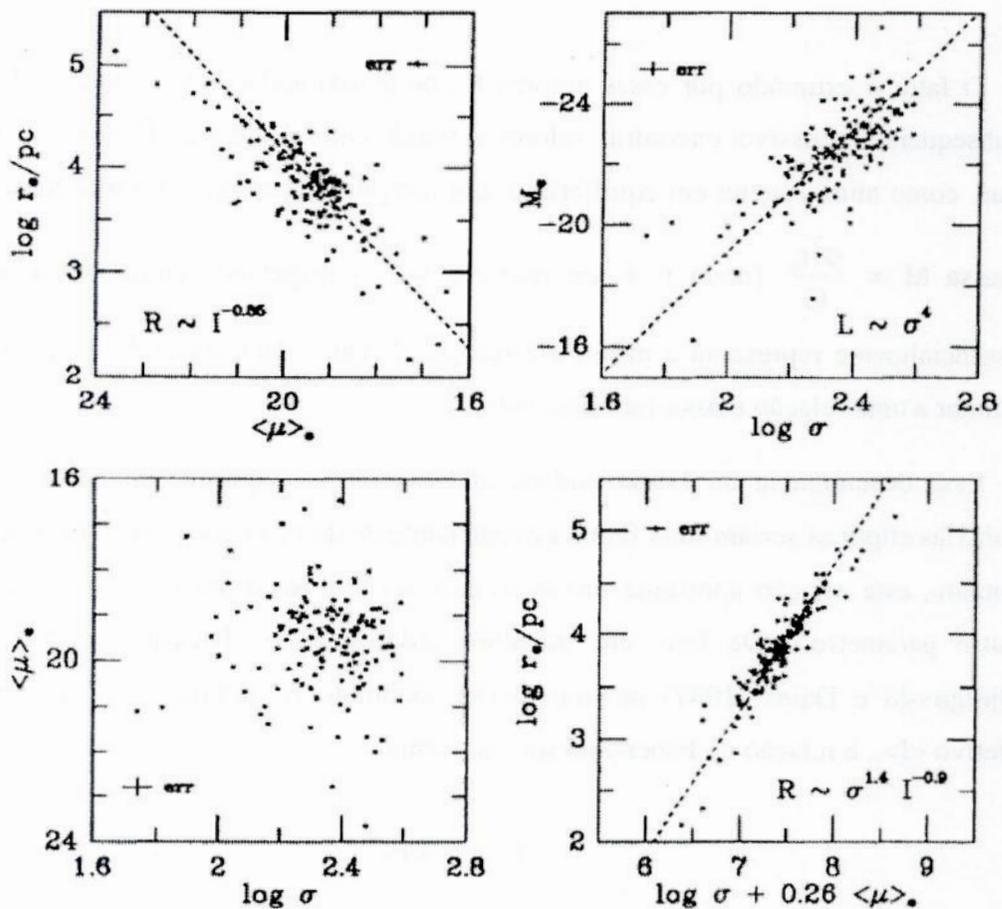


Figura 2.1 Painel superior esquerdo: relação de Kormendy, onde brilho superficial médio está expresso como $\langle \mu \rangle_e = -2.5 \log \langle I \rangle_e$ (em $\text{mag}/(\text{arcmin})^2$) e raio r_e medido em parsecs; Painel superior direito: relação Faber-Jackson (onde M é magnitude absoluta dentro de r_e); Painel inferior esquerdo: não-relação brilho efetivo - dispersão de velocidades σ (em km/s); Painel inferior direito: Plano Fundamental obtido por Djorgovski e Davis (1987).

Hoje em dia é um consenso que galáxias tipo “early” formam uma família de 2 parâmetros. Embora Terlevich et al. (1981) sugeriram que o índice Mg_2 (indicador de metalicidade) fosse uma das possibilidades, os trabalhos de Dressler et al. (1987) e Djorgovski e Davis (1987), e os subseqüentes na literatura (ex. Jorgensen 1996, JFK96), mostraram que as galáxias elípticas são muito bem descritas por uma forte correlação entre três de seus parâmetros, na versão usual do Plano Fundamental: o raio efetivo r_e (em kpc), o brilho superficial efetivo $\langle I \rangle_e$ (ou sua expressão em magnitudes $\langle \mu \rangle_e = -2.5 \log \langle I \rangle_e$) e a dispersão de velocidades σ (em km/s).

Nas figuras abaixo são apresentados três exemplos de determinações do Plano Fundamental. Na Figura 2.2 é mostrado o plano determinado por JFK96, enquanto na Figura 2.3 é apresentado o plano obtido por Colless et al. (2001). Na Figura 2.4 é mostrada uma das mais recentes e robustas determinações do Plano Fundamental, obtido em 4 diferentes bandas por Bernardi et al (2003), no projeto Sloan Digital Sky Survey. No painel relativo a cada banda é indicado o número de galáxias utilizado e o melhor ajuste obtido.

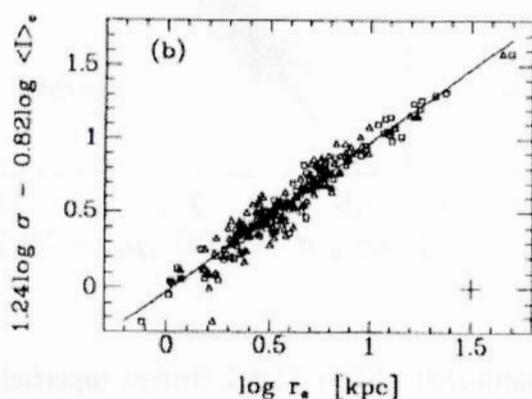


Figura 2.2 Plano Fundamental de JFK96. Brilhos $\langle I \rangle_e$ medidos em L_\odot/pc^2 , dispersões σ em km/s e raios r_e em kpc.

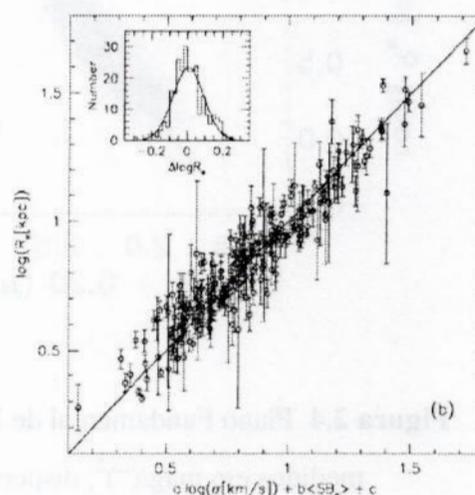


Figura 2.3 Plano Fundamental de Colless et al. (2001). Brilhos médios $\langle SB_e \rangle$ medidos em $\text{mag}/(\text{arcsec})^2$, dispersões σ em km/s e raios R_e em kpc.

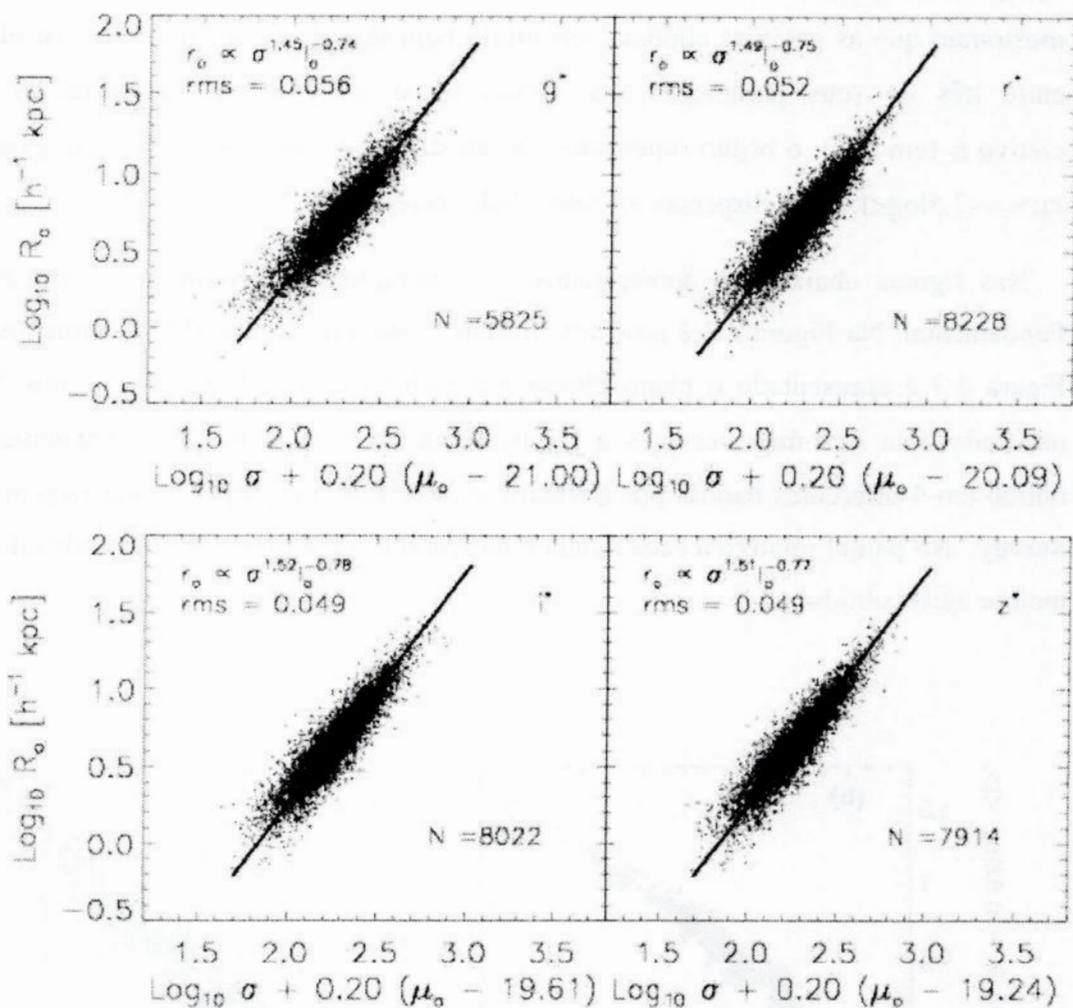


Figura 2.4 Plano Fundamental de Bernardi et al. (2003), SDSS. Brilhos superficiais μ_0 medidos em $\text{mag}/(\text{arcsec})^2$, dispersões σ em km/s e raios efetivos R_0 em h^{-1} kpc.

Os coeficientes encontrados para o Plano Fundamental $\log r_e = a \log \sigma + b \log \langle I \rangle_e +$ constante e as respectivas características das amostras (e bandas de observação) de alguns trabalhos encontrados na literatura, estão apresentados na Tabela 2.1, obtida de Bernardi et al. (2003).

Fonte	Banda	# galáxias	a	b
Dressler et al (1987)	B	97	1.33 ± 0.05	-0.83 ± 0.03
Djorgovski e Davis (1987)	r	106	1.39 ± 0.14	-0.90 ± 0.09
Lucey et al (1991)	B	26	1.27 ± 0.07	-0.78 ± 0.09
Guzman et al (1993)	V	37	1.14	-0.79
Jorgensen et al. (1996)	r	226	1.24 ± 0.07	-0.82 ± 0.02
Hudson et al. (1997)	R	352	1.38 ± 0.04	-0.82 ± 0.03
Scodeggio (1997)	I	294	1.55 ± 0.05	-0.80 ± 0.02
Pahre et al. (1998)	K	251	1.53 ± 0.08	-0.79 ± 0.03
Kelson et al. (2000)	V	30	1.31 ± 0.13	-0.86 ± 0.10
Gibbons et al. (2001)	R	428	1.37 ± 0.04	-0.825 ± 0.01
Colless et al. (2001)	R	255	1.22 ± 0.09	-0.84 ± 0.03
Bernardi et al. (2003)	r	8228	1.17 ± 0.04	-0.75 ± 0.01

Tabela 2.1 Dados da literatura, apresentando os coeficientes obtidos para o Plano Fundamental.

Mais ainda, Dressler et al. (1987) também mostraram que o diâmetro D_n (em pc), de uma isofota dentro da qual o brilho superficial médio é $20.75 \text{ mag}/('')^2$, na banda B, correlaciona bastante bem com a dispersão de velocidades σ , fornecendo a relação:

$$\log D_n = 1.33 \log \sigma + \text{constante}$$

Isto ocorre porque a relação D_n - σ é uma outra expressão do Plano Fundamental. De fato, assumindo que todas as galáxias têm o mesmo perfil de luminosidade e tomando-se a definição de D_n , é possível mostrar (Binney e Merrifield 1998, pág. 209) que $D_n \propto r_e \langle I \rangle_e^{0.8}$. Utilizando a definição do Plano Fundamental para eliminar r_e obtém-se

$$D_n \propto \sigma^{1.4} \langle I \rangle_e^{0.07}$$

A fraca dependência com $\langle I \rangle_e$ é responsável pela forte correlação observada entre D_n e σ .

Jorgensen et al. (1993) concluíram que a relação D_n - σ é menos precisa que o Plano Fundamental, sendo menor o espalhamento deste último (11% contra 17%). Entretanto, a relação D_n - σ possui a vantagem de vincular apenas dois parâmetros ao invés de três (como é o caso do Plano Fundamental), onde D_n é determinado diretamente através de fotometria, sendo mais prático e rápido do que determinar um raio efetivo e brilho superficial médio dentro dele. Em particular, a obtenção de um raio efetivo r_e necessita uma decomposição bojo-disco de cada galáxia, o que nem sempre pode ser feito com precisão.

Sendo o Plano Fundamental dado pelas quantidades observadas $r_e \propto \sigma^a \langle I \rangle_e^b$, resultantes da configuração final da galáxia, é interessante procurar expressá-lo através de quantidades físicas originais como massa e luminosidade (ex. Djorgovski et al. 1988, Bender et al. 1992), conforme descrito a seguir.

A soma das energias potencial E_{pot} e cinética E_{cin} deve ser menor que zero para um sistema ligado, como é o caso de uma galáxia. Assim, $-E_{\text{pot}} = K_e \cdot E_{\text{cin}}$, com $K_e > 1$.

Utilizando as expressões para as energias potencial $E_{\text{pot}} = \frac{-GM^2}{\langle R \rangle}$ e cinética

$E_{\text{cin}} = \frac{M}{2} \langle V^2 \rangle$, onde M , $\langle R \rangle$ e $\langle V^2 \rangle$ são medidas da massa, raio efetivo e velocidade quadrática média de uma galáxia, podemos escrever:

$$\frac{GM}{\langle R \rangle} = K_e \frac{\langle V^2 \rangle}{2}$$

Em particular, para um sistema virializado $K_e = 2$. Esta constante pode ser vista como uma medida do estágio de desenvolvimento em que se encontra a galáxia, sendo que o final corresponde ao equilíbrio atingido por um sistema virializado.

Uma relação entre $\langle R \rangle$, $\langle V^2 \rangle$ e luminosidade L com as quantidades observáveis r_e , σ e $\langle I \rangle_e$ pode ser feita tomando-se cuidado para permitir que haja variações nas propriedades físicas das galáxias, já que devem refletir as histórias de formação e evolução desses objetos. Assim:

$$r_e = K_r \langle R \rangle$$

$$\sigma^2 = K_v \langle V^2 \rangle$$

$$L = K_l \langle I \rangle_e r_e^2$$

Os parâmetros K incorporam a estrutura interna das galáxias, seja quanto a distribuição de densidade de massa (K_r), a dinâmica (K_v) ou a distribuição de luminosidade (K_l). A presença de K_r possibilita que haja diferença entre o raio projetado r_e e a quantidade física real $\langle R \rangle$, assim como K_v reflete a relação entre os movimentos aleatório e circular dentro das galáxias.

A combinação dessas expressões com a do Teorema do Virial, resulta em uma expressão para a massa:

$$M = \frac{K_e \sigma^2 r_e}{2GK_v K_r}$$

Assim, pode-se expressar, o raio efetivo r_e como:

$$r_e \sim K_e K_s (M/L)^{-1} \sigma^2 \langle I \rangle_e^{-1}$$

onde $K_s = \frac{1}{2GK_r K_v K_l}$. Esta expressão representa um Plano Fundamental teórico obtido das condições de virialização.

Comparando a equação acima com a do Plano Fundamental observado

$$r_e \propto \sigma^a \langle I \rangle_e^b$$

podemos concluir que $K_e K_s (M/L)^{-1}$ não pode ser constante mas deve variar segundo a expressão:

$$K_e K_s (M/L)^{-1} \propto \sigma^{a-2} \langle I \rangle_e^{b+1}$$

Como $a \neq 2$ e $b \neq -1$, conforme encontrado na literatura (vide tabela 2.1), todo termo $K_e K_s (M/L)^{-1}$ ou algum desses parâmetros isolados deve de fato depender dos parâmetros σ e $\langle I \rangle_e$ para obter-se a inclinação observada do Plano Fundamental. De fato pode-se inferir tal variação lembrando que podemos expressar σ , com as equações anteriores, como:

$$\sigma = K_{sr}^{-1/2} K_l^{-1/4} L^{1/4} (M/L)^{1/2} \langle I \rangle_e^{1/4} \quad \text{onde } K_{sr} = K_s K_e$$

Eliminando-se σ com a equação anterior obtém-se:

$$(M/L) \propto K_{sr1} L^{(1/a - 1/2)} \langle I \rangle_e^{-(1/2 + 2b/a + 1/a)} \quad \text{onde } K_{sr1} = K_{sr} K_l^{(1/2 - a)}$$

Utilizando os valores típicos de a e b pode-se verificar que o expoente de $\langle I \rangle_e$ não é significativo e desta forma, num sistema virializado ($K_e = 2$) e assumindo homologia estrutural entre as galáxias ($K_s = \text{constante}$) a razão massa-luminosidade varia como:

$$(M/L) \propto L^c \quad \text{onde } c = \frac{1}{a} - \frac{1}{2}$$

ou, analogamente, $(M/L) \propto M^d$ onde $d = \frac{(2-a)}{(2+a)}$.

Em particular esta última expressão mostra uma variação de (M/L) com σ uma vez que a massa é essencialmente determinada por esse parâmetro.

Além de fornecer uma importante ferramenta para estudar a natureza das galáxias tipo “early”, bem como sua origem e evolução, o Plano Fundamental tem outra importante consequência. Uma vez obtidos os coeficientes que o definem, e de posse das medidas da dispersão σ e do brilho superficial $\langle \mu_e \rangle$ de uma galáxia desse tipo, a expressão do Plano Fundamental determina o raio efetivo r_e físico (em kiloparsecs). Com este valor calculado e o parâmetro r_e observado (que é um ângulo medido em segundos de arco), podemos calcular a distância da galáxia. Analogamente, se medimos σ sabemos através da relação ajustada $D_n - \sigma$ seu diâmetro físico D_n e, medindo d_n (o diâmetro angular, em segundos de arco, da isofota $20.75 \text{ mag}/(‘’)^2$) sabemos sua distância. Desta forma, se o Plano Fundamental (ou seu equivalente $D_n - \sigma$) for uma relação universal, sua potencialidade como estimador de distâncias é inquestionável. Por isso, um ponto importante a ser avaliado é a universalidade desta relação.

Djorgovski e Davis (1987) e Dressler et al. (1987) não encontraram correlação entre resíduos do Plano Fundamental e alguns parâmetros ligados a forma das galáxias (como elipticidade e inclinação do perfil de brilho superficial), que refletem sua estrutura dinâmica interna. Apesar de basear o trabalho em galáxias elípticas, Dressler et al. (1987) realizaram um estudo preliminar com uma pequena amostra de lenticulares, indicando também a existência de um Plano Fundamental muito semelhante, talvez idêntico, ao das elípticas.

O estudo feito por JFK96 com galáxias tipo “early” presentes em cerca de 10 aglomerados, resultou em ajustes do Plano Fundamental para cada aglomerado essencialmente idênticos (valores dos coeficientes a e b dentro de suas margens de erro). Além disso, verificaram que não há correlação entre esses coeficientes e a distância das galáxias ao centro do aglomerado, nem com sua dispersão de velocidades ou temperatura do gás intra-aglomerado, apesar da amostra abranger uma faixa grande dessas propriedades. Esses são indícios de que os coeficientes a e b são universais. Ainda averiguando a relação com a densidade do meio em que as galáxias se encontram, JFK96 valendo-se do fato de que os aglomerados de sua amostra tinham graus de riqueza variados, compararam sistemas ricos com os pobres, e também as densidade superficiais projetadas de regiões centrais com as mais externas desses sistemas. Os resíduos do Plano Fundamental não apresentaram correlação com diferenças na densidade ambiental. Mais ainda, JFK96 encontraram elípticas e lenticulares definindo um mesmo Plano Fundamental.

Pode-se considerar também que a evolução das galáxias contribua para uma mudança no Plano Fundamental, já que os parâmetros nele envolvidos provavelmente sofrem alterações, desde a formação das galáxias até o momento atual. No entanto, Jorgensen et al. (1999) mostraram que o espalhamento da relação se mantém constante até um redshift de 0.6 e a variação do Plano é compatível como o esperado de uma evolução passiva de uma população de galáxias formadas na mesma época a um redshift superior a 5. Desta forma, a universalidade pode ser considerada como existente, desde que corrigida para esse efeito evolutivo.

Por outro lado, o trabalho descrito em de Carvalho & Djorgovski (1992) mostra indícios de que elípticas de campo e de aglomerados ricos não são idênticas. Neste trabalho, o Plano Fundamental apresenta inclinações diferentes, com valor maior do ponto zero além de um maior espalhamento intrínseco para as galáxias de campo. Neste artigo também é sugerido que, tomando-se como referência um determinado raio ou luminosidade, elípticas de campo têm uma tendência a serem mais azuis, com índice de metalicidade Mg_2 menor e alto brilho superficial: sinais de uma população estelar rejuvenescida por “mergers”. Também implicando na ocorrência recente de “mergers”, baseando-se numa amostra composta na sua maioria por elípticas de campo, Schweizer

et al. (1990) encontraram correlação entre índices de metalicidade (como Mg_2) e propriedades morfológicas associadas a estes eventos (como jatos, “ripples”, etc.).

Alguns destes resultados controversos, existentes na literatura, podem ser consequência da utilização de amostras pequenas, incompletas e heterogêneas utilizadas, ou contendo objetos peculiares. Embora o projeto SLOAN utilize uma amostra consideravelmente maior que as até então existentes, uma determinação adequada de morfologias e diferenças ambientais ainda não foi obtida. Por isso, estamos avaliando, neste trabalho, as questões relacionadas com a universalidade do Plano Fundamental, especialmente àquelas devidas às diferenças de morfologia e meio ambiente. Como a base de dados do projeto ENEAR é extensa e homogênea, e dispõe de classificação morfológica e associações de galáxias aos agrupamentos, ela se torna bastante adequada para avaliar estas questões.

3. Dados

3.1. Projeto ENEAR

Utilizamos, neste trabalho a base de dados levantada no projeto ENEAR (“Early-type NEARby galaxies”, da Costa et al. 2000), projeto este que realizou um mapeamento de galáxias tipo “early” no Universo local com o objetivo primeiro de estudar o campo de velocidades peculiares em grande escala. Para tal, o projeto levantou dados para uma amostra homogênea, cobrindo quase todo o céu, dessa forma minimizando os efeitos de seleção. É composta por aproximadamente 1500 galáxias elípticas e lenticulares ($T \leq -2$) com magnitudes, na banda B, mais brilhantes que $m_B = 14.5$ e velocidades radiais $cz \leq 7000 \text{ km s}^{-1}$. Além dessa amostra completa, a amostra total inclui também um conjunto de cerca de 255 galáxias tipo “early”, excedendo os limites acima, pertencentes a aglomerados de galáxias e utilizadas para melhorar a estatística de objetos em aglomerações, visando uma melhor determinação do estimador de distâncias.

Os dados observacionais levantados para o projeto são provenientes de espectroscopia realizada em diferentes telescópios, com resolução entre 2 Å e 4 Å, a maioria apresentando razão sinal/ruído $S/N > 20$ e são constituídos de:

- velocidades radiais;
- dispersões de velocidades estelares, normalizadas para o centro da galáxia;
- índices de linhas espectrais, no sistema Lick (Faber et al. 1985, Worthey et al. 1994), relativos ao Magnésio (Mg_2), Ferro (FeI , $\lambda 5270$, $\lambda 5335$) e $H\beta$.

Os dados fotométricos são decorrentes de observações CCD na banda R (e alguns na banda B) também em diferentes instrumentos, fornecendo:

- magnitudes integradas;

- perfis de brilho corrigidos de efeitos de “seeing”;
- decomposições bojo-disco (ver exemplo na Figura 3.1) fornecendo, raios de de Vaucouleurs r_e , brilhos médios dentro do raio r_e , $\langle I \rangle_e$, razões bojo/disco;
- parâmetros isofotais como elipticidade, orientação da isofota, coeficientes de Fourier para o ajuste isofotal;
- diâmetros angulares d_n definidos na banda R (equivalentes à isofota $\mu_B=20.75 \text{ mag}/(“)^2$).

O conjunto de dados reunidos para o projeto inclui aqueles obtidos através de observações feitas especificamente para o projeto ENEAR, assim como os já existentes na literatura em 1997. Entre eles, os obtidos por Dressler (1980), Lucey e Carter (1988), Faber et al (1989, 7S), Dressler, Faber e Burstein (1991), Jorgensen, Franx, Kjaergaard (1995 a,b), Lucey et al (1997) e Smith (1997). Dos objetos originalmente selecionados, uma pequena fração ($\approx 2\%$) mostrou possuir estruturas e características de galáxias espirais (provavelmente resultado de uma classificação morfológica original incorreta) e são descartados das análises. A amostra total está completa em espectroscopia, contendo cerca de 1755 determinações de velocidades radiais e dispersões de velocidades. Fotometria CCD de boa qualidade, na banda R, foi obtida para cerca de 1015 galáxias desse conjunto. Como as observações do projeto ENEAR foram realizadas em diversos instrumentos, um cuidado especial foi tomado para homogeneizar os dados. Com esta finalidade, observações foram duplicadas em instrumentos diferentes e em comum com dados da literatura, para permitir a construção de um esquema de superposição capaz de levar todos os dados a um sistema comum.

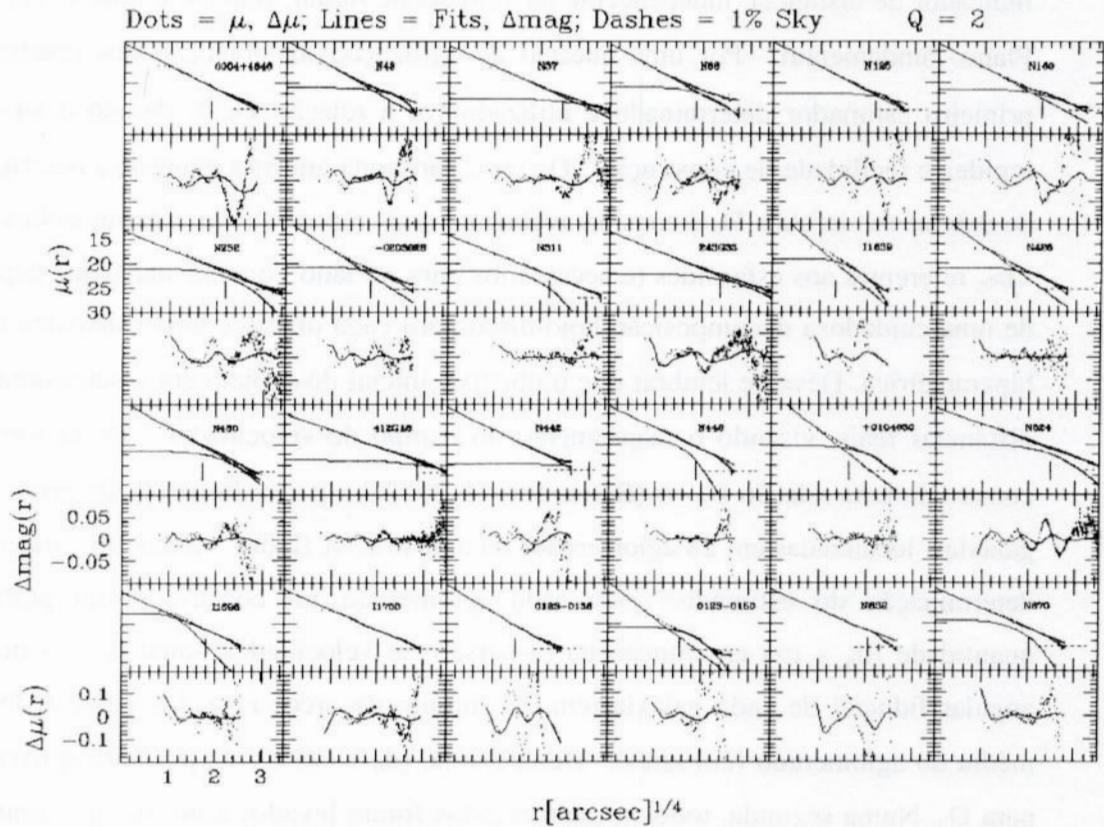


Figura 3.1 Exemplo de decomposições de perfis nas componentes bojo e disco feitas para o projeto ENEAR. Cada galáxia é mostrada em dois painéis. Nos superiores, é apresentado o perfil observado (pontos), o melhor ajuste de um bojo, um disco e sua soma (em linha contínua), o valor de r_e (pequena linha vertical), o limite de 1% da intensidade do céu, usualmente tomado com limite do perfil (pequena linha horizontal tracejada). Nos painéis inferiores relativos a cada galáxia é mostrada a diferença de brilho superficial observada e ajustada $\Delta\mu(r)$ (pontos) e a diferença das magnitudes integradas dentro de uma distância radial r nos perfis observados e ajustados $\Delta\text{mag}(r)$ (linha contínua).

3.2. Relação D_n - σ Como Indicador de Distância

Um dos principais atrativos do projeto é a sua possibilidade de determinação de um indicador de distância, independente da velocidade radial, seja ele a relação D_n - σ ou o Plano Fundamental. Por uma questão de agilização na obtenção dos resultados, o primeiro estimador determinado e utilizado foi a relação D_n - σ , devido à sua maior rapidez e facilidade de construção. De fato, para uma amostra extensa, a determinação de diâmetros isofotais D_n é consideravelmente mais rápida que as determinações de r_e e $\langle I \rangle_e$, referentes aos esferóides (e necessários para o Plano Fundamental), que dependem de uma cuidadosa decomposição bojo-disco para cada objeto e uma estatística robusta biparamétrica. Deve-se lembrar que o objetivo inicial do projeto era a determinação de distâncias reais, visando o mapeamento do campo de velocidades. Desta forma, foi construída uma relação D_n - σ (Bernardi et al, 2002a) a partir dos dados de cerca de 450 galáxias, localizadas em 28 aglomerados da amostra. A figura 3.2 mostra uma etapa na determinação do estimador: para cada aglomerado foi construído um gráfico da quantidade $(d_n \times cz)$ em função da dispersão de velocidades, onde d_n é o diâmetro angular fiducial de cada galáxia (em 0.1 minuto de arco) e cz é a velocidade radial média do aglomerado (em km/s). Desta forma, $(d_n \times cz)$ é uma primeira aproximação para D_n . Numa segunda, todos os aglomerados foram levados a um mesmo ponto zero de escala, que minimizasse o espalhamento dos pontos.

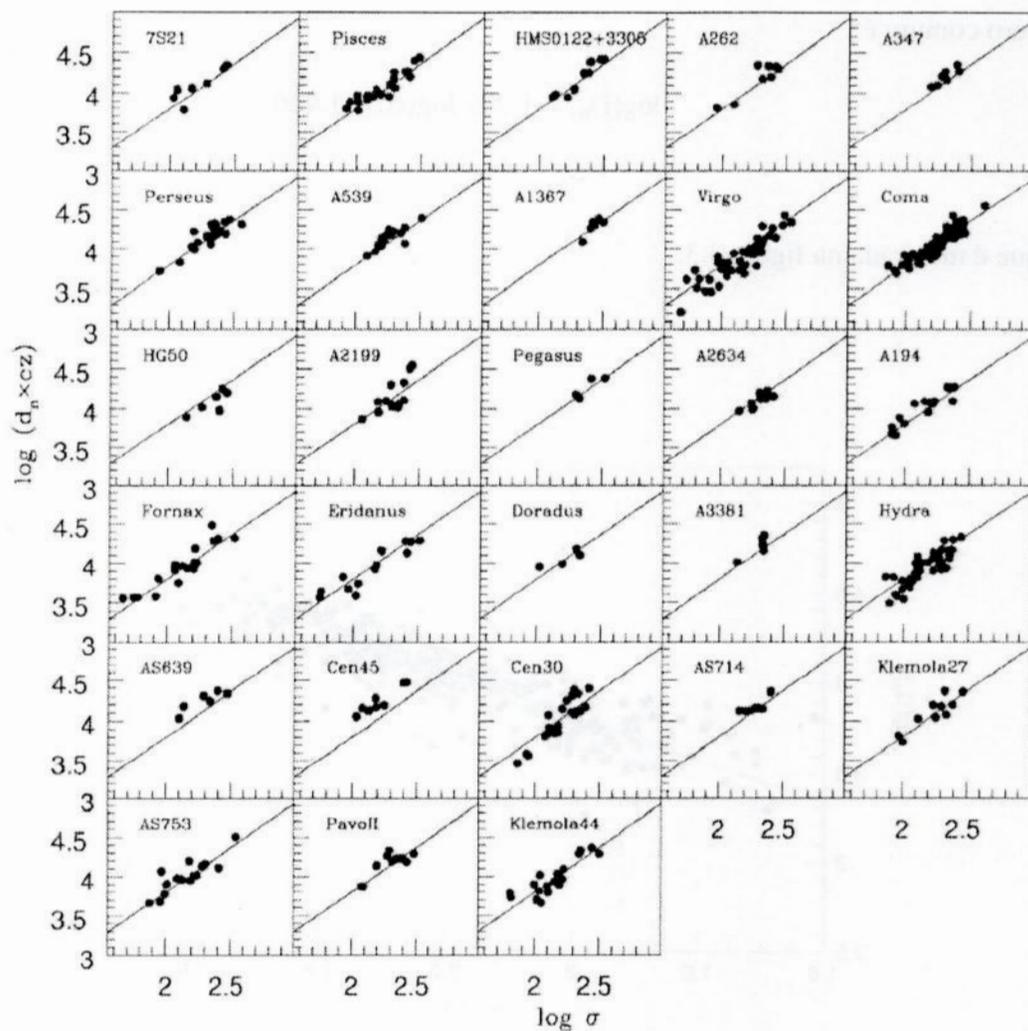


Figura 3.2 Primeiras estimativas de $D_n (= d_n \times cz)$ em função da dispersão de velocidades σ para as galáxias dos 28 aglomerados da amostra. As retas representam o melhor ajuste que minimiza o espalhamento dos pontos na construção de uma única relação, deslocando cada aglomerado ao longo de $(d_n \times cz)$. Respectivas unidades são 0.1 minuto de arco para d_n , km/s para cz , e pc para D_n .

Finalmente um ponto zero absoluto para a relação $D_n - \sigma$ foi escolhido de forma que os aglomerados distantes ($cz > 3000$ km/s) estejam em repouso com relação à radiação cósmica de fundo. A relação final foi obtida de um ajuste com todos os dados no ponto zero comum é:

$$\log(D_n) = 1.203 \log(\sigma) + 1.406$$

que é mostrada na figura 3.3.

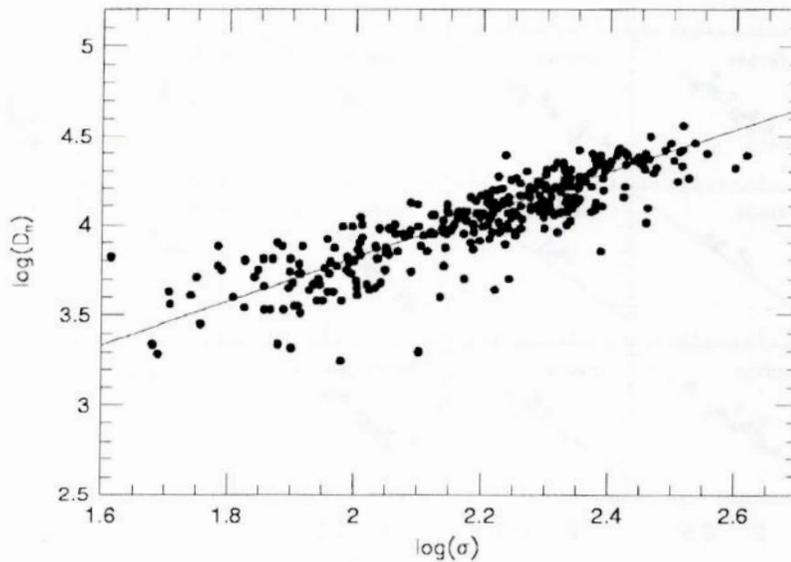


Figura 3.3 Relação $D_n - \sigma$ para o projeto ENEAR. As unidades são pc para D_n , e km/s para dispersão de velocidades σ .

A partir dos valores observados de d_n e desta relação, distâncias reais foram determinadas para todos os 1015 objetos com fotometria de boa qualidade. Essas distâncias foram utilizadas para determinar diversos parâmetros físicos como raios de de Vaucouleurs (em kpc), luminosidades (magnitudes absolutas) e massas viriais. A

variedade de parâmetros fotométricos e espectroscópicos observados e parâmetros físicos calculados, disponíveis na base de dados do projeto ENEAR, vem sendo utilizada, atualmente, para analisar as propriedades de galáxias tipo “early” e suas correlações com o meio ambiente. O objetivo atual do projeto é o estudo das relações estruturais e das populações estelares presentes nos objetos, visando contribuir para uma melhor compreensão dos processos de formação e evolução de galáxias.

3.3. Critérios para Definir Aglomerações

Em particular, é de grande interesse uma avaliação dos efeitos do meio ambiente sobre as relações paramétricas aqui discutidas. E para realizar uma análise desta natureza, utilizamos o fato de que a amostra do projeto foi submetida a um procedimento de modo a distinguir galáxias essencialmente “isoladas” de galáxias pertencentes a grupos e aglomerados (Bernardi et al 2002b). Construiu-se inicialmente um catálogo de grupos e aglomerados, utilizando levantamentos objetivos que determinaram tais sistemas na literatura (Huchra e Geller 1982, Maia, da Costa e Latham 1989 e Ramella et al.1999). Este catálogo contém informações sobre cada grupo e aglomerado, como número de membros, posição central, dispersão de velocidades, entre outras. Foi, então verificado se cada galáxia da amostra satisfaz às condições que permitam associá-la a qualquer uma dessas aglomerações, examinando a separação projetada e a diferença no espaço de redshifts entre as galáxias e os valores referentes ao centro do grupo.

Dois critérios foram utilizados para associar uma galáxia a um determinado grupo. O primeiro deles é

$$d \leq 1.5 R_g$$

onde d é a distância projetada da galáxia ao centro do grupo e R_g é seu raio característico (a separação projetada média entre todas as galáxias-membro). O outro é dado por

$$|\Delta v| \leq 1.5 \sigma_g$$

onde Δv é a diferença das velocidades radiais da galáxia e do grupo e σ_g é a dispersão de velocidades das galáxias no grupo. Vale dizer que esses critérios são tais que consideram a maioria dos objetos da periferia dos grupos como seus membros.

Então, cada galáxia da amostra do ENEAR tem a ela associada, além dos parâmetros fotométricos e espectroscópicos mencionados acima, as informações relativas à sua morfologia e se pertence a um grupo, a um aglomerado ou se é um objeto do campo. O número de objetos divididos em suas morfologias e ambientes é mostrado na tabela 3.1.

Tipo	E	S0	Galáxia em grupos ou aglomerados	Galáxias no campo
Número	457	558	639	376

Tabela 3.1 Distribuição das 1015 galáxias com boa fotometria, por morfologia e meio ambiente.

Esses dados foram utilizados para a análise apresentada no Capítulo 4.

4. A Dependência do Plano Fundamental com Diferentes Parâmetros

A obtenção de um Plano Fundamental genuíno deve ser feita com uma metodologia semelhante à que foi brevemente descrita no capítulo anterior, com relação à relação $D_n - \sigma$. Esta etapa de trabalho está em andamento com a conclusão recente de uma melhoria nos ajustes dos perfis de brilho e decomposição bojo-disco para cada galáxia, e a elaboração de uma metodologia estatística adequada para essa determinação. Exemplos de metodologias desse tipo podem ser encontrados em Saglia et al. (2001) e Bernardi et al. (2003). Enquanto isso prossegue, determinamos para este estudo, um Plano Fundamental para galáxias elípticas e S0, utilizando as distâncias obtidas no projeto ENEAR e verificamos a validade deste procedimento, construindo um Plano preliminar e testando a identidade deste com a relação $D_n - \sigma$.

Conforme mencionado no capítulo anterior, no projeto ENEAR optou-se por adotar como estimador de distâncias a relação $D_n - \sigma$. Utilizando os valores inicialmente obtidos para o raio efetivo (angular) de de Vaucouleurs r_e , através de decomposição bojo – disco e as distâncias assim determinadas, foram derivados os tamanhos físicos r_e (kpc) para as 1015 galáxias com boa fotometria, onde consideramos a constante de Hubble $H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Em outras palavras, construímos um Plano Fundamental, já com as galáxias situadas em suas distâncias supostamente corretas. Este não é o procedimento usual de construção de um Plano Fundamental (ex. Colless et al. 2001) e é baseado na idéia de que a relação $D_n - \sigma$ seja uma das representações deste Plano. Esta idéia é confirmada mais adiante, nesse mesmo capítulo.

Com o conjunto de parâmetros ($r_e(\text{kpc})$, σ (km/s), $\langle \mu \rangle_e(\text{mag}/(")^2)$) determinamos o melhor ajuste de um plano:

$$\log(r_e(\text{kpc})) = a \log(\sigma) + b' \langle \mu \rangle_e + c$$

ou, usando a forma apresentada nos capítulos anteriores, ($\langle \mu \rangle_e = -2.5 \log \langle I \rangle_e$):

$$\log(r_e(\text{kpc})) = a \log(\sigma) + b \log \langle I \rangle_e + c$$

obtido através de método de mínimos quadrados com duas variáveis, para a amostra de galáxias com boa fotometria. Uma análise da variação dos ajustes em função do domínio para cada parâmetro que define o Plano, mostrou que o ajuste de menor espalhamento é obtido nos domínios $[\log(r_e \text{ (kpc)}) < 1]$, $[18 < \langle \mu \rangle_e < 21]$ e $[\log(\sigma) > 2]$. A Figura 4.1 mostra os mesmos painéis da Figura 2.1, com os dados do projeto ENEAR, e a determinação do Plano Fundamental mencionada acima. O melhor ajuste forneceu os seguintes coeficientes:

$$a=1.18 \pm 0.01, \quad b = -0.73 \pm 0.002 \quad (b' = 0.29 \pm 0.001) \quad \text{e} \quad c = -7.89 \pm 0.03,$$

bastante próximos dos encontrados por Bernardi et al (2003).

Na Figura 4.2 é mostrada uma visão tri-dimensional do Plano Fundamental com suas projeções nos planos formados pelas variáveis $(r_e(\text{kpc}), \sigma, \langle \mu \rangle_e)$.

Para verificar a consistência de estarmos utilizando a relação $D_n - \sigma$ como uma representação do Plano Fundamental, fizemos uma determinação preliminar e aproximada do Plano com os dados do projeto ENEAR. Para tal, levamos em consideração que efeitos de seleção (amplificados com a distância) presentes nas amostras de galáxias dos aglomerados, modificam a inclinação da relação determinada, conforme descrito em Bernardi et al. (2002). Desta forma, utilizamos para este procedimento apenas os 4 aglomerados mais próximos (velocidades $< 4000 \text{ km/s}$), que estão praticamente isentos deste efeito: Virgo, Fornax, Eridanus e Hydra. Normalizamos os valores dos raios efetivos observados r_e (") para a posição de Virgo, adicionando aos valores de r_e uma quantidade:

$$\Delta \log(r_e) = - \log \left(\frac{v_{\text{agl}}}{v_{\text{virg}}} \right)$$

onde v_{agl} é a velocidade radial de cada aglomerado (Fornax, Eridanus e Hydra) e v_{virg} é a velocidade radial de Virgo.

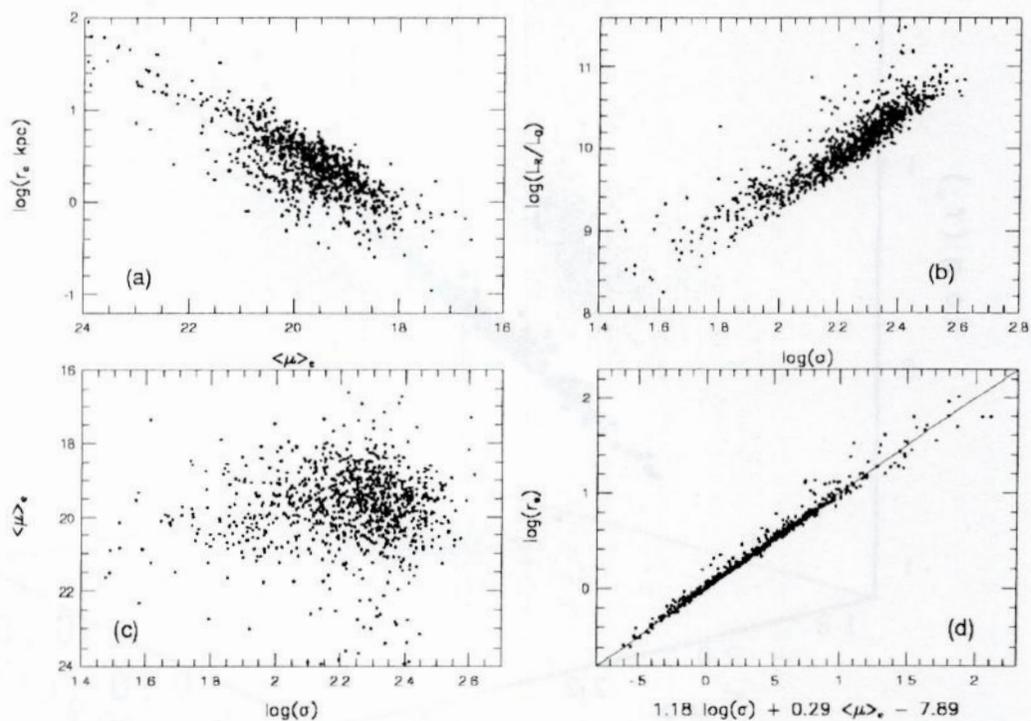


Figura 4.1 Resultados obtidos com a base de dados do projeto ENEAR. Painel (a) relação de Kormendy, onde o brilho superficial médio está expresso como $\langle \mu \rangle_e = -2.5 \log \langle I \rangle_e$ (em $\text{mag}/('')^2$) e raio r_e medido em kpc; Painel (b): relação Faber-Jackson; Painel (c): não-relação entre brilho superficial efetivo e dispersão de velocidades (em km/s); Painel (d): Plano Fundamental.

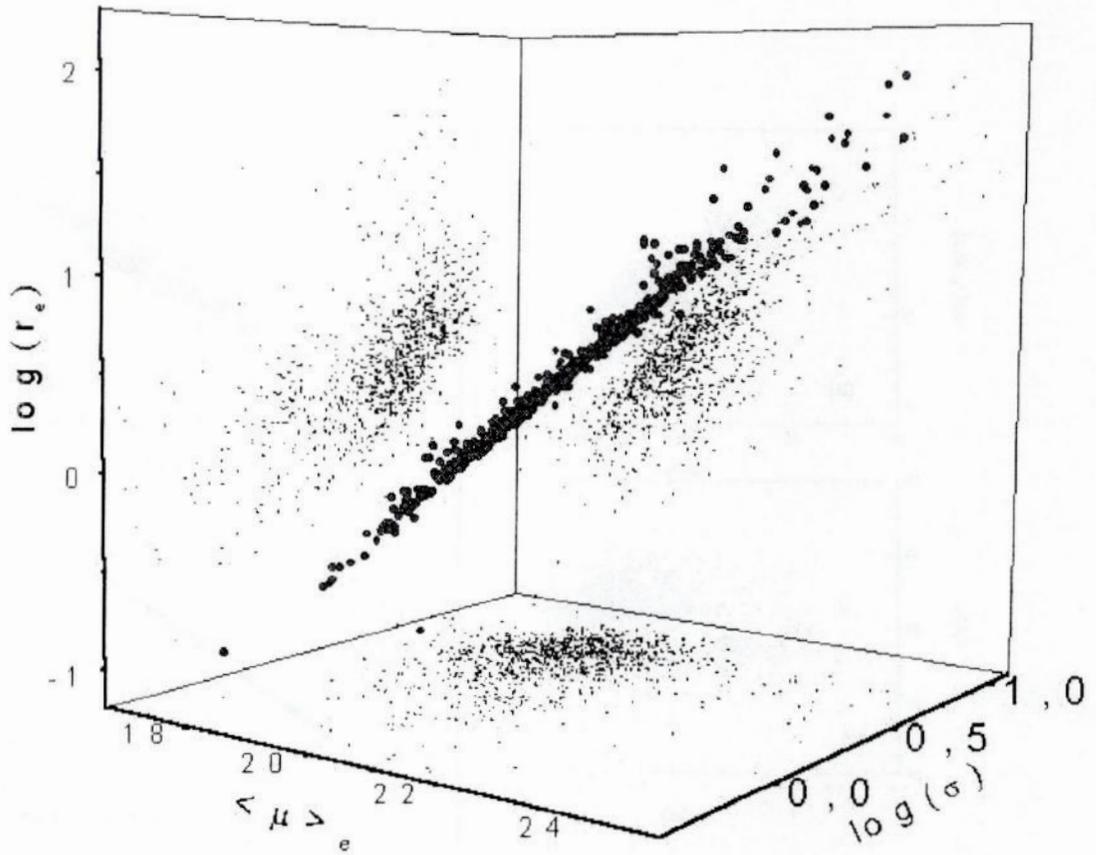


Figura 4.2 Plano Fundamental para 1015 galáxias E e S0 do projeto ENEAR. O ângulo de visada foi escolhido de modo a ver o Plano de perfil. As unidades de seus parâmetros são as mencionadas na Figura 4.1.

Com isto, construímos uma amostra conjunta desses aglomerados e determinamos um ajuste de mínimos quadrados a duas variáveis (nos mesmos domínios mencionados anteriormente) para o Plano Fundamental, obtendo os coeficientes:

$$a = 1.18 \pm 0.02 \quad b = -0.75 \pm 0.01 \quad (b' = 0.30 \pm 0.004) \quad c = -8.09 \pm 0.1$$

essencialmente os mesmos valores obtidos através das distâncias calculadas com a relação $D_n - \sigma$, mostrando que essas relações se equivalem. A figura 4.3 mostra o Plano Fundamental assim obtido, utilizando 123 galáxias dos aglomerados mencionados acima.

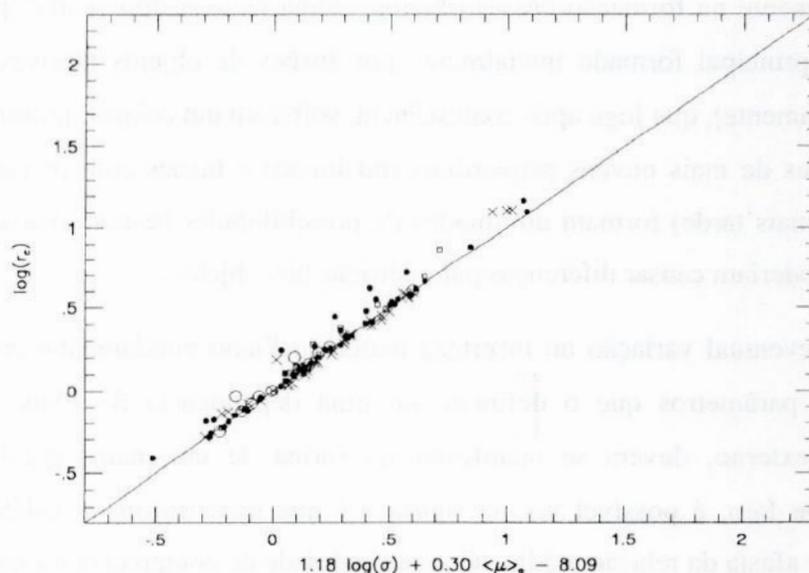


Figura 4.3 Plano Fundamental obtido, de modo simplificado, com galáxias dos aglomerados de Virgo (círculos cheios), Fornax (círculos vazios), Eridanus (quadrados vazios) e Hydra (cruzes) após normalização dos raios efetivos para a distância de Virgo. Unidades dos parâmetros são as mencionadas na Figura 4.1.

Com este resultado podemos confiar que os coeficientes do Plano Fundamental, obtidos utilizando as distâncias provenientes da relação $D_n - \sigma$, representam

adequadamente tal plano, o que implica que o pequeno espalhamento encontrado (ver figura 4.1(d)) deve ser essencialmente de natureza observacional e intrínseco a própria relação. Isto auxilia no estudo dos resíduos do Plano Fundamental em função dos diferentes parâmetros, mostrado a seguir, pois minimiza erros observacionais.

É um consenso hoje em dia que o Plano Fundamental parece traduzir uma boa representação das galáxias tipo “early”. Entretanto, isto só será exato se estas formarem uma única família paramétrica, o que significaria, de certa forma, que o processo de formação desses objetos é único e não depende do ambiente em que as galáxias se originam, nem das condições iniciais peculiares das nuvens protogalácticas. Deve-se lembrar os dois cenários de formação de galáxias mais aceitos – colapso monolítico e aglutinação hierárquica – não são mutuamente exclusivos e podem ter concorrido simultaneamente na formação desses objetos. Uma galáxia tipo “early” pode ter tido seu corpo principal formado inicialmente por fusões de objetos gasosos primordiais (hierarquicamente), que logo após coalescência, sofreram um colapso monolítico. Mais ainda, fusões de mais nuvens primordiais (no início) e fusões com outras galáxias já formadas (mais tarde) formam um quadro de possibilidades bastante variadas que, em princípio poderiam causar diferenças paramétricas nos objetos.

Uma eventual variação ou incerteza maior do Plano Fundamental com relação a algum dos parâmetros que o definem, ou uma dependência do Plano com algum parâmetro externo, devem se manifestar na forma de um maior espalhamento da relação. De fato, é possível ver na figura 4.1 que uma fração de galáxias, embora pequena, se afasta da relação média. Com a finalidade de compreender a natureza desse espalhamento realizamos uma análise dos resíduos do Plano Fundamental, na forma:

$$\Delta FP = \log(r_e(\text{kpc})) - FP$$

onde $r_e(\text{kpc})$ é o valor do raio efetivo observado, assumindo a galáxia na sua posição definida pela relação $D_n - \sigma$, e $FP = 1.18 \log(\sigma) - 0.29 \langle \mu \rangle_e - 7.89$ é a expressão do Plano Fundamental obtida neste trabalho. Na figura 4. 4, mostramos os resíduos ΔFP em função de cada parâmetro $\log(r_e(\text{kpc}))$, $\log(\sigma)$ e $\langle \mu \rangle_e$.

O primeiro ponto que deve ser ressaltado é o fato de que a grande maioria das galáxias segue o Plano Fundamental, como indicado pela nuvem de pontos ao longo das linhas de resíduo zero, apresentadas nos painéis da figura 4.4. Menos de 20% das galáxias se afastam da relação por mais de 1 desvio padrão (rms).

É possível ver que, com relação ao raio efetivo r_e (kpc) no painel (a), não há um desvio sistemático para $\log(r_e \text{ (kpc)}) < 1$, mostrando a estabilidade do Plano Fundamental com relação a este parâmetro. Entretanto, galáxias com raios efetivos superiores a 10 kpc apresentam um considerável espalhamento, que já podia ser identificado na Figura 4.1. De certa forma, este resultado não é surpreendente, pois muitas destas galáxias gigantes e de grandes massas são as galáxias centrais dos aglomerados, produtos de fusões de galáxias já formadas. Estes objetos são certamente passíveis de apresentarem as maiores variações com relação à média, devido às diferentes histórias evolutivas que percorreram. O espalhamento dos resíduos mostra que estes são maiores para objetos maiores, como esperado neste contexto.

A dispersão central de velocidades σ , também representa um parâmetro de bastante regularidade no Plano Fundamental, como mostrado no painel (b) da Figura 4.4. Essencialmente relacionado à massa das galáxias, esse parâmetro mostra um espalhamento da distribuição dos pontos essencialmente constante para qualquer massa.

Um resultado bastante interessante é revelado pelos resíduos do Plano Fundamental relativos a $\langle \mu \rangle_e$, o brilho superficial médio dentro do raio efetivo, apresentado no painel (c). Apenas no domínio $18 < \langle \mu \rangle_e < 21$ a relação apresenta resíduo pequeno. Galáxias com brilhos superficiais altos, $\langle \mu \rangle_e < 18 \text{ mag/(")}^2$, se desviam sistematicamente do Plano Fundamental. Lembrando da relação de Kormendy (ver Figura 4.1, painel (a)), estas são galáxias Elípticas compactas constituindo objetos pequenos, com baixa massa, e, portanto, podendo não ter atingido um grau satisfatório de virialização. Por outro lado, as galáxias de baixo brilho superficial, $\langle \mu \rangle_e > 20.5 \text{ mag/(")}^2$, são responsáveis pela maior parte do espalhamento do gráfico. Estas galáxias representam os mesmo objetos de altos valores de raio efetivo, constituindo as galáxias gigantes, fortes candidatas a serem produtos de fusões de galáxias previamente formadas.

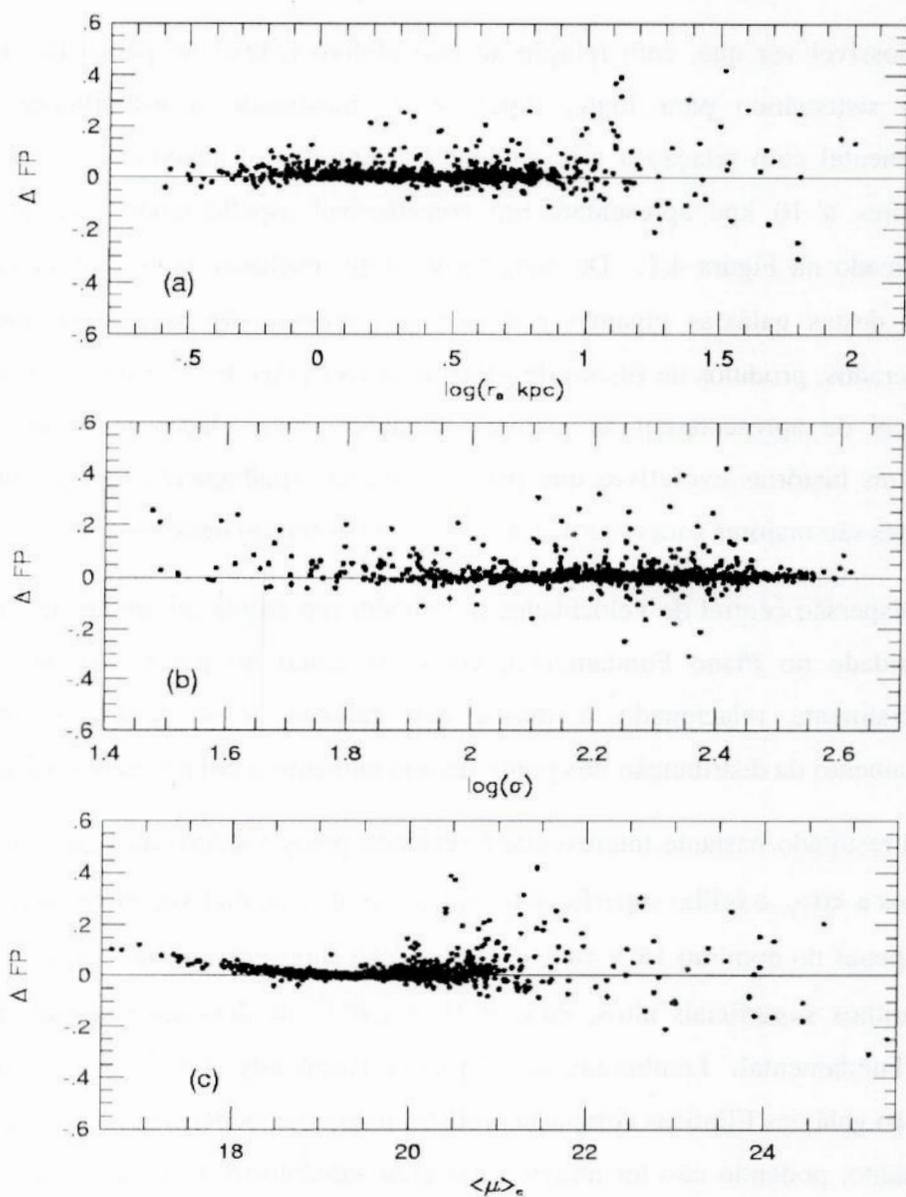


Figura 4.4 Resíduos do Plano Fundamental em função de diferentes parâmetros. Brilho $\langle \mu \rangle_e$ medido em $\text{mag}/(\text{''})^2$, dispersão σ em km/s e raio r_e em kpc.

Estes resultados mostram que, essencialmente, os desvios verificados no gráfico do Plano Fundamental são causados por galáxias de muito alto ou muito baixo brilho superficial (Figura 4.4(c)). Estas galáxias são objetos nos extremos de tamanhos, muito pequenos ou muito grandes (Figura 4.4 (a)), apresentando um grande domínio de valores.

A possibilidade de que os desvios do Plano Fundamental sejam dependentes da morfologia das galáxias e do meio ambiente onde elas se encontram é examinada, de forma qualitativa, a seguir. Na série de figuras abaixo, apresentamos os mesmos painéis da Figura 4.4, agora se discriminando Elípticas de S0s (Figuras 4.5) e galáxias de grupos e aglomerados de galáxias do campo (Figuras 4.6) para os resíduos em função do raio efetivo r_e . O mesmo é feito, nas Figuras 4.7 e 4.8, para os resíduos em função da dispersão de velocidades σ , e nas Figuras 4.9 e 4.10, para os resíduos em função do brilho superficial médio $\langle\mu\rangle_e$. Nestas figuras, é mostrada também a média do valor do parâmetro do eixo horizontal em intervalos constantes e adequados para mostrar sua variação, bem como a incerteza do valor médio em cada intervalo.

Um exame destas figuras mostra que, essencialmente, não existe uma diferença significativa nas distribuições de resíduos em qualquer dos parâmetros, causada pela discriminação dos dados em morfologia ou meio ambiente. Os valores encontrados para as médias nos intervalos são os mesmos, dentro das incertezas mostradas, para as diferentes amostras comparadas. Isto representa um forte indício de que o Plano Fundamental é uma representação bastante robusta da relação paramétrica entre r_e , σ e $\langle\mu\rangle_e$. Deve-se notar que as galáxias S0 são sistemas onde a presença de um disco sugere uma importância relativamente alta da rotação do objeto, se comparadas às galáxias Elípticas, tidas como sistemas quase sem rotação, gravitacionalmente suportados pela dispersão de velocidades de suas estrelas. Mesmo assim, as duas classes de morfologias são bastante semelhantes quanto ao Plano Fundamental. Da mesma forma, as galáxias pertencentes a aglomerados ricos, que devem ter passado por eventos de interação e colisão com outros objetos muito mais frequentes do que as galáxias do campo, não apresentam um Plano Fundamental significativamente diferente destas últimas.

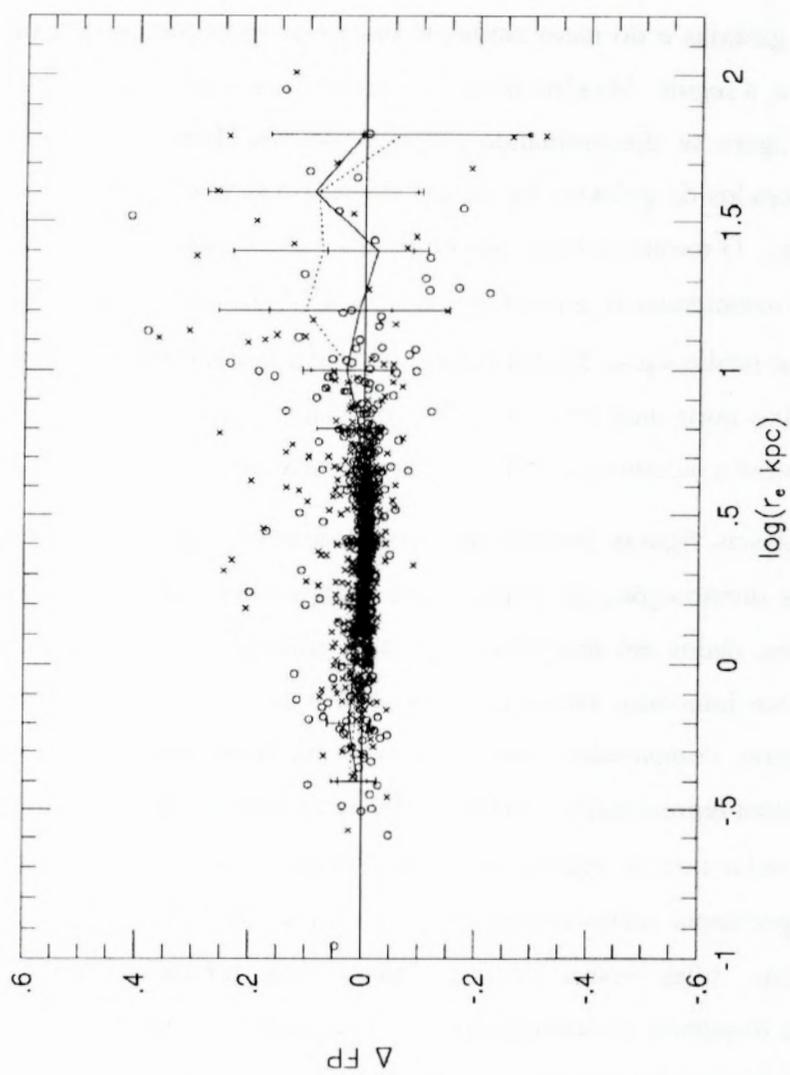


Figura 4.5 Resíduos do Plano Fundamental em função do raio efetivo r_e (kpc). Círculos e linha contínua representam Elípticas. Cruzes e linha pontilhada representam S0s.

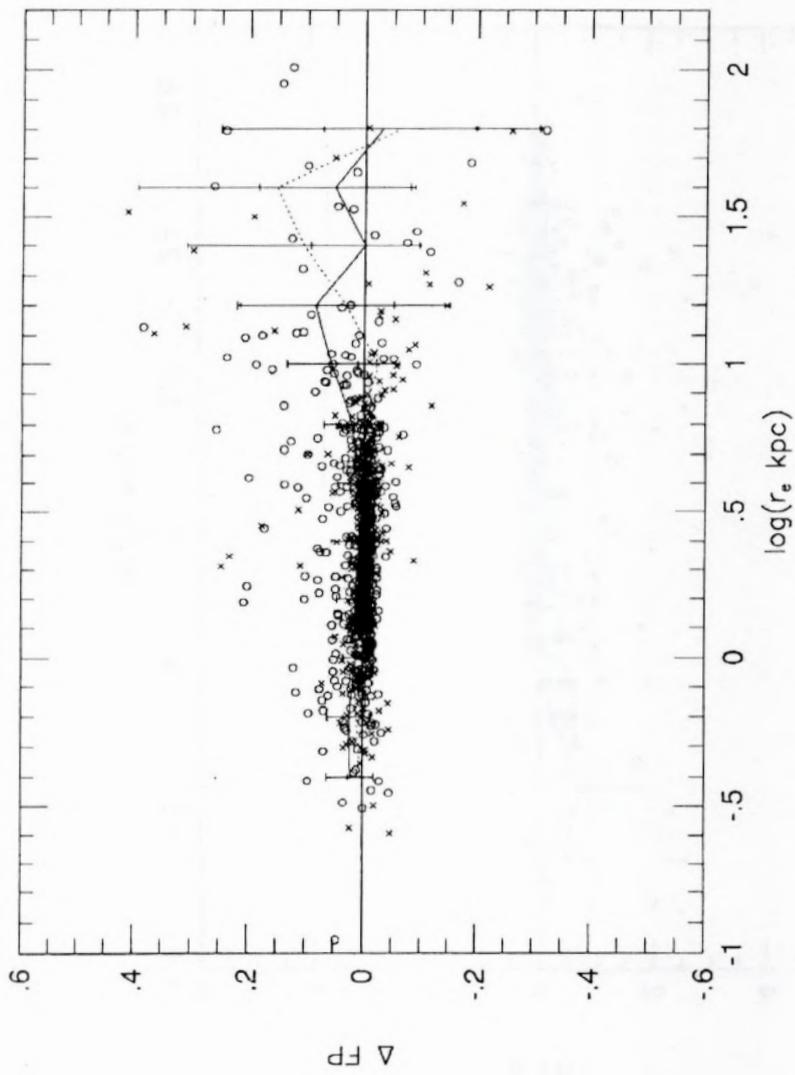


Figura 4.6 Resíduos do Plano Fundamental em função do raio efetivo r_e (kpc). Círculos e linha contínua representam galáxias em grupos e aglomerados. Cruzes e linha pontilhada representam galáxias do campo.

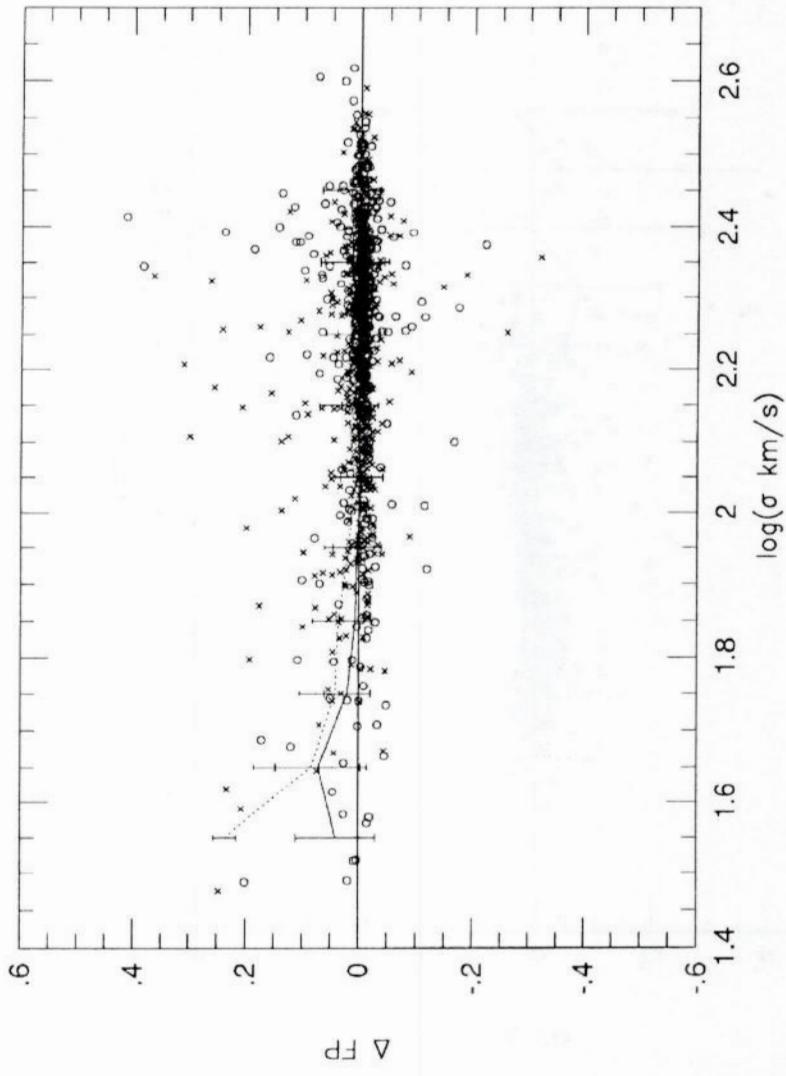


Figura 4.7 Resíduos do Plano Fundamental em função da dispersão de velocidades (km/s). Círculos e linha contínua representam Elípticas. Cruzes e linha pontilhada representam S0s.

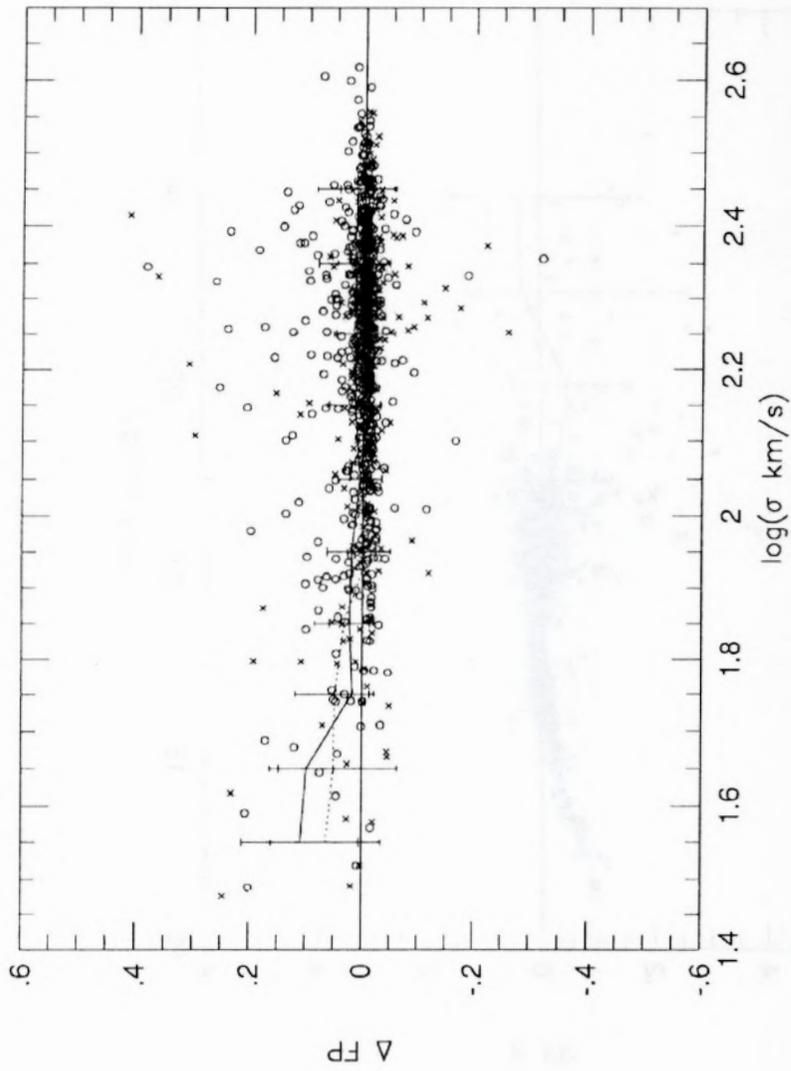


Figura 4.8 Resíduos do Plano Fundamental em função da dispersão de velocidades (km/s). Círculos e linha contínua representam galáxias em grupos e aglomerados. Cruzes e linha pontilhada representam galáxias do campo.

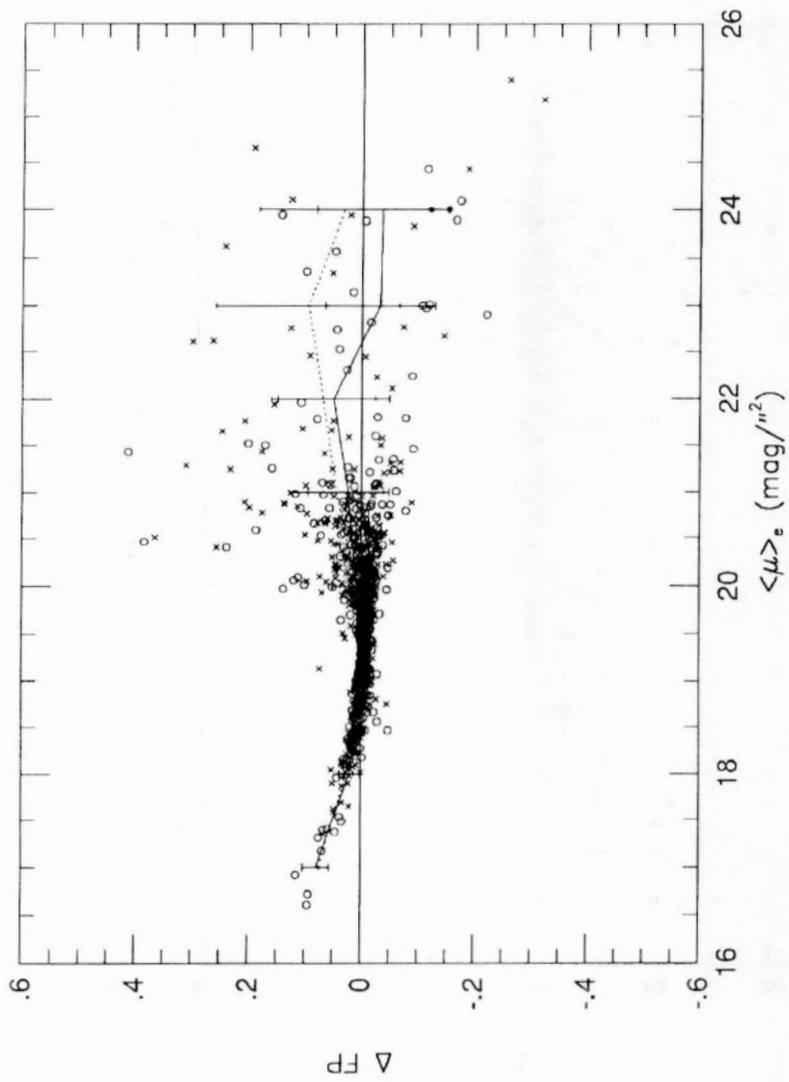


Figura 4.9 Resíduos do Plano Fundamental em função do brilho superficial médio ($\text{mag}/(\text{arcmin})^2$). Círculos e linha contínua representam Elípticas. Cruzes e linha pontilhada representam S0s.

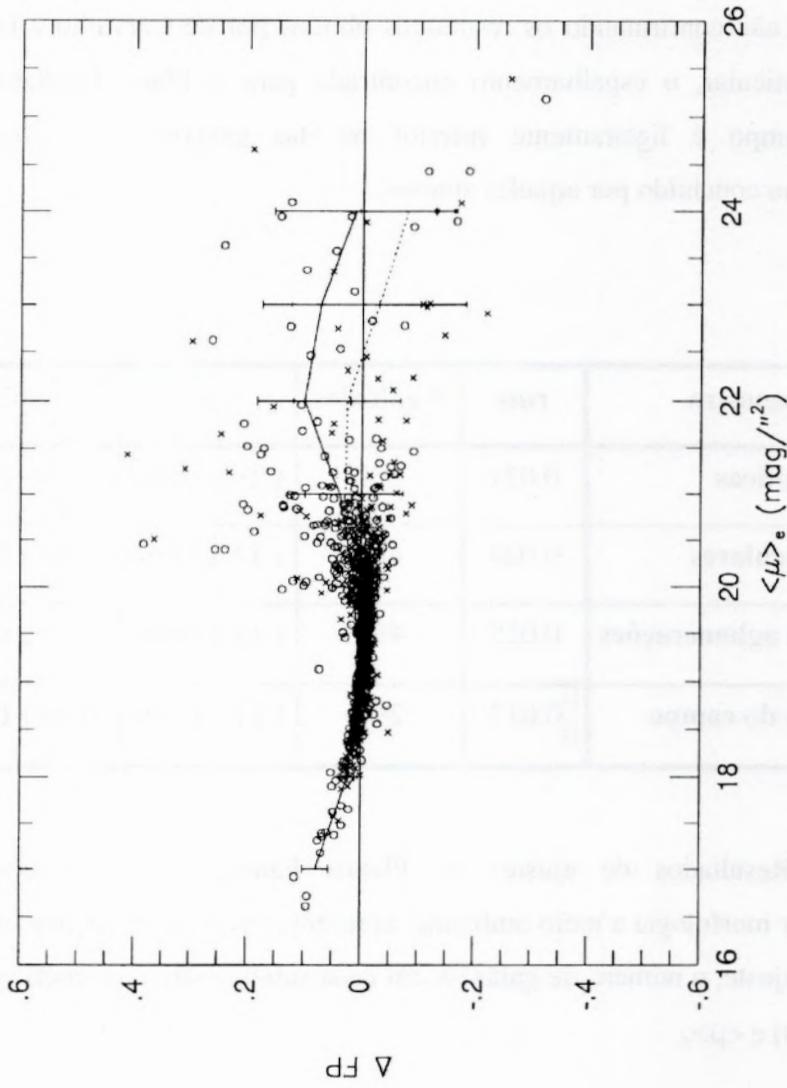


Figura 4.10 Resíduos do Plano Fundamental em função do brilho superficial médio (mag/arcmin²). Círculos e linha contínua representam galáxias em grupos e aglomerados. Cruzes e linha pontilhada representam galáxias do campo.

Finalmente, ajustamos os Planos Fundamentais a cada uma das sub-amostras - Elípticas, Lenticulares, galáxias em grupos e aglomerados e galáxias do campo – através de método de mínimos a duas variáveis, encontrando os valores mostrados na tabela 4.1. Nela também são apresentados o valor do desvio padrão do ajuste e o número de galáxias em cada sub-amostra. Os valores encontrados para os coeficientes do ajuste (a e b') e os seus erros mostram que os planos são os mesmos, como mencionado anteriormente e não confirmando os resultados obtidos por de Carvalho e Djorgovski (1992). Em particular, o espalhamento encontrado para o Plano Fundamental das galáxias de campo é ligeiramente inferior ao das galáxias em aglomerações, contrariamente ao concluído por aqueles autores.

Sub-amostra	rms	# galáxias	a	b'
Elípticas	0.021	352	1.19 ± 0.009	0.28 ± 0.002
Lenticulares	0.024	434	1.17 ± 0.010	0.29 ± 0.002
Galáxias em aglomerações	0.025	489	1.18 ± 0.009	0.29 ± 0.002
Galáxias do campo	0.017	297	1.17 ± 0.008	0.28 ± 0.001

Tabela 4.1 Resultados de ajustes de Planos Fundamentais às sub-amostras diferenciadas por morfologia e meio ambiente, apresentando o desvio padrão dos dados com relação ao ajuste, o número de galáxias em cada sub-amostra e os coeficientes dos parâmetros $\log(\sigma)$ e $\langle \mu \rangle_e$.

Uma possível explicação para os resultados apresentados neste capítulo é que os parâmetros que compõem o Plano Fundamental sejam essencialmente representativos das partes mais centrais dos esferóides, e a formação destes seja um processo com características bastante homogêneas.

5. Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho apresentamos uma revisão simplificada sobre as relações paramétricas de galáxias tipo “early” e uma análise qualitativa de possíveis variações da principal destas relações – o Plano Fundamental – com os parâmetros que o compõem e de possíveis dependências com a morfologia das galáxias e o meio ambiente. Uma análise quantitativa desta questão e sua extensão, envolvendo parâmetros relacionados às populações estelares das galáxias, bem como dos efeitos da rotação sobre estas relações, será apresentada numa tese de mestrado em andamento.

A principal vantagem deste trabalho foi ter utilizado uma amostra numerosa de galáxias, contendo dados homogêneos e de boa qualidade, que nos permitiram obter distâncias reais dos objetos e analisar os desvios do Plano Fundamental, livre dos efeitos causados pelas velocidades peculiares das galáxias.

Os principais resultados podem ser sintetizados como:

- A relação $D_n - \sigma$ é uma boa representação do Plano Fundamental, fornecendo, com as distâncias por ela obtidas, essencialmente a mesma expressão obtida com uma determinação genuína simplificada do Plano.
- A morfologia e o meio ambiente aparentemente não causam variações significativas sobre o Plano Fundamental. Os parâmetros raio efetivo, dispersão central de velocidades estelares e brilho superficial médio dentro do raio efetivo apresentam uma robusta relação para a grande maioria das galáxias tipo “early”. Como esses parâmetros representam características físicas centrais, talvez fosse mais apropriado se referir ao Plano Fundamental como uma propriedade fundamental de esferóides, neles englobando as galáxias elípticas e os bojos de galáxias S0.

As galáxias que apresentam desvios mais significativos do Plano Fundamental representam menos de 20% do número total de objetos. Estas são compostas essencialmente de dois tipos de objetos:

- Um deles é o tipo associado às galáxias Elípticas mais compactas, que podem se afastar da relação fundamental, como consequência de desvios da virialização. De fato, como mostrado na figura 4.4(c), pode-se ver o gradativo afastamento do Plano Fundamental quanto maior o brilho superficial, isto é, quanto menor é o objeto. Se os esferóides são sistemas homólogos, isto é, se seguem uma mesma lei de distribuição de massa, diferindo no ponto zero, os objetos menores têm menos massa e, portanto menos estrelas, o que pode favorecer um desvio da virialização. Se os esferóides não são homólogos, seria natural, também, esperar relações paramétricas diferentes do Plano Fundamental. Ambas as situações justificariam o gradativo desvio desses objetos do Plano Fundamental.
- O outro tipo de objeto que contribui para o espalhamento é o formado pelas galáxias de grandes dimensões como as galáxias centrais de aglomerados. Estes são objetos com diversos indícios de serem produto de fusão de galáxias já formadas. Este processo gera naturalmente uma variedade de condições finais, decorrentes da complexa dinâmica envolvida, e um espalhamento como o verificado nas figuras 4.4(c) para brilhos superficiais baixos, $\langle \mu \rangle_e > 20.5 \text{ mag}/(\text{''})^2$, e na figura 4.4(a) para os objetos maiores, $\log(r_e(\text{kpc})) > 1$.

Pretendemos agora aprofundar a análise aqui apresentada com a quantificação dos resultados aqui apresentados e incluir, no estudo, a avaliação das diferenças eventualmente causadas por diferentes populações estelares e pelo movimento rotacional das galáxias. De fato, o estabelecimento de um perfil de brilho de uma galáxia deve depender basicamente de dois processos de naturezas diferentes, envolvidos na sua formação. O primeiro é a eficiência de formação estelar, que depende essencialmente das condições físicas da nuvem protogaláctica. O segundo é a dinâmica de formação do objeto, que deve concentrar massa em suas regiões centrais de modo mais eficiente quanto menor for o momento angular primordial da nuvem protogaláctica. Neste caso, o momento angular deve ser um parâmetro com algum grau de associação com o brilho superficial médio. Em adição a isto, a evolução química das populações estelares dependerá da capacidade do potencial gravitacional da galáxia (sua

massa) em reter o material enriquecido, ejetado por supernovas, que formará novas estrelas. Utilizaremos para a análise das populações estelares as medidas do índice Mg2, disponíveis na base de dados do projeto ENEAR e para o estudo dos efeitos da rotação os dados disponíveis no Lyon-Meudon Extragalactic Database.

Referências

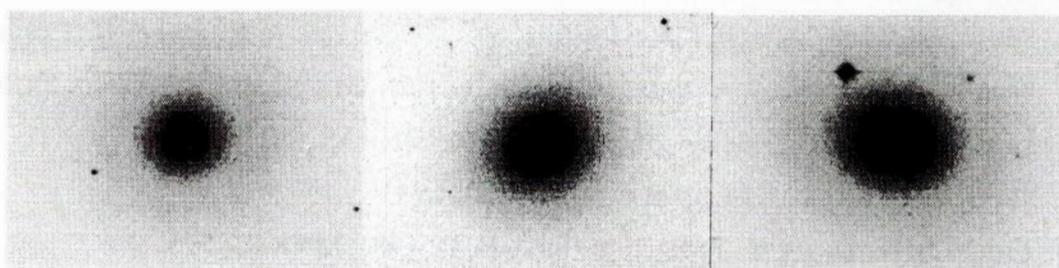
- Alonso, M.V. et al. 2002, em preparação
- Baugh, C. S., Cole, C., e Frenk, C. S. Frenk, 1996, MNRAS 283, 1361
- Battaner, E. e Florido, E. 2000, Fund. Cosm. Phys. 21, 1
- Bekki, K. 1998, ApJ, 496, 713
- Bender, R., Burstein, D. e Faber, S. 1992, ApJ 399, 462
- Bernardi, M., Alonso, M.V., da Costa, L.N., Willmer, C., Wegner, G, Pellegrini, P., Rite, C., Maia, M. 2002a, AJ, 123, 2159
- Bernardi, M., Alonso, M.V., da Costa, L.N. Willmer, C., Wegner, G, Pellegrini, P., Rite, C., Maia, M. 2002b, AJ, 123, 2990
- Bernardi, M. et al. (SDSS Team) 2003, AJ, 125, 1866
- Binney, J, Merrifield, M 1998, "Galactic Astronomy", Princeton University Press, Princeton
- Blumenthal, G. Faber, S. Primack, J. Rees, M. 1984, Nature, 311, 517
- Carlberg, R. G. 1984a ApJ 286, 403
- Carlberg, R. G. 1984b ApJ 286, 416
- Carollo, M., Danziger, J. E Buson, L. 1993, MNRAS, 265, 553
- Colless, M., Saglia, R., Burstein, D., Davies, R., McMahan, R. e Wegner, G. 2001, MNRAS, 321, 277
- da Costa, L., Pellegrini, P., Sargent, W. L. W., Tonry, J., Davis, M., Meiksin, A. & Latham, D. 1988, Ap. J. 327, 544
- da Costa, L.N., Bernardi, M., Alonso, M.V., Wegner, G., Willmer, C., Pellegrini, P., Rit e, C., Maia, M. 2000, AJ 120, 95
- da Costa, L., Willmer, C., Pellegrini, P., Chaves, O., Rite, C., Maia, M., Geller, M., Latham, D., Kurtz, D., Huchra, J., Ramella, M., Fairall, A., Smith, C., & Lipari, S. 1998, AJ 116, 1
- de Carvalho, R. e Djorgovski, S. 1992, ApJ Let, 389, L49
- de Carvalho, R., Djorgovski, S. e da Costa L.N. 1991, ApJ 76, 1067
- de Vaucouleurs, G. 1948 AnAp 11, 247

- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., and Corwin, H.G. 1976, Reference Catalog of Bright Galaxies, 2nd ed., Austin: University of Texas Press (RC2)
- de Zeeuw, T. e Franx, M. 1991, ARAA, 29, 239
- Djorgovski, S. e Davis, M. 1987, ApJ, 313, 59
- Djorgovski, S, de Carvalho, R. e Han, M. 1988, in "The Extragalactic Distance Scale", Proceedings of the ASP 100th Anniversary Symposium, (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco)
- Colless, M., Saglia R.P., Wegner G.A, McMahan R.K., Davies R.L., Burstein D., 2001, MNRAS, 321, 277
- Dressler, A. 1980, Ap. J. Suppl. 42:565
- Dressler, A. 1984, ARAA, 22, 185
- Dressler, A., Faber, S. e Burstein D. 1991, ApJ. 368, 54
- Dressler, A., Lynden-Bell, D., Burstein, D., Davies, R. L., Faber, S. M., Terlevich, R., Wegner, G. 1987, ApJ, 313, 42
- Eggen, O., Lynden-Bell, D. e Sandage, A. 1962, ApJ, 136, 748
- Elmegreen, D. 1998, "Galaxies and Galactic Structure", Prentice-Hall
- Faber, S. 1973, ApJ, 179, 731
- Faber, S. M., Friel, E. D., Burstein, D., & Gaskell, C. M. 1985, ApJS, 57, 711
- Faber, S. e Jackson, R. 1976, ApJ, 204, 668
- Faber, S., Wegner, G., Burstein, D. Davies, R., Drellser, A., Lynden-Bell, D. Terlevich, R. 1989, ApJS 69, 763
- Gibbons, R., Frushter, A. e Bothum, G. 2001, AJ, 121, 649
- Guzman, R., Lucey, J. E Bower, R. 1993, MNRAS, 265, 731
- Hubble, E.P. 1926, ApJ. 64, 321.
- Huchra, J., Davis, M., Latham, D. & Tonry, J. 1983, Ap. J. Suppl. 52, 89.
- Huchra, J. P. e Geller, M. 1982, ApJ 257, 423
- Huchra, J., Vogeley, M. and Geller, M. 1999, ApJS, 121, 287
- Hudson, M, Lucey, J., Smith, R.e Steel, J. 1997, MNRAS, 291, 488
- Jorgensen, I., Franx, M., Hjorth, J., van Dokkum, P. 1999, MNRAS, 308, 833
- Jorgensen, I., Franx, M., Kjaergaar, P. 1993, ApJ, 418, 617
- Jorgensen, I., Franx, M., Kjaergaar, P. 1995a, MNRAS 273, 1097
- Jorgensen, I., Franx, M., Kjaergaar, P. 1995b, MNRAS 276, 1341

- Kaufman, G. e Charlot, S. 1998, MNRAS, 297, 23
- Kelson, D., Illingworth, G., van Dokkum, P. e Franx, M. 2000, ApJ, 531, 184
- Kennicutt, R. 1998, ARAA, 36, 189
- Kormendy, J. 1977, ApJ, 218, 333
- Kormendy, J., Bender, R., Magorrian, J., Tremaine, S., Gebhardt, K., Richstone, D., Dressler, A., Faber, S., Grillmair, C. e Lauer, T. 1997, ApJ, 482, L139.
- Kormendy, J. e Djorgovski, G. 1989, ARAA, 37, 235
- Larson, R. 1974, MNRAS, 166, 585
- Larson, R. 1975, MNRAS 173, 671
- Larson, R., Tinsley, B. e Caldwell, N. 1980, Ap.J, 237, 692
- Loveday, J., Peterson, B.A., Maddox, S.J., & Efstathiou, G., 1996, ApJS, 107, 201
- Lucey, J, Bower, R, Ellis, R. 1991, MNRAS, 249, 755
- Lucey, J. e Carter, D. 1988, MNRAS 235 1177
- Lucey, J. Guzman, R., Steel, J. Carter, D. 1997, MNRAS, 287, 899
- Lundmark, K. 1926, Uppsala Medd. 19b, No. 8.
- Maia, M.A.G, da Costa, L. N. e Latham, D. 1989, ApJ Supp 69, 809
- Milvang-Jensen, B. 1997, Tese de Mestrado, University of Copenhagen,
<http://www.astro.ku.dk/~milvang/Master/more/thesis/thesis.html>
- Navarro, J, Frenk, C. e White, S. 1997 ApJ 490, 493
- Pahre, M, Djorgovski, S. e de Carvalho, R. 1998, AJ, 116, 1591
- Peebles, J. 1982, ApJLet, 263, L1
- Ramela et al. 1999, A&A 342, 1
- Rix, H., Carollo, M. Freeman, K. 1999, ApJ 513, 25
- Roberts M. e Haynes, M. 1994, ARAA, 32, 115
- Saglia, R., Colless, M., Burstein, D., Davies, R., McMahan, R. e Wegner, G. 2001, MNRAS, 324, 389
- Sandage, A. 1961, Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Institution of Washington Publication 618.
- Sandage, A. 1975, in Galaxies and the Universe, Sandage, A., Sandage, M., and Kristian, J., eds., University of Chicago Press, Chapter 1
- Sandage, A. e Tammann, G. 1981 "A Revised Shapley-Ames Catalog", Carnegie Institution of Washington

- Schombert, J. 1986, ApJSup, 60, 603
- Schombert, J. 1987, ApJSup, 64, 643
- Schweizer, F. 1982, ApJ 252, 455
- Scodreggio, M. 1997, PhD Thesis, Cornell University
- Sérsic, J.L. 1968 "Atlas de Galaxias Australes" (Observatório Astronômico: Córdoba)
- Shapley, H., and Ames, A. 1932, Annals of the Harvard College Observatory 88, No. 2.
- Smith, R., Lucey, J., Hudson, M., Steel, J 1997, MNRAS, 291, 461
- Strom, S.E e Strom, K.M. 1978 ApJ. Let. 225, L93
- Terlevich, R., Davis, R., Faber, S. e Burstein, D. 1981, MNRAS, 196, 381
- Tully, B. e Fisher, J.R. 1977 A&A, 54, 661
- Van der Kruit 2001, in "The Dynamics, Structure & History of Galaxies", ASP Conference Series, 2002, eds. G.S. Da Costa & E.M. Sadler
- Visvanathan, N. e Sandage, A. 1977 ApJ, 216, 214
- Worthey, G., Faber, S. M., Gonzáles, J., e Burstein, D. 1994, ApJS, 94, 687
- Zaritsky, D., Smith, R., Frenk, C.S., & White, S.D.M., 1997 ApJLett, 478, L53
- Zeldovich Y.B. 1970, A&A 5, 84
- Zwicky, F., Herzog, E. 1963 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 2, California Institute of Technology, Pasadena
- Zwicky, F., Herzog, E. 1966 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 3, California Institute of Technology, Pasadena
- Zwicky, F., Herzog, E. 1968 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 4, California Institute of Technology, Pasadena
- Zwicky, F., Herzog, E., Wild, P. 1961 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 1, California Institute of Technology, Pasadena
- Zwicky, F., Karpowicz, M., Kowal, C.T. 1965 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 5, California Institute of Technology, Pasadena
- Zwicky, F., Kowal, C.T. 1968 Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies, 6, California Institute of Technology, Pasadena

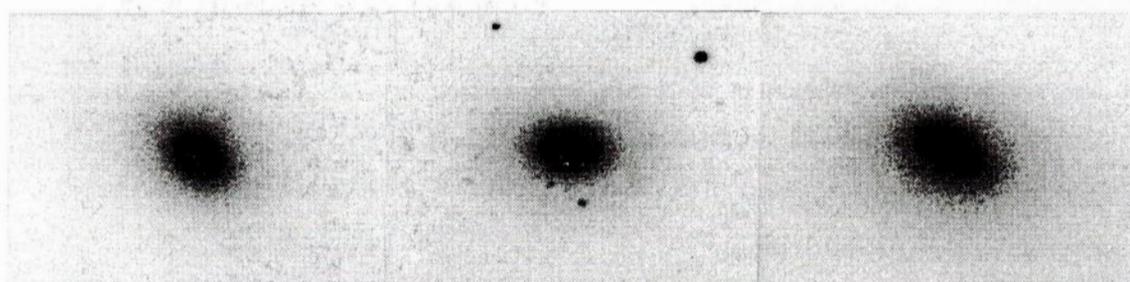
Anexo: Morfologias do tipo “Early”



E0

E1

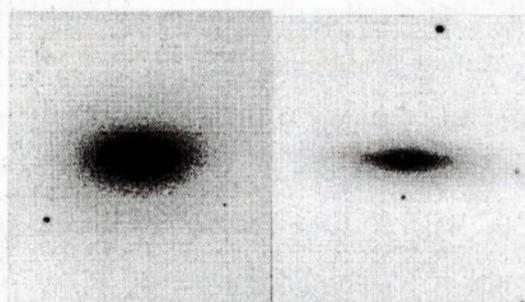
E2



E3

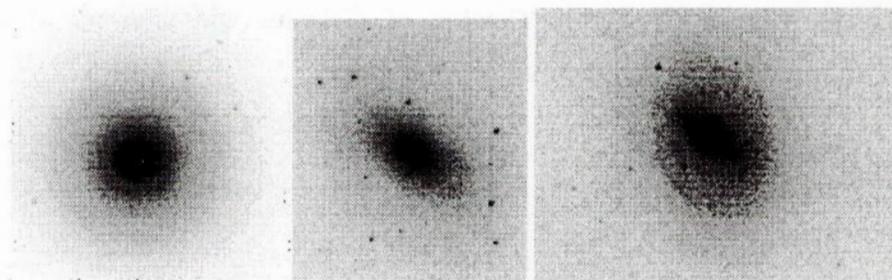
E4

E5



E6

E7



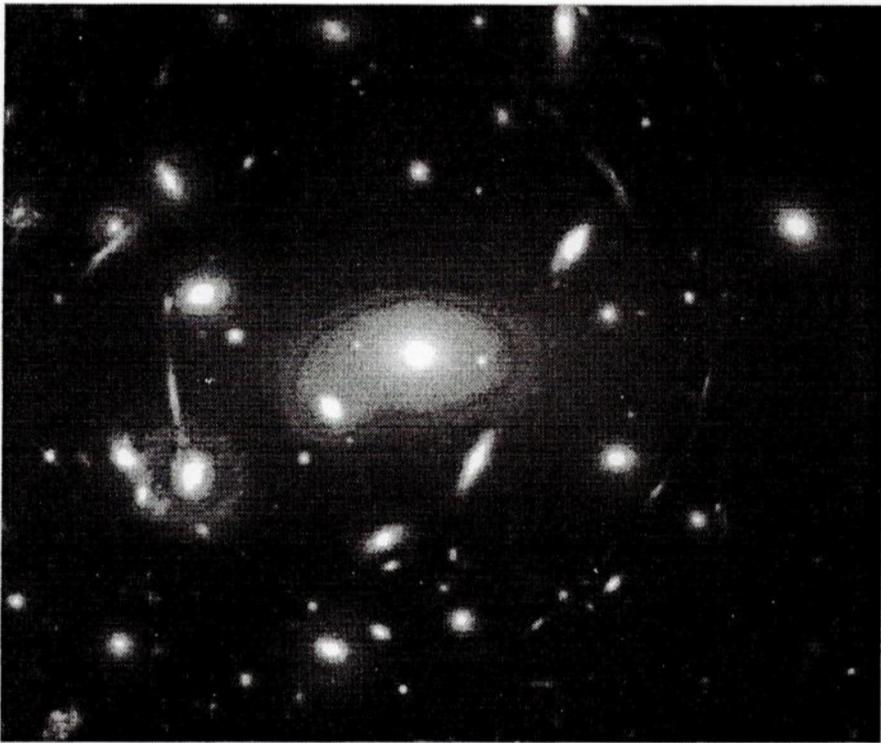
E/S0

S0

SB0



Elíptica Anã



Galáxia CD em aglomerado rico e regular