



UM ESTUDO DE GRUPOS COMPACTOS DE GALÁXIAS

por

Jorge Marcelino dos Santos Júnior

Projeto de Fim de Curso apresentado para cumprimento
parcial das exigências para o título de

Astrônomo

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

1997

Aprovada por Carlos Roberto Rabaça – ON/CNPq
Orientador

Heloisa Maria Boechat Roberty – OV/UFRJ

Encarnacion Amelia Martinez Machado – OV/UFRJ

Programa autorizado para
oferecer o título de Astrônomo

Data 7 de novembro de 1997

Quando um camaleão encontra outro, quem imita quem?

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais...

Ao Doutor Christopher N. A. Willmer, pelo apoio computacional e discussões.

À professora Encarnacion que, com sua grande amizade e otimismo, conseguiu incentivar-me a terminar o curso.

Ao professor Jorge, ao qual devo grande parte de minha formação pessoal.

Às grandes amizades que fiz durante o curso; em especial, Jonatas Ayumi Suzuki, César Augusto Caretta, Hélio Jacques Rocha-Pinto, Gianlorenzo Santarosa, Gabriel Hickel, José Maurício, Alexandre Cherman, Luciana Pompéia, Sandro Mendes, entre outros.

A todos aqueles que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar onde estou hoje.

ÍNDICE ANALÍTICO

<i>Título</i>	<i>Página</i>
Resumo	ii
Abstract	iii
1. Introdução	1
2. Propriedades de Grupos Compactos de Galáxias	
2.1. Amostras	3
2.2. Propriedades Estatísticas	6
2.2.1. Elípticas como Subproduto da Fusão de Grupos Compactos	7
2.2.2. Função de Luminosidade	8
2.3. Grupos Compactos como Alinhamentos	10
2.4. Ambiente dos Grupos Compactos	12
3. Função de Correlação de Dois Pontos	
3.1. Estatística Descritiva	15
3.2. Estimador da Função de Correlação	18
3.2.1. Gerador de Amostras Aleatórias	19
3.2.2. Estimativa de Erros Através de <i>Bootstrap</i>	20
4. Amostra	
4.1. Critério de Seleção	22
4.2. Efeito de Seleção	26
5. Resultados	29
6. Discussão e Conclusões	33
7. Bibliografia	38

RESUMO

Neste trabalho, apresentamos um sumário de conceitos envolvendo grupos compactos de galáxias, uma classe de objetos que tem atraído recentemente bastante atenção da comunidade científica. Peculiaridades cinemáticas e morfológicas são comumente encontradas nas galáxias em grupos compactos, o que os tornam excelentes laboratórios para os estudos de interações gravitacionais. Além disso, as propriedades de aglomeração destes objetos podem fornecer informação sobre a estrutura em grande escala no Universo. Utilizando o catálogo de grupos compactos de Barton et al. (1996, RSCG), definido a partir dos catálogos do CfA2 (Geller e Huchra, 1989) e SSRS2 (da Costa et al. 1994) usando um critério de seleção que envolve o desvio para o vermelho das linhas espectrais, calculamos a função de correlação espacial de dois pontos entre os grupos. A correlação foi ajustada através de uma lei de potência $\xi(r) = (r/r_0)^\gamma$, onde os resultados, obtidos separadamente para os Hemisférios Norte e Sul, indicam que $r_0 \approx 18 h^{-1}$ Mpc e $\gamma \approx -2,7$. Entretanto, o valor íngreme derivado para γ está relacionado à presença de subestruturas na amostra de galáxias de onde os grupos foram extraídos, e não indicam uma característica de aglutinação real dos mesmos. Forçando-se $\gamma = -2,0$, valor mais próximo à relação canônica encontrada para galáxias, a escala de comprimento da correlação é de $r_0 \approx 16 h^{-1}$ Mpc. A função de correlação de grupos compactos segue, portanto, a mesma tendência observada para as galáxias no CfA2 e SSRS2, com uma amplitude maior, indicativa de uma escala de aglutinação semelhante a de aglomerados de galáxias.

ABSTRACT

In this work, we present a review of compact groups of galaxies, a class of objects that has been attracting much attention of the scientific community. Peculiarities in the kinematics and morphology are frequently found in these groups, placing them as preferred laboratories for the study of gravitational interactions. Moreover, the clustering properties of these objects can provide information about the large-scale structure of the Universe. We derived the spatial two-point correlation function for compact groups using Barton's catalog (1996, RSCG), selected in redshift space from the CfA2 (Geller e Huchra 1989) and SSRS2 (da Costa et al. 1994). We fitted the correlation with a power law $\xi(r) = (r/r_0)^\gamma$. The results obtained separately for the southern and northern hemispheres gave $r_0 \approx 18 h^{-1} \text{ Mpc}$ and $\gamma \approx -2.7$. However, the steep value derived for γ is related to the similarity between the size of the structures present in the galaxy catalogs and the size of the catalogs themselves, instead of representing a true aggregation characteristic of compact groups. If we set $\gamma = -2.0$, similar to the canonical value found for field galaxies, the correlation length becomes $r_0 \approx 16 h^{-1} \text{ Mpc}$. The correlation function for compact groups follows that of the CfA and SSRS2 galaxies, with larger amplitude, indicating an aggregation scale similar to that of clusters.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Grupos compactos são definidos como agregados de 4 a 10 galáxias, com uma separação média entre elas comparável aos seus diâmetros. Dos sistemas de galáxias atualmente conhecidos, os grupos compactos estão entre os mais densos, apresentando uma densidade espacial da ordem de $10^4 h^3 \text{ Mpc}^{-3}$ [†], isto é, comparável ao núcleo de aglomerados. Uma de suas principais características está na baixa dispersão de velocidades entre as galáxias-membros. Portanto, as galáxias em grupos compactos devem apresentar altíssimos níveis de interação, colocando esses sistemas entre os principais laboratórios para o estudo dos efeitos ambientais sobre as propriedades intrínsecas das galáxias.

O *crossing time* (intervalo de tempo que uma partícula-teste leva para cruzar um sistema de um extremo ao outro) é comumente utilizado em estudos dinâmicos para estimar o tempo de vida de sistemas de galáxias. Em sistemas de poucos corpos, a fricção dinâmica é responsável pela coalescência das galáxias em apenas alguns *crossing times* – em grupos de galáxias esse valor é $t_{\sigma} \lesssim 0.02 H_0^{-1}$. Fica difícil, portanto, entender como os grupos compactos possam ser observados ainda hoje, caso esses sistemas sejam primordiais.

Existem evidências observacionais de que os grupos compactos estão localizados em regiões de grupos esparsos (*loose groups*; Rose 1977; Sulentic 1987; Rubin et al. 1991). Segundo Maia et al. (1989), os grupos esparsos apresentam densidade típica de $6,4 h^3 \text{ Mpc}^{-3}$, isto é, o contraste de densidade em relação ao campo é muito menor que o dos grupos compactos e, portanto, são muito mais

[†] h é a constante de Hubble, medida em unidades de $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

difíceis de serem definidos. Estudos recentes que levam em conta medidas do *redshift* (o desvio para o vermelho das linhas espectrais) apontam para o fato de que 66% dos grupos compactos de galáxias definidos por Hickson (através de critérios de seleção superficiais, isto é, sem informação de *redshift*) estão envoltos em sistemas mais ricos, isto é, com mais galáxias (Ramella et al. 1993, Diaferio et al. 1994). Isto nos leva a supor que os grupos compactos não sejam sistemas atípicos no Universo, podendo ter sido formados e destruídos em diferentes épocas, e que, portanto, fornecem também informação sobre a formação de estruturas em grande escala no Universo.

Por este ser um projeto de fim de curso e não constituir um estágio mais avançado de pesquisa, nossa proposta inicial de trabalho foi a de resumir algumas das propriedades de grupos compactos, que são apresentadas no Capítulo 2. Pretendemos, também, tirar vantagem da disponibilidade de dados de uma amostra de grupos compactos de galáxias recentemente definida (Barton et al. 1996) para estudar a estrutura em grande escala formada por esses grupos, através da determinação da função de correlação espacial. No Capítulo 3, portanto, descrevemos o método envolvido no cálculo da função de correlação espacial de dois pontos $[\xi(r)]$, e o estimador por nós utilizado. Este estimador, proposto por Hamilton (1993), tem a vantagem de não ser influenciado por erros na estimativa da densidade média dos grupos. No Capítulo 4, apresentamos a amostra selecionada e, no Capítulo 5 os resultados. Por fim, no Capítulo 6, realizamos uma comparação dos nossos resultados com valores derivados para outros sistemas, de diferentes densidades: galáxias, grupos esparsos e aglomerados de galáxias, que podem ser encontrados na literatura.

Capítulo 2

PROPRIEDADES DE GRUPOS COMPACTOS DE GALÁXIAS

1 Amostras

Os grupos de galáxias aparecem na literatura astronômica desde o século passado. Em 1877, M.E. Stephan descobriu o primeiro grupo compacto; este ficou conhecido como “Quinteto de Stephan”. A partir de então, diversos catálogos de grupos foram definidos, como, por exemplo, o *Atlas of Interacting Galaxies* (Vorontsov-Vel’yaminov, 1959, 1977), o *Atlas of Peculiar Galaxies* (Arp 1966) e os catálogos publicados por Shakhbazyan (1957, 1973, 1978).

Rose, em 1977, analisando 69 placas fotográficas do *Palomar Observatory Sky Survey* (POSS) e 23 placas obtidas por Yale-Columbia, encontrou 170 tripletos, 33 quartetos e 2 quintetos de galáxias. Os dois critérios de seleção usados foram

$$n \geq 3 \quad \text{com} \quad m \leq 17,5$$

$$\sigma_f A_g \leq 0.0035,$$

onde n é o número de membros do grupo; m é a magnitude estimada; σ_f é a densidade superficial média para o campo de galáxias; e A_g é a área do céu coberta pelo grupo (a área típica de um grupo é menor que 1 arcmin^2 [minuto de arco quadrado]). A principal conclusão de Rose foi a de que dentro de 5 vezes o raio de um grupo, os grupos compactos apresentavam apenas de duas a três galáxias adicionais com magnitude semelhante as suas galáxias; o que sugeriu a

Rose que grupos compactos fossem apenas configurações transientes no interior de “grupos esparsos”.

Através da inspeção visual de placas fotográficas do POSS que cobriam aproximadamente 67% do céu no filtro vermelho (banda R de Johnson), Hickson, em 1982, realizou um estudo sistemático de grupos compactos, definindo os assim chamados *Hickson's Compact Groups* (HCGs). Ele utilizou três critérios de seleção para definir grupos de quatro ou mais membros com grande contraste de densidade superficial em relação às suas vizinhanças:

$$m_f \leq m_B + 3$$

$$R_N \geq 3 R_G$$

$$\bar{\mu}_G < 26 \text{ mag arcsec}^{-2},$$

onde m_f e m_B são as magnitudes dos membros do grupo de menor e maior brilho, respectivamente; R_G é o raio do menor círculo contendo todos os membros do grupo; $\bar{\mu}_G$ é o brilho superficial médio contido dentro deste círculo; e R_N é a distância do centro do círculo até a galáxia mais próxima que não faz parte do grupo e satisfaz o critério de magnitude. Estes critérios são conhecidos também, respectivamente, como concordância de magnitude, isolamento e compactação.

Exatamente 100 grupos satisfizeram os critérios de seleção, sendo 60 quartetos, 25 quintetos, 8 sextetos, 6 septetos e 1 octeto de galáxias. Alguns já eram previamente conhecidos, enquanto outros não. Por exemplo, o grupo 79 de Hickson já era conhecido por *Sexteto de Seyfert*, em honra ao seu descobridor original.

Posteriormente, espectros ópticos e *redshifts* foram obtidos para todas as galáxias (Hickson et al. 1984; Tikhonov 1986; Hickson et al. 1988; Hickson et al.

1992), assim como foram feitos diversos levantamentos detalhados das vizinhanças dos grupos compactos (Sulentic 1987; Rood and Williams 1989; Palumbo et al. 1995; de Carvalho 1997).

Prandoni et al. em 1994 apresentaram uma nova amostra de grupos compactos, definida a partir de placas obtidas no United Kingdom Schmidt Telescope (UKST), de qualidade superior as placas do POSS. Os 59 novos grupos encontrados, cobrindo uma área de aproximadamente 1300 graus quadrados, formam um catálogo completo para magnitudes $b_j \lesssim 15,2$ e possuem a vantagem de terem sido selecionados através de algoritmos numéricos (que imitam os mesmos critérios de seleção visual de Hickson, à exceção do critério de compactação, onde foi utilizado $\mu_G < 27,7 \text{ mag arcsec}^{-2}$, devido ao uso do filtro b_j) e, portanto, estão livres de qualquer erro subjetivo. Este catálogo encontra-se publicado em caráter preliminar, sem que tenham sido distribuídas informações adicionais sobre as galáxias individuais (por exemplo, suas coordenadas equatoriais). Além disso, apenas alguns desses grupos já possuem *redshift* determinado. As principais características já definidas para esses grupos (Prandoni et al. 1994) são: a confirmação da concordância morfológica das galáxias membro dentro de cada grupo compacto e o alto contraste de densidade em relação às galáxias de fundo do campo.

Barton et al. (1996) realizaram a primeira busca sistemática por grupos compactos de galáxias a partir de critérios que levavam em conta o *redshift* das galáxias (critérios espaciais). O catálogo do *Redshift Survey Compact Groups* (RSCG) inclui 89 grupos. A grande vantagem deste catálogo está no fato de que, devido à forma em que foi definido, nenhum grupo possui galáxias com *redshift* discordante dos outros membros do grupo. Critérios de seleção superficiais, como os usados por Hickson, podem facilmente incluir tais galáxias. Devido à natureza distinta dos critérios utilizados por Barton et al., não foi possível reproduzir totalmente os

critérios de seleção utilizados por Hickson (1982). Entretanto, as propriedades das galáxias nos RSCGs são semelhantes as das galáxias nos HCGs (Barton et al. 1996). Este catálogo será apresentado posteriormente em maior detalhe, uma vez que a partir dele será definida a amostra utilizada em nosso estudo da função de correlação de dois pontos.

2 Propriedades Estatísticas

A maior parte dos estudos sistemáticos de grupos compactos de galáxias foi realizada nos HCGs, tornando-o o catálogo mais bem estudado no que se refere à grupos compactos e, portanto, na principal fonte de informação sobre as propriedades físicas e estatísticas destes sistemas, e como eles se correlacionam a outras estruturas em grande escala.

Hickson, Kindl e Hucra (1988) apresentaram um estudo da morfologia de galáxias nos HCGs, de onde puderam obter importantes informações: 1) A evidência de uma concordância morfológica entre as galáxias de um mesmo grupo, ou seja, a tendência de galáxias de um grupo a apresentar o mesmo tipo morfológico é maior que para uma amostra aleatória. 2) A existência de uma forte correlação entre a dispersão de velocidade do grupo e o tipo morfológico das galáxias, de forma que quanto maior a dispersão, menor é o número de galáxias elípticas compondo o grupo. Isso é o oposto do esperado, pois encontros com baixas velocidades são mais eficientes para o processo de coalescência (*merger*). 3) Aproximadamente 49% das galáxias nos grupos compactos são espirais, sendo de 48% a fração das galáxias espirais mais brilhantes nos grupos. Uma vez que as galáxias mais brilhantes são as mais fortes candidatas a serem os produtos de coalescência, devido à grande formação de estrelas provocada durante o processo, esperava-se que a fração de galáxias espirais entre as galáxias mais brilhantes do grupo fosse menor do que a encontrada. Com esses resultados, concluiu-se que as

influências ambientais na época de formação do grupo devem ser fatores mais importantes sobre a estrutura de suas galáxias-membros do que efeitos provocados pela evolução dinâmica destas.

Hickson (1989) observou que muitas galáxias em grupos compactos estão interagindo, tendo estimado grosseiramente que 33% das galáxias nos HCGs apresentam, opticamente, sinais evidentes de interação gravitacional, tais como, por exemplo, distorções provocadas por efeitos de maré, caudas, etc. A partir de imagens de maior qualidade obtidas com CCD, Mendes de Oliveira e Hickson (1994) estimaram que 43% das galáxias da amostra exibiam distorções morfológicas e/ou cinemática, indicando-as como decorrente de interações gravitacionais.

Hickson et al. (1992) apresentaram dados finais para os *redshifts* das galáxias e verificaram que os HCGs possuem um desvio médio para o vermelho em suas linhas espectrais da ordem de $\sim 9000 \text{ km s}^{-1}$. A luminosidade galáctica média é de $2 \times 10^{10} b^2$ vezes a luminosidade solar. Galáxias dentro de cada grupo apresentam similaridades em suas luminosidades (embora essa similaridade possa ser o resultado do efeito de seleção da amostra), uma separação projetada de $39 b^1 \text{ kpc}$, dispersão de velocidade média de 207 km s^{-1} e uma relação massa-luminosidade (M/L) de $40 b$ vezes a solar.

2.1 Elípticas como Subproduto da Fusão de Grupos Compactos

Experimentos numéricos (Barnes 1985, Barnes 1989, Governato, Bhatia e Chicarini 1991) demonstram que as galáxias em sistemas próximos, tais como pares e grupos, interagem gravitacionalmente entre si, em uma escala de tempo comparável ao seu período orbital (White 1990), e ocasionalmente coalescem. Pode ser observado ainda que o resultado dessas interações são sistemas com

características físicas e morfológicas semelhantes às das galáxias elípticas observadas.

Segundo Toomre e Toomre (1972), a interação gravitacional e a coalescência podem desempenhar um papel importante na definição da morfologia das galáxias. Naquele trabalho, é proposto que todas as galáxias nasceriam como sistemas de disco, e a interação gravitacional e o processo de coalescência seriam os responsáveis, então, pelo aparecimento de sistemas esferoidais.

Rubin et al. (1991) observaram que, em grupos compactos, a fração de galáxias elípticas e SOs com gás nuclear é de 100%. Ainda segundo Rubin et al., morfológicamente, muitas das galáxias elípticas e SOs aparecem em regiões difíceis de serem separadas de acordo com suas peculiaridades individuais. Porém, a observação mais notável é a de que muitas destas galáxias apresentam formas normais: as peculiaridades (tais como, luminosidade fraca e extensa envolvendo vizinhos próximos no grupo, eixo maior da elipse de ajuste do contorno isofotal e elipcidade da galáxia que variam lentamente ou descontinuamente com o raio, contornos isofotais que se tornam mais “quadrados” com o aumento do raio, jatos, anéis e conchas) só podem ser observadas nas regiões externas das galáxias. Essas morfologias complexas e a presença de gás no núcleo parecem ser evidência de que as galáxias elípticas teriam adquirido gás, que move-se juntamente com o núcleo, e estrelas, devido à captura gravitacional. Rubin et al. ressaltam também o fato de que as estruturas observadas devam ser instáveis, de curto tempo de vida e comum em grupos compactos.

2.2 Função de Luminosidade

A função de luminosidade (FL) representa uma fonte alternativa de informação acerca dos grupos compactos. Pelo menos duas questões podem ser

formuladas: 1) A função de luminosidade de grupos compactos difere das funções de luminosidade de galáxias em outros ambientes? 2) A densidade de luminosidade das galáxias elípticas do campo é remanescente de coalescências?

Usando uma amostra de 68 HCGs com pelo menos 4 galáxias com velocidades radiais dentro do intervalo de 1000 km s^{-1} da velocidade radial média do grupo, Mendes de Oliveira e Hickson (1991) derivaram a função de luminosidade óptica (FLO) dos HCGs a partir de simulações de Monte Carlo. Eles tentavam, assim, evitar os possíveis efeitos de “erros sistemáticos” provocados pelos critérios de seleção introduzidos por Hickson nos HCGs. O melhor ajuste de uma função de Schechter

$$\Phi(L)dL = \Phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*} \right) d\left(\frac{L}{L^*} \right)$$

onde $\Phi(L)$ é o número de galáxias com luminosidade L até $L+dL$, aos dados da distribuição de luminosidade dos grupos simulados apresentou um parâmetro $\alpha \approx -0,2$. Este valor é mais positivo que aqueles obtidos para funções de luminosidade de galáxias de campo, de grupos esparsos e de aglomerados ricos de galáxias. Mendes de Oliveira e Hickson chegaram, por conseguinte, à conclusão de que os grupos compactos apresentam uma deficiência de galáxias de baixa luminosidade intrínseca (galáxias anãs) e contêm apenas algo em torno de 0,8% da densidade de luminosidade de galáxias no universo.

Sulentic e Rabaça (1994) utilizando uma amostra definida de forma semelhante à anterior, derivaram os parâmetros de Schechter para os HCGs a partir dos dados reais, maximizando o número de galáxias de baixa luminosidade intrínseca ao estabelecer uma magnitude aparente limite para o cálculo da FLO a partir das magnitudes integradas dos grupos e não das galáxias individuais. Os valores obtidos para os diferentes tipos espectrais foram muito mais próximos do

valor canônico para galáxias de campo, $\alpha \approx -1$. Ribeiro et al. (1994) tentaram evitar os “erros sistemáticos” provocados pelos critérios de seleção de Hickson obtendo fotometria profunda para uma subamostra dos HCG, de forma a incluir explicitamente galáxias mais fracas. A FL derivada por eles também apresenta valor próximo ao campo, mas muitos dos *redshifts* desses objetos fracos ainda não foram determinados. Aplicando esses resultados à densidade de luminosidade de galáxias, obtêm-se que a contribuição dos grupos é de aproximadamente 3%.

Sulentic e Rabaça (1994) observaram também que galáxias *early-type* no campo próximo não podem ser vistas como o resultado final da fusão de grupos compactos. As galáxias geradas a partir da soma das luminosidades das galáxias-membros dos grupos produziriam uma FLO muito mais brilhante que a derivada para galáxias elípticas isoladas.

Hickson et al. (1989) realizaram também estudos baseados nos dados do IRAS e concluíram que a emissão no infravermelho das galáxias nos HCGs é superior por um fator de dois a de galáxias isoladas, o que pode ser considerado como provocado pela produção de estrelas devido a interações entre os componentes do grupo. de Mello Rabaça e Sulentic (1993) concluíram, entretanto, que o excesso de emissão no infravermelho dos HCGs foi superestimado. Isto se deveu principalmente à resolução limitada do IRAS que, após uma correção estimada, apresentou uma evidência menor do aumento na emissão no infravermelho.

3 Grupos Compactos como Alinhamentos

Considerando que o único mecanismo físico a atuar em um grupo compacto seja a gravitação clássica, isto é, a atração gravitacional direta entre as galáxias e entre as galáxias e a matéria intergaláctica (IGB), a fricção dinâmica das galáxias

contra a IGB e contra as estrelas de outras galáxias, processos de maré e o processo de coalescência, Mamon (1990) propôs uma expressão simples para o cálculo do tempo de coalescência das galáxias em um grupo compacto:

$$t_m = \left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{R_h^3}{GM} \right)^{1/2}$$

onde R_h é o raio ocupado pela massa média M do grupo em máxima expansão, ou seja, R_h é a metade do raio da massa média do grupo virializado. Qualitativamente, o principal resultado, após a substituição dos valores médios para os grupos na expressão acima, é que o pequeno tempo de coalescência entre as galáxias levaria a um curto período de existência do grupo compacto. Os grupos como um todo não deveriam, portanto, existir, se tivessem idade próxima ao tempo de Hubble. Esse resultado levou Mamon a propor que os grupos compactos observados não fossem sistemas físicos, mas sim configurações transientes em grupos esparsos.

Hernquist, Katz e Weinberg (1995) sugeriram ainda que muitos grupos compactos observados poderiam ser projeções de galáxias separadas ao longo da linha de visada. Diferentemente da proposta de Mamon, esta hipótese não requer que os grupos compactos sejam membros de grupos esparsos.

A probabilidade de galáxias fisicamente separadas projetarem grupos compactos aparentes não deve ser ignorada, se a distribuição em grande escala das galáxias for filamentar (Hernquist, Katz e Weinberg 1995). Diaferio et al. (1994) concluíram que associações de galáxias aparecem naturalmente em modelos onde grupos compactos são formados dentro de grupos esparsos. Mas aparecem naturalmente também em modelos de estruturas filamentos por duas razões: 1) as partes externas do filamento podem projetar grupos esparsos, 2) grupos reais tendem a formar-se na interseções dos filamentos.

4 O Ambiente dos Grupos Compactos

Estariam realmente os HCGs sofrendo interações gravitacionais ou seriam apenas produtos de alinhamentos? Os critérios de seleção de Hickson não seriam tendenciosos? Perguntas como estas são encontradas em vários artigos publicados sobre os HCGs. O que se pode afirmar com certeza sobre o estado dinâmico dos grupos compactos é que ainda existem controvérsias. Entretanto, a concordância entre os desvios medidos nas linhas espectrais de muitas das galáxias em um grupo compacto nos levam a julgar, pelo menos em princípio, que as galáxias nestes sistemas estejam fisicamente associadas e não sejam apenas o resultado de alinhamentos ao longo da linha de visada. Na Tabela 2.1 apresentamos as múltiplas configurações dos grupos compactos de Hickson (Rabaça, 1996).

Uma questão natural é se os grupos compactos realmente estão associados com grupos esparsos. Rood e Strumbe (1994) observaram que 70% dos HCGs estão localizados dentro dos limites de grupos esparsos e aglomerados catalogados. Estudos de distribuição de galáxias em *redshift* (Vennik et al. 1993, Sakai et al. 1994, Garcia 1995, Barton et al 1996) indicam que sub-condensações compactas ocorrem dentro de grupos esparsos e filamentos. Estes estudo mostram também que grupos compactos são traçadores de estruturas em grande escala, além de serem encontrados preferencialmente em ambientes de baixa densidade de matéria. Através de um estudo do campo de galáxias vizinhas aos HCGs, Ramella et al. (1994) chegaram à conclusão de que 76% dos grupos pertencem à grupos esparsos ricos que possuem propriedades físicas semelhantes aos próprios HCGs, ou seja, as configurações compactas seriam sistemas fisicamente conexos, formados continuamente durante o colapso de grupos esparsos ricos. As simulações numéricas de Ramella et al. (1994) sugerem também que, provavelmente, apenas 30% dos grupos compactos devem

apresentar remanescentes de coalescência. Se os remanescentes forem identificados com galáxias elípticas luminosas, a previsão parece concordar, grosseiramente, com as observações de Hickson et al. (1988) de que aproximadamente 49% das galáxias em grupos compactos são espirais.

Rubin et al. (1991) confirmaram através de observação a existência de uma deficiência de galáxias intrinsecamente fracas (de baixa luminosidade) em grupos compactos, quando comparados com agrupamentos ricos e galáxias de campo. Duas razões poderiam ser responsáveis este resultado: 1) em ambientes densos, como os grupos, as anãs seriam as primeiras a serem destruídas pelos encontros entre as galáxias, ou então 2) as condições de formação dos grupos compactos não teriam conduzido à formação de um grande número de galáxias anãs. Rubin et al. concluíram, então, que embora algumas galáxias anãs estejam presentes nos grupos compactos de Hickson, apenas um reduzido número de grupos deveria apresentar uma grande população de galáxias anãs.

Número de Membros	Uma ou Menos Galáxias Intrusas		Duas ou Mais Galáxias Intrusas		Comentários
	Tipo	N	Tipo	N	
Octeto	8	1			Grupos Verdadeiros
Septeto	7	3	4+3	1	
	6+1	1	4+2+1	1	
Sexteto	6	3	4+2	1	
	5+1	3	4+1+1	1	
Quinteto	5	15	3+2	2	Grupos Falsos
	4+1	6	3+1+1	2	
Quarteto	4	35	2+2	1	
	3+1	19	2+1+1	4	
			1+1+1+1	1	

Tabela 2.1 – Configurações dos grupos compactos de Hickson

Entretanto, a partir do estudo do campo ao redor de uma amostra de 22 HCGs localizados no Hemisfério Sul, com $v_z < 9000 \text{ km s}^{-1}$, de Carvalho, Ribeiro e Zepf (1994) chegaram a uma conclusão oposta: muitos dos grupos compactos parecem ser sistemas intermediários entre grupos muito compactos e grupos esparsos, no que se refere ao número de galáxias anãs presentes. Os autores encontraram, em média, 10 galáxias anãs até 3 ordens de magnitude menor que as galáxias-membros mais fracas dos grupos, ao redor de 30 arcmin do centro do grupo. Medidas recentes dos *redshifts* dessas galáxias anãs (de Carvalho et al. 1997) vieram a confirmar que muitas delas apresentam velocidade radial semelhante às dos grupos compactos. Os HCGs teriam assim um núcleo (*core*) compacto, sendo circundado por regiões mais esparsas de galáxias menos brilhantes. Os grupos compactos seriam, portanto, núcleos em colapso de “grupos esparsos”.

FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO DE DOIS PONTOS

1 Estatística Descritiva

Existem muitos métodos para estudar a distribuição de objetos, incluindo o teste do χ^2 , o teste do vizinho mais próximo, a análise de espectro de potência, a função de multiplicidade, etc.

O método que empregamos em nosso trabalho para estudar a distribuição espacial dos grupos compactos de galáxias é o estudo da função de correlação de dois pontos. A função de correlação mostra-se extremamente eficiente para a determinação de agrupamentos e para a caracterização do tamanho de grupos (Peebles 1980).

A função de correlação baseia-se no excesso de probabilidade de encontrar um objeto próximo a outro objeto; por este excesso entenda-se uma probabilidade maior que a correspondente probabilidade de uma amostra aleatoriamente distribuída em uma região de mesmo volume.

Introduziremos agora uma definição melhor para a função de correlação de dois pontos. Primeiramente, deve-se pensar na distribuição de matéria como uma distribuição de N objetos pontuais idênticos mas distinguíveis (gás de Boltzmann), ocupando um volume V .

Definimos inicialmente o número de objetos que ocupa, no tempo t , um elemento de volume dr^3 , e um elemento do espaço de velocidades dv^3 , como sendo

$$\int f(\vec{r}, \vec{v}, t) dr^3 dv^3.$$

Para fazer uma descrição mais rigorosa de $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$, precisamos considerar o espaço de 6 dimensões. Em um instante de tempo, o sistema de N objetos é representado por N pontos no espaço de 6 dimensões, onde $d\omega = dr^3 dv^3$ é o elemento de volume. Se contarmos o número de pontos neste elemento de volume, teremos, por definição, $f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\omega$. Se o tamanho deste elemento de volume for escolhido no intuito de conter um grande número de pontos e se a densidade destes pontos não variar rapidamente de um elemento para um outro elemento vizinho, então podemos considerar uma função contínua destes argumentos.

Se somarmos todos os elementos de volume deste 6-espaço, teremos, sendo f contínua:

$$\sum f(\vec{r}, \vec{v}, t) dr^3 dv^3 \approx \int f(\vec{r}, \vec{v}, t) dr^3 dv^3$$

Tendo definido a função de distribuição, nós podemos expressar:

$$\int f(\vec{r}, \vec{v}, t) dr^3 dv^3 = N$$

Temos também que, se as moléculas estão uniformemente distribuídos no espaço, a função f é independente de r ; portanto:

$$\int f(r, v, t) dr^3 = \frac{N}{V} \equiv n$$

onde n é a densidade média independente da posição, que pode ser entendida como a densidade média de todo o conjunto de dados. A probabilidade de encontrar um objeto em um volume infinitesimal é dada por:

$$dP = n dV$$

A função de correlação de dois pontos $\xi(r)$ é definida como a probabilidade conjunta de encontrar um objeto nos elementos de volume dV_1 e dV_2 , à separação r_{12} :

$$dP = n^2 dV_1 dV_2 [1 + \xi(r)]$$

O princípio cosmológico requer isotropia e homogeneidade e, portanto, $\xi(r)$ é uma função apenas da separação entre os pontos.

Em uma distribuição discreta de Poisson, as probabilidades de encontrar objetos em diferentes volumes são independentes, fazendo com que $\xi(r) = 0$. A partir deste dado temos para uma distribuição uniforme:

$$dP = n^2 dV_1 dV_2,$$

com os objetos estando correlacionados para o caso de $1 \geq \xi(r) > 0$ e anti-correlacionados para o caso de $-1 \leq \xi(r) < 0$.

Como a probabilidade de encontrar um objeto em dV_1 é igual a $n dV_1$, a probabilidade condicional de encontrar um objeto em dV_2 , dado que temos um objeto em dV_1 , é:

$$dP(2|1) = n dV_2 [1 + \xi(r_{12})]$$

Dito de outra forma, se um objeto é escolhido aleatoriamente de uma amostra, a probabilidade de encontrar um vizinho à uma distância r em dV é:

$$dP = n dV[1 + \xi(r)]$$

O número médio de vizinhos à distância r do objeto escolhido aleatoriamente será a integral volumétrica da função anterior:

$$N = \frac{4}{3}\pi r^3 + n \int \xi(r) dV$$

A integral da equação acima para todo o r nos fornece o número total de vizinhos em excesso do aleatório. Se a integral converge, N é uma medida do número médio de objetos por agrupamento:

$$N - 1 = n \int \xi(r) dV.$$

Se o número de objetos por agrupamento for uma variável aleatória, a probabilidade de escolher um objeto de um agrupamento com N objetos é:

$$\langle N(N-1) \rangle / N = n \int \xi(r) dV ,$$

onde a média é sobre a abundância do agrupamento no espaço.

2 Estimador da Função de Correlação de Dois Pontos

O estimador comumente utilizado para a função de correlação de dois pontos apresentado por Peebles (1980) é

$$\xi(r) = \frac{N_A}{N_D} \frac{DD(r)}{AA(r)} - 1,$$

onde $DD(r)$ é o número de pares de grupos na amostra de dados com separação entre $(r, r+dr)$; $AA(r)$ é o número de pares de grupos na amostra aleatória de controle com separação no mesmo intervalo; e N_D e N_A são o número total de pontos nas amostra de dados e na amostra aleatória, respectivamente. Este estimador apresenta uma incerteza associada, devido a sua dependência em primeira ordem à incerteza da densidade média de objetos na amostra de dados.

Neste trabalho utilizaremos o estimador proposto por Hamilton (1993)

$$\xi(r) = \frac{4 DD(r) AA(r)}{DA(r)^2} - 1,$$

onde $DA(r)$ é o número de pares com um grupo na amostra real de dados e um grupo na amostra aleatória de controle com separação no intervalo $(r, r+dr)$. O fator numérico 4 aparece devido ao fato de estarmos contando cada par $DD(r)$ e $AA(r)$ apenas uma vez. Este estimador tem a vantagem de sua dependência na incerteza da densidade média ser de segunda ordem, o que possibilita uma maior precisão na medida em todas as escalas. Particularmente em grandes escalas, onde a função de covariância é pequena.

2.1 Gerador de Amostras aleatórias

Para aplicar o estimador de Hamilton, escrevemos um programa que gera 100 amostras aleatórias, de 100 grupos cada. Os intervalos de ascensão reta e declinação para as amostras aleatórias são os mesmos da amostra real de dados. As coordenadas equatoriais são transformadas em coordenadas galácticas, onde os grupos aleatórios são submetidos a um critério de seleção que segue a probabilidade de seleção dos grupos da amostra real, definida a partir do ajuste da densidade superficial de grupos $n_D(b)$ segundo:

$$n_D(b) = n_0 P(b), \quad \text{onde } P(b) = 10^{\lfloor \text{const} (1 - \csc(b)) \rfloor},$$

n_0 é a densidade superficial no pólo, em grupos rad^2 ; e const é o coeficiente de extinção galáctica. Para cada grupo aleatório, um número randômico é gerado entre 0 e 1 e, caso seu valor seja inferior a $P(b)$, este ponto é descartado e um novo grupo gerado dentro do intervalo de coordenadas equatoriais de interesse.

A velocidade de cada ponto aleatório é gerada a partir da convolução da velocidade média de um grupo compacto real, aleatoriamente escolhido, com uma gaussiana de 2000 km s^{-1} de largura. Esse valor é estabelecido arbitrariamente, de forma a não ser alto demais para destruir a forma original da distribuição real de velocidades radiais, nem baixo demais de forma a limitar nossa amostra às velocidades originais.

Os números de pares são determinados em intervalos de distância equiespaçados em escala logarítmica ($d\log(r) = 0,1$). O valor da função de correlação é estabelecido a partir do valor médio de $\xi(r)$ obtido para as 100 amostras aleatórias.

2.2 Estimativa de Erros Através de *Bootstrap*

Uma análise de *bootstrap* é realizada para determinar a incerteza associada a cada estimativa da função de correlação no intervalo entre r e $r+dr$. O método utilizado é o mesmo apresentado por Ling, Frenk e Barrow (1986). É gerado um conjunto de 50 catálogos de *bootstrap*, cada qual do mesmo tamanho da amostra real, utilizando o seguinte procedimento: um ponto é retirado aleatoriamente da amostra real como o primeiro valor para formar um catálogo de *bootstrap*. Subseqüentemente, novos pontos são retirados aleatoriamente do catálogo de pontos reais e incluídos no catálogo de *bootstrap*, até que este contenha o mesmo

número de pontos do catálogo real. Alguns dos pontos do catálogo real irão aparecer mais de uma vez em um mesmo catálogo de *bootstrap* e possivelmente existirão pontos que não aparecerão em nenhum deles.

O resultado é que, a cada distância r , é produzido um conjunto de estimativas da função de correlação $\xi(r)$, a partir dos catálogos de *bootstrap*, distribuídas como uma normal. A incerteza na medida da função de correlação é, então, determinada pela raiz quadrada da variância em torno da média.

Capítulo 4

AMOSTRA

1 Critérios de Seleção

Neste trabalho utilizamos uma amostra de 89 grupos compactos definidos por Barton et al. (RSCGs; 1996), selecionados a partir dos levantamentos de *redshifts* do CfA2 (Geller e Huchra 1989) e SSRS2 (da Costa et al. 1989). Ambos estudos possuem magnitude limite $m_{B_0} \leq 15.5$, onde foram utilizadas apenas as galáxias dentro da faixa de cz entre 300 km s^{-1} e 15000 km s^{-1} .

O critério utilizado para determinar se duas galáxias pertencem a um grupo envolve dois fatores: 1) sua separação angular projetada ΔD e 2) a diferença de velocidade na linha de visada, ΔV . A separação angular dos pares foi dada por:

$$\Delta D = 2 \left(\frac{v}{H_0} \right) \text{sen} \left(\frac{\Delta \theta}{2} \right)$$

onde $\Delta \theta$ é a separação angular no céu, e $v = cz$ é o desvio para o vermelho médio.

Para que as galáxias fossem consideradas vizinhas foi necessário que $\Delta D < D_0$ e $\Delta V < V_0$, onde D_0 e V_0 são os parâmetros que limitam a extensão física de um grupo compacto. O valor de D_0 adotado foi de 50 kpc; valor este estimado para os grupos compactos de Hickson. Nos grupos de Hickson, que também serviram como amostra de controle para a determinação de V_0 , a dispersão de velocidades radial média é de aproximadamente 200 km s^{-1} . Para a amostra de Barton, foi escolhido o valor de $V_0 = 1000 \text{ km s}^{-1}$. Porém, este valor

está dentro dos critérios adotados por Hickson, que rejeitam galáxias cujas velocidades diferem da velocidade média do grupo em quantidade superior à 1000 km s^{-1} (Hickson 1982). Por utilizar um critério de seleção baseado na distribuição do desvio para o vermelho, os critérios de seleção diretamente adotados por Hickson foram negligenciados.

Utilizando os critérios espaciais acima descritos, encontrou-se 89 grupos de três ou mais galáxias distribuídas assim: 50 no CfA2 norte, 23 no CfA2 sul e 16 grupos no SSRS2, resultando em um total de 39 grupos no Hemisfério Sul Galáctico. Um total de 15 RSCGs pertencem aos HCGs.

Comparando-se os catálogos de HCG e RSCG, os autores chegaram a algumas conclusões: os desvios para o vermelho médio dos grupos variam para cada amostra pesquisada, $\bar{z}=0.007$ para o CfA2 norte, $\bar{z}=0.017$ para o CfA2 sul e $\bar{z}=0.012$ para o SSRS2. Segundo os autores, isto se deve à presença de estruturas em grande escala. Comparando o desvio médio para os RSCGs ($\bar{z}_{RSCG} = 0.014$) e para os HCGs ($\bar{z}_{HCG} = 0.030$), nota-se que o primeiro valor é a metade do segundo, o que indica uma maior proximidade dos grupos no RSCG. Nas figuras 4.1 a 4.4 apresentamos a distribuição espacial dos grupos compactos de Barton em relação aos estudos de redshift realizados pelo CfA2 norte e Sul, e o SSRS2 em várias declinações. As propriedades físicas dos RSCGs tais como frequência de membros, dispersão de velocidades e densidade são similares aos dos HCGs.

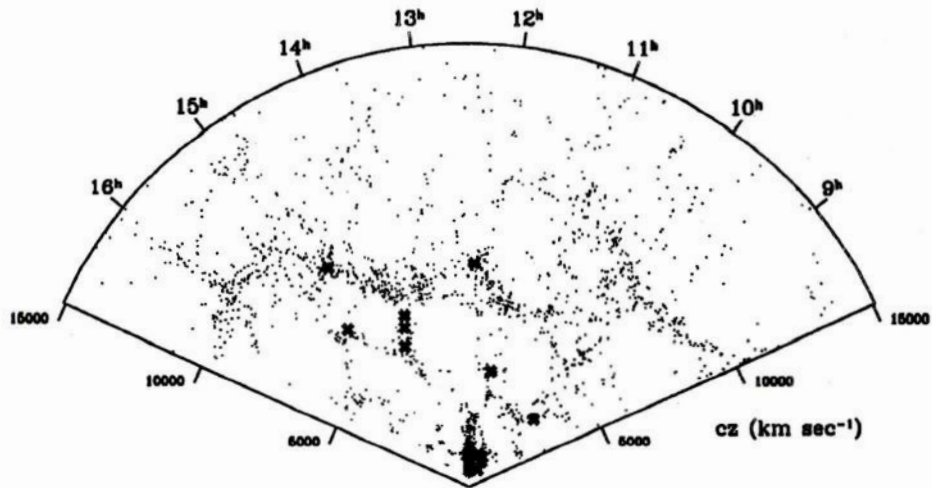


Figura 4.1 - Distribuição dos *redshifts* de galáxias (●) e RSCG (×) no estudo do CfA2 norte entre $8,5^\circ < \delta < 17,5^\circ$ (Barton et al. 1996).

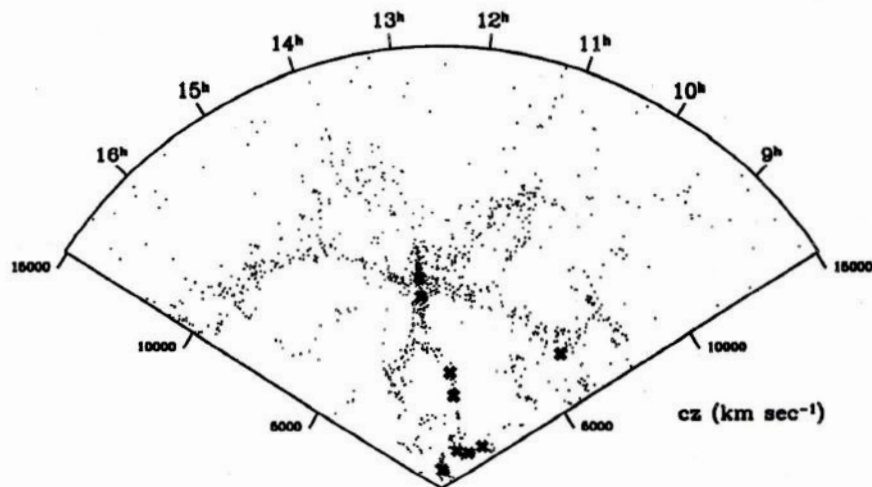


Figura 4.2 - Mesma distribuição que acima, para o estudo do CfA2 norte entre $26,5^\circ < \delta < 35,5^\circ$ (Barton et al. 1996).

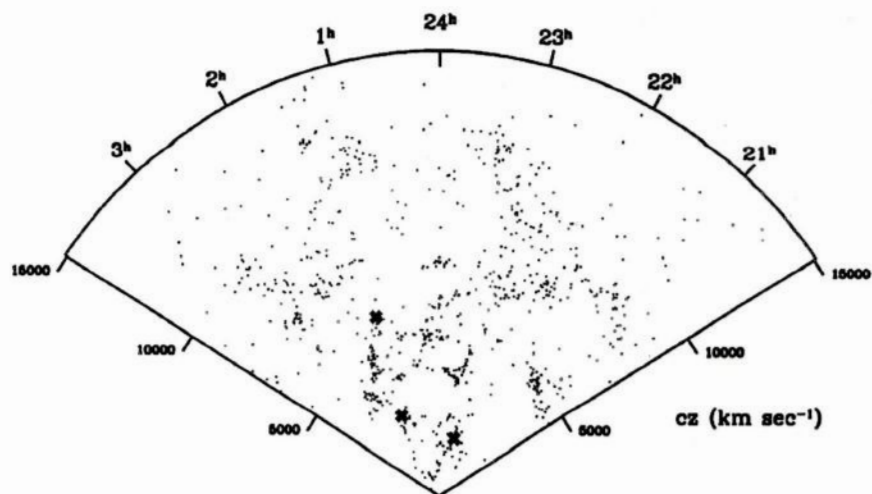


Figura 4.3 - Distribuição dos *redshifts* de galáxias (●) e RSCG (×) no estudo do CfA2 sul entre $10^\circ < \delta < 22^\circ$ (Barton et al. 1996).

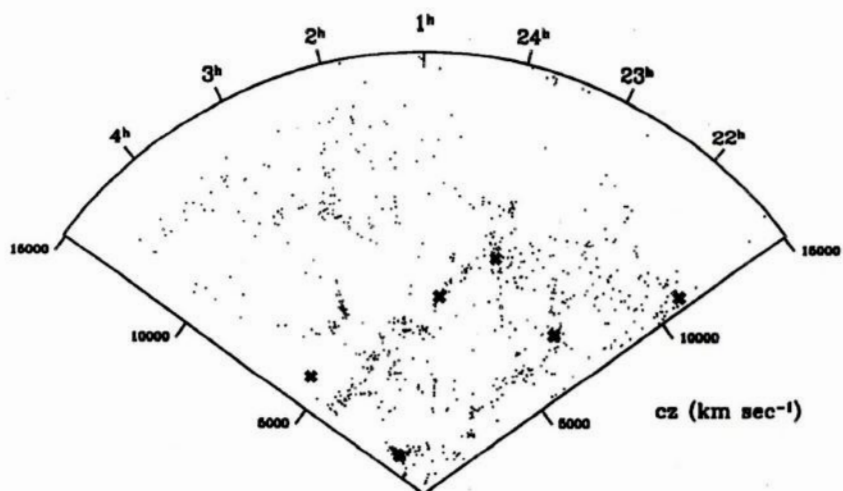


Figura 4.4 - Mesma distribuição que acima, para o estudo do SSRS2 entre $-30^\circ < \delta < -20^\circ$ (Barton et al. 1996).

O isolamento de um grupo compacto é grandemente influenciado pelo tamanho do grupo (fornecendo pouca informação sobre o ambiente onde se localiza o grupo), o que, como vimos anteriormente, parece ser de pouca relevância na história dinâmica destes sistemas. Muitos dos grupos selecionados

no RSCG estão contidos em ambientes densos e suas distribuições geralmente seguem as estruturas em grande escala observadas nos levantamentos de *redshifts*. A densidade média para os RSCG, quando incluídos apenas os grupos com $N \geq 4$ é de $3,8 \times 10^{-5} h^3 \text{ Mpc}^{-3}$, elevando-se para $1,41 \times 10^{-4} h^3 \text{ Mpc}^{-3}$ quando incluídos também os grupos com $N \geq 3$.

2 Efeito de seleção

No intuito de observar os efeitos da extinção galáctica em nossa amostra, examinamos a densidade superficial n_D dos grupos (grupos rad^{-2}) como função da latitude galáctica. Se a densidade espacial de grupos compactos for uniforme, uma relação da forma $\log n_D = 0,12 \text{ csc } |b| + \text{const}$ (Hickson et al. 1989) é esperada.

Foi realizado primeiramente uma divisão dos objetos para cada um dos Hemisférios galácticos, sendo encontrados 50 grupos compactos no Hemisfério Norte e 39 no Hemisfério Sul. Pode ser observado na figura 4.5 uma diferença na distribuição dos pontos nos dois hemisférios.

O ajuste de mínimos quadrados obtido para a densidade superficial é melhor definido para o Hemisfério Sul, e é dado por:

$$n_D = n_0 P(b) = 10,6 \times 10^{[0,249(1 - \text{csc}(b))]}.$$

Para o Hemisfério Norte foi utilizada a mesma expressão de probabilidade de seleção. Existe uma acentuada presença de grupos compactos em altas latitudes galácticas e uma escassez próximo ao plano galáctico no Hemisfério Norte. O excesso deve-se supostamente à grande presença de grupos em aglomerados próximos, como o de Fornax.

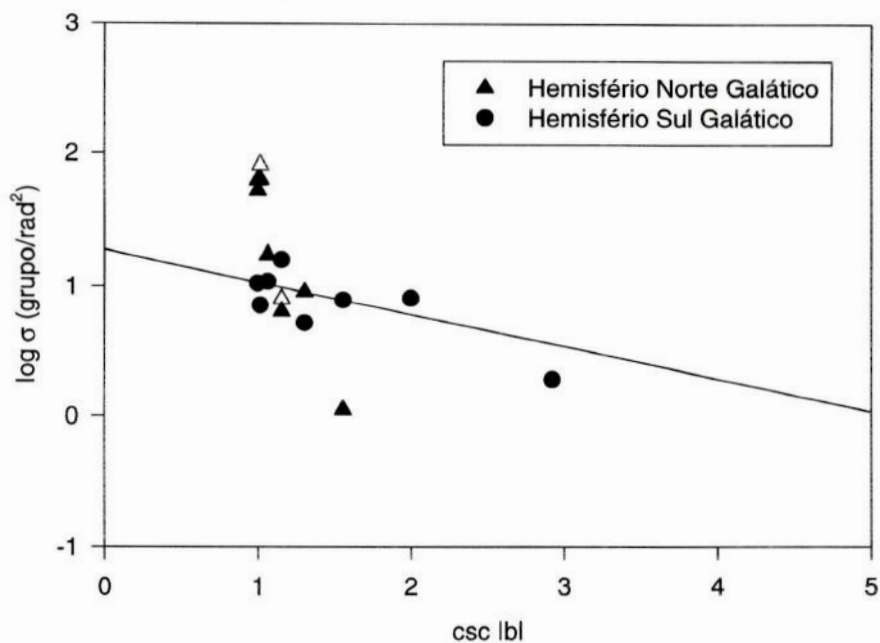


Figura 4.5 - Gráfico $\log \sigma$ x $\csc |b|$. A reta define o ajuste à densidade superficial de grupos, segundo a equação descrita no texto.

Fizemos também um histograma de frequência de velocidades radiais na tentativa de confirmar a distribuição irregular. Pode-se observar nos gráficos apresentados nas figuras 4.6 e 4.7 que existem, para latitudes maiores de 40° , dois grandes picos em velocidades inferiores à 2000 km s^{-1} , o que confirma a hipótese de que grupos próximos estariam forçando a curva de extinção galáctica a assumir valores maiores que o real. Ou seja, grupos próximos em altas latitudes estão menos sujeitos à extinção galáctica e por isso mais facilmente observados, introduzindo uma tendência na curva de extinção.

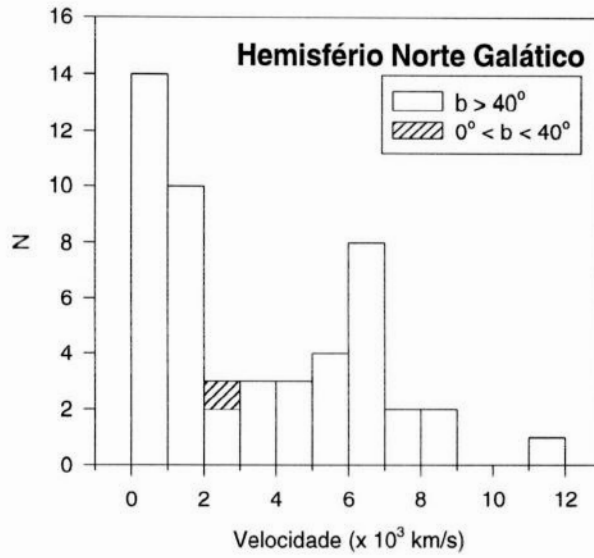


Figura 4.6 - Histograma de vels. radiais para o Hemisfério Norte Galáctico.

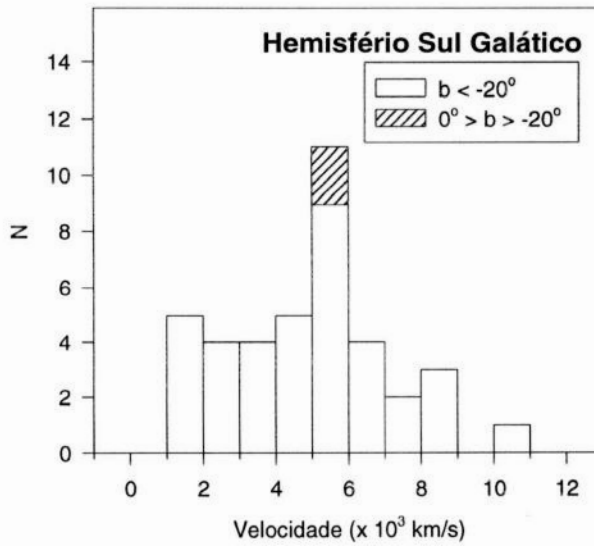


Figura 4.7 - Histograma de vels. radiais para o Hemisfério Sul Galáctico.

Capítulo 5

RESULTADOS

Apresentamos a seguir os resultados do cálculo da função de correlação de dois pontos para os dois hemisférios utilizando o estimador proposto por Hamilton (1993). Para minimizar possíveis erros de interpretação na função de correlação, excluímos de nossa amostra todos os grupos que possuíam velocidades radiais inferiores à 600 km s^{-1} e latitude galáctica $-20^\circ < b < +40^\circ$. O limite mínimo em velocidade foi utilizado na tentativa de eliminar os grupos muito próximo que poderiam gerar alguma forma de "tendência" dos valores de $\xi(r)$. Além disso, as velocidades radiais medidas para estes objetos próximos possuem uma grande componente associada ao movimento peculiar das galáxias. Os limites em latitude galáctica devem-se à presença de extinção no plano Galáctico.

Com estes critérios, o teste de função de correlação de dois pontos foi aplicado para uma amostra de 42 grupos no Hemisfério Norte Galáctico e 37 grupos no Hemisfério Sul Galáctico.

Nas figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os gráficos para a função de correlação de dois pontos, para cada hemisfério. As barras de erros foram obtidas utilizando o método de *bootstrap*, descrito anteriormente, onde foram criadas 50 amostras de *bootstrap* com o mesmo número de grupos que o presente em cada Hemisfério. Os intervalos em r são equidistantes em escala logarítmica, com $d\log(r) = 0,1 \text{ } h^{-1} \text{ Mpc}$.

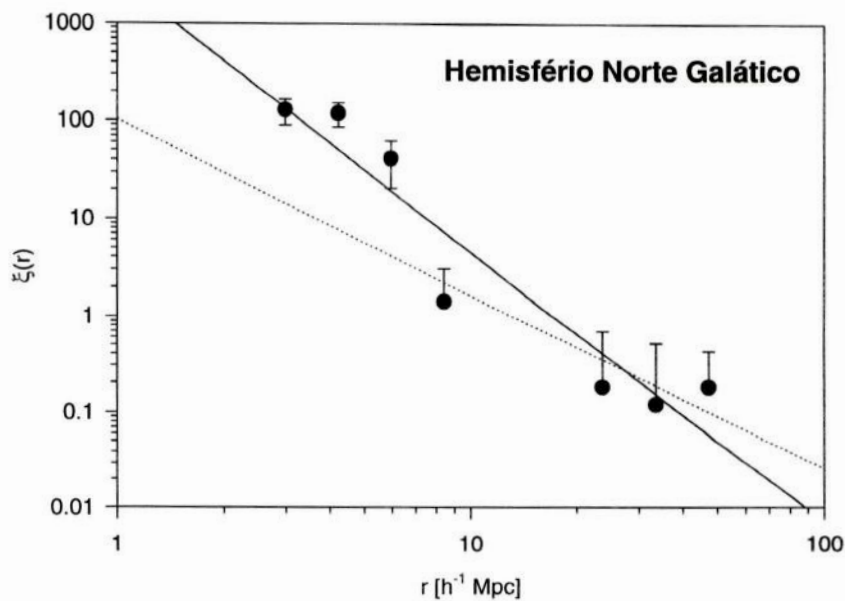


Figura 5.1 - Função de correlação para o Hemisfério Norte Galáctico. Os pontos mostram as estimativas obtidas a partir do estimador de Hamilton (1993). A linha sólida apresenta a curva de ajuste da lei de potência $\xi(r) = (r/r_0)^\gamma$, deixando-se os parâmetros r_0 e γ livres; a linha pontilhada mostra o ajuste obtido para $\gamma = -1,8$.

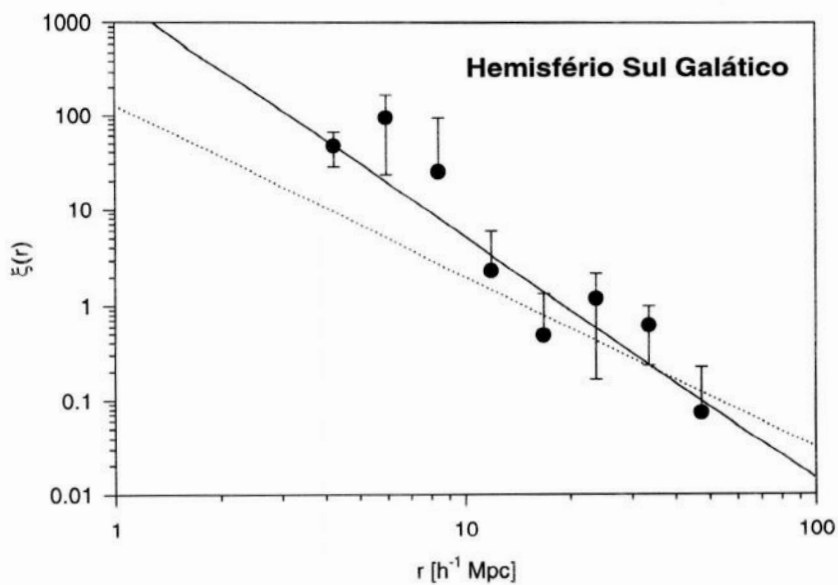


Figura 5.2 - Mesmo que na figura acima, para o Hemisfério Sul Galáctico.

Realizamos dois ajustes para estimar a lei de potência $\xi(r) = (r/r_0)^\gamma$ em cada Hemisfério. Para cada ajuste, utilizamos uma função peso, dada pelo inverso do erro de $\xi(r)$, [$W(r)=1/\Delta\xi(r)$]. Deve-se notar que os intervalos em r usados para o ajuste das leis de potência foram semelhantes para os dois Hemisférios. Para o Hemisfério Norte, o ajuste foi feito entre $3 \leq r \leq 50$ Mpc, e para o Sul o intervalo considerado é de $4 \leq r \leq 50$ Mpc. Nas figuras 5.1 e 5.2 podem ser observadas as retas de ajuste; o traço contínuo representa a curva de ajuste com os parâmetros γ e r_0 livres e o traço pontilhado representa a curva de ajuste com o coeficiente angular γ fixado em -1,8, valor canônico para a correlação de galáxias de campo. Os pontos que não apresentam barra de erro se referem àqueles cujos erros são superiores ao valor de $\xi(r)$. Os valores derivados para os parâmetros γ e r_0 nos dois hemisférios encontram-se na tabela 5.1.

Hemisfério	γ	R_0	$r_0 (\gamma = -1,8)$
Norte	$-2,81 \pm 0,41$	$17,1 \pm 2,7$	$13,1 \pm 1,8$
Sul	$-2,55 \pm 0,63$	$19,1 \pm 3,5$	$14,8 \pm 2,2$

Tabela 5.1 - Valores obtidos para os parâmetros γ e r_0 para os dois hemisférios galácticos. A última coluna apresenta r_0 para a reta de ajuste de coeficiente angular fixo $\gamma = -1,8$.

Observa-se que a escala de comprimento de correlação r_0 para o Hemisfério Norte é um pouco menor que o valor para o Sul. Entretanto, esses valores são coerentes entre si, apesar de terem sido derivados independentemente. Isso indica que não há grandes efeitos de seleção de uma amostra em relação à outra.

A inclinação de γ para o Hemisfério Norte é um pouco maior do que para o Sul, talvez devido à presença de estruturas mais próximas no estudo do CfA2

norte entre $8,5^\circ < \delta < 17,5^\circ$ (Barton et al. 1996). Uma vez que o critério de seleção de grupos no espaço de velocidades radiais exclui galáxias projetadas no fundo ou em um primeiro plano, os grupos no RSCG são mais favoravelmente encontrados em regiões de alta densidade galáctica. Isso pode ser confirmado através de uma inspeção visual dos mapas de distribuição de galáxias apresentados no Capítulo 3 (figuras 4.1 a 4.4).

Tentamos eliminar essa tendência da amostra ajustando a lei de potência com o valor de γ fixo em $-1,8$. O principal resultado é a diminuição da escala das estruturas formadas pelos grupos compactos para, em média, $14 h^{-1}$ Mpc. Podemos ver também que grupos compactos formam estruturas de até $50 h^{-1}$ Mpc, apesar da amplitude de correlação ser muito pequena nessas escalas.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As distribuições de galáxias, grupos (compactos ou esparsos) e aglomerados nos fornecem informação sobre a aglomeração de matéria no Universo, não apenas em diferentes escalas, mas também com diferentes contrastes de densidade. Vários estudos de galáxias (Ramella, Geller e Huchra 1990; Trasarti-Battistoni, Invernizzi e Bonometto 1997) e aglomerados (Bahcall e Soneira 1983; Postman, Huchra e Geller 1992; Dalton et al. 1992; Romer et al. 1994, Nichol, Briel e Henry 1994) demonstraram que as funções de correlação de dois pontos desses objetos podem ser bem descritas por leis de potência da forma por nós apresentada anteriormente, ou, alternativamente, sob a forma

$$\xi_{gg} = A_g r^\gamma, \quad \xi_{aa} = A_a r^\gamma$$

com $\gamma \approx -1,8$, e onde os índices g e a referem-se a galáxias e aglomerados, respectivamente. A diferença entre as duas correlações fica por conta de diferentes valores das amplitudes de correlação (definidas a $1 h^{-1}$ Mpc), A_g e A_a , que levou à proposta de um mecanismo tendencioso de formação galáctica (Kaiser 1984; Politzer e Wise 1984). Para aglomerados, estudos recentes indicam também uma dependência dos resultados com a natureza do critério de seleção: enquanto aglomerados ricos selecionados a partir de algoritmos numéricos em placas fotográficas ou através de amostras de raios-X com limite em fluxo parecem indicar que a escala de comprimento da correlação gira em torno de $13 \lesssim r_0 \lesssim 16 h^{-1}$ Mpc, amostras selecionadas a partir de levantamentos de *redshift* parecem indicar uma escala maior, em torno de $r_0 \approx 20 h^{-1}$ Mpc (Dalton et al.

1994) e $\gamma \approx 2$. Segundo Dalton et al., a discrepância parece ser resultante da correlação entre r_0 e o grau de riqueza dos aglomerados. Assim, como as amostras obtidas a partir de algoritmos numéricos e raios-X são tipicamente menores (entre 100-200 aglomerados), a curva da função de correlação é definida de forma pobre para escalas de $r \geq 15 h^{-1}$ Mpc. Isso indica, portanto, que amostras selecionadas através de levantamentos mais profundos, fornecem uma melhor definição da distribuição de matéria em grandes escalas no Universo. Em princípio, isso favorece também o uso de grupos compactos selecionados a partir de levantamentos de *redshift*, como os RSCGs, sobre grupos selecionados a partir de critérios visuais no plano do céu, como os HCGs, para estudos da função de correlação. Nosso resultado mostra a existência de correlação até $50 h^{-1}$ Mpc, o que não pode ser observado no resultado baseado nos HCGs (Kalinkov e Kuneva 1990). Derivamos, também, uma escala de comprimento de correlação $r_0 \approx 18 h^{-1}$ Mpc (para um ajuste livre de γ), o que nos leva a concluir que, no caso de existência de uma segregação no processo de formação de galáxias e aglomerados, os grupos compactos seriam formados em processos semelhantes aos formadores de aglomerados. Mas como conciliar o valor mais alto de γ derivado por nós para grupos compactos (em média, $\gamma \approx -2,7$) com os resultados para galáxias e aglomerados? A melhor resposta talvez venha de estudos recentes de grupos esparsos de galáxias.

Os resultados obtidos para grupos esparsos de galáxias são discrepantes entre si. Jing e Zhang (1988) e Maia e da Costa (1990) obtiveram que a função de correlação de grupos esparsos é consistente com $\gamma \approx -1,8$ e $A_G = A_g/d$, onde A_G é a amplitude de correlação para grupos, e $d \approx 2-2,5$. Ao contrário, Ramella, Geller e Huchra (1990) encontraram que $\xi_{GG} \approx \xi_{gg}$, e apesar de $\gamma \approx -1,8$ não poder ser rejeitado, o valor preferido encontrava-se ao redor da unidade. Dois pontos delicados na análise de grupos esparsos são a sensibilidade dos resultados aos

detalhes do algoritmo de seleção e aos parâmetros adotados no algoritmo, problemas estes que também dizem respeito a grupos compactos. Nesses estudos, os grupos esparsos foram identificados a partir de algoritmos adaptativos amigos-de-amigos (*friends-of-friends*) de Huchra e Geller (1982) e Nolthenius e White (1987) e, apesar da escolha dos parâmetros variar de amostra para amostra, há indicações de que os valores adotados são mais relevantes à definição dos parâmetros internos dos grupos do que de aglomeração dos mesmos (Frederic 1995a, b).

Contudo, um problema adicional é apresentado pelo alto ruído na determinação de ξ_{GG} , devido à extensão limitada dos catálogos de grupos envolvidos nesses estudos. Trasarti-Battistoni, Invernizzi e Bonometto (1997) notaram o fato de que todas as amostras consideradas anteriormente (CfA1, CfA2 *Slices*, SSRS) contém estruturas (aglomerados de Virgem e Coma e as Grandes Muralhas, Norte e Sul) e *voids* (zonas de exclusão de objetos), cujas extensões são comparáveis ao tamanho das amostras, e que a presença dessas estruturas pode causar distorções moderadas na medida de aglomeração de galáxias e grupos. Isto pode ser bem observado na figura 3 do referido artigo, que mostra as funções de correlação derivadas para duas amostras selecionadas a partir do levantamento de Perseus-Peixes (PPS): a PPS2, mais profunda que os CfA1, CfA2, SSRS1, e a PPS1, de profundidade semelhante aos outros *surveys* (veja mapas na figura 1 do referido artigo). Enquanto a função de correlação para os grupos na PPS2 apresenta um comportamento suave, que segue aproximadamente o das galáxias, a correlação para os grupos na PPS1 apresenta um comportamento variável, e uma amplitude aparentemente bastante superior da observada para as galáxias. Para a amostra PPS2, os valores derivados para a lei de potência são $\gamma \approx -1,3$, $r_0 \approx 5 h^{-1}$ Mpc e $A_G \approx 7,5$, o que pode ser uma indicação real de um processo de formação de grupos esparsos mais semelhante ao de galáxias.

As variações apresentadas na amostra PPS1 podem ser comparadas às que derivamos para os RSCGs, selecionados a partir dos CfA2 e SSRS2. Na Figura 6.1, apresentamos o gráfico da função de correlação para as galáxias no SSRS2 (Benoist et al. 1996) (valores lidos a partir da figura 1 naquele artigo), limitada a um volume de raio até $138 h^{-1}$ Mpc (D138), semelhante ao volume coberto por nossa amostra. Superposta a essa curva, apresentamos a função de correlação por nós derivada para os RSCGs. Podemos ver um comportamento similar ao obtido para a PPS1, isto é, uma variabilidade no comportamento da função de correlação em relação à curva definida pelas galáxias. O valor de γ derivado através do ajuste da lei de potência parece ser, então, uma superestimativa do valor real. O valor canônico de $-1,8$ também parece não se ajustar à curva, como visto na Figura 5.2. Entretanto, não podemos descartar a possibilidade da inclinação apresentada pelos RSCGs ser a mesma da apresentada pelas galáxias no SSRS2. De fato, fazendo-se um ajuste da lei de potência, fixando-se $\gamma = -2,0$, obtemos $r_0 = 16,1 \pm 2,1 h^{-1}$ Mpc. A amplitude de correlação de grupos compactos seria, por conseguinte, maior que a amplitude de galáxias, e similar a de aglomerados de galáxias.

A difícil interpretação dos nossos resultados está no fato de que os grupos compactos de galáxias parecem apresentar um mecanismo de aglomeração distinto do de grupos esparsos, o que, em princípio, afastaria a hipótese dos grupos compactos serem subestruturas ou núcleos de grupos mais esparsos. Uma interpretação alternativa seria a de que grupos compactos estariam associados a aglomerados mais pobres, que teriam um processo de formação mais semelhante ao de aglomerados ricos. Entretanto, cabe a ressalva de que existe uma correlação direta entre a riqueza do aglomerado e a amplitude da função de correlação.

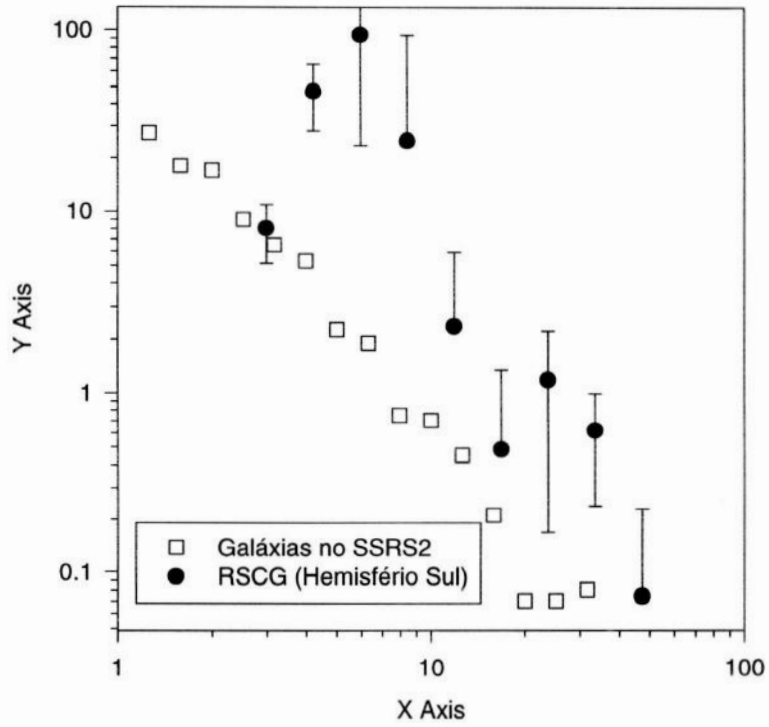


Figura 6.1 - Função de correlação para as galáxias no SSRS2 limitadas a um volume de raio até $138 h^{-1}$ Mpc (valores lidos a partir dos dados da curva D138, apresentados na figura 1 de Benoist et al. 1996), superposta à função de correlação por nós derivada para os RSCGs.

BIBLIOGRAFIA

- Arp, H. 1966, *Atlas of Peculiar Galaxies*, (Washington, DC: Carnegie Institution)
- Bahcall, N.A. e Soneira, R.M., 1983, *Ap.J.*, **270**, 20
- Barnes, J.E. 1984, *M.N.R.A.S.*, **208**, 873
- Barnes, J.E. 1985, *M.N.R.A.S.*, **215**, 517
- Barnes, J.E. 1989, *Nature*, **338**, 123
- Barton, E., Geller, M.J., Ramella, M., Marze, R.O., da Costa, L.N., 1996, *Astron.J.*, **112**, 871
- Benoist, C., Maurogordato, S, da Costa, L., Cappi, A. e Schaefer, 1996, *Ap. J.*, **473**, 7
- da Costa, LN, Geller, MJ, Pellegrini, PS, Lathan, DN, Fairall, AP, Marzke, RO, Willmer, CNA, Huchra, JP, Calderon, JH, Ramella, M, Kurtz, MJ, *Ap. J.*, **424**, L1 (SSRS2).
- Dalton, G.B., Efstathiou, G., Maddox, S.J. e Sutherland, W.J., 1992, *Ap.J.*, **390**, L1
- Dalton, G.B., Efstathiou, G., Maddox, S.J. e Sutherland, W.J., 1994, *M.N.R.A.S.*, **269**, L1
- Dalton, G., Croft, R., Efstathiou, G., Sutherland, W. e Baddox, S., 1994, *M.N.R.A.S.*, **271**, L47
- de Carvalho, R.R., Ribeiro, A.L.B. e Zepf, S.E. 1997, *Ap. J. Suppl.*, **110**, 1
- de Carvalho, R.R., Ribeiro, A.L.B., Capelato, H.V. e Zepf, S.E. 1994, *Ap. J. Suppl.*, **93**, 47
- Diaferio, A., Geller, M.J. e Ramella, M. 1994, *Astron. J.*, **107**, 868
- Frederic, J.J., 1995a, *Ap.J.Suppl.*, **97**, 259
- Frederic, J.J., 1995b, *Ap.J.Suppl.*, **97**, 275
- Garcia, A., 1995, *A&A*, **297**, 56
- Geller, M.J. e Huchra, J.P. 1983, *Ap. J. Suppl.*, **52**, 89
- Geller, MJ e Huchra, JP, 1989, *Science*, **246**, 897 (CfA2).
- Governato, F., Bhatia, R. e Chincarini, G. 1991, *Ap. J. Lett.*, **371**, L15
- Hamilton, A.J.S., 1993, *Ap. J.*, **417**, 19
- Hernquist, L., Katz, N., e Weinberg, D. H. 1995, *Ap. J.*, **442**, 57
- Hickson, P. 1982, *Ap. J.*, **255**, 382
- Hickson, P. 1989, *Ap. J. Suppl.*, **70**, 687
- Hickson, P. 1990, in *Proceedings of Paired and Interacting Galaxies*, eds J. Sulentic, W. Keel e C. Telesco, (NASA CP-3098), 77
- Hickson, P., Kindl, E. e Huchra, J.P. 1988, *Ap. J.*, **331**, 64
- Huchra, J.P. e Geller, M.J., 1982, *Ap.J.*, **257**, 423
- Jing, Y. e Zhang, J., 1988, *A&A*, **190**, L21
- Kaiser, N., 1984, *Ap.J.*, **284**, L9
- Kalinkov, M., Kuneva, I., in *Proceedings of Paired and Interacting Galaxies*, eds J. Sulentic, W. Keel e C. Telesco, (NASA CP-3098), 149
- Karachentsev, I.D. 1972, *Izv. Spets. Astrofiz. Obs.*, **7**, 1
- Karachentsev, I.D. 1982, *Astrophysics*, **17**, 135
- Karachentseva, V.E. 1973, *Soobshch. Spets. Astrofiz. Obs.*, **8**, 1

- Katgert, P., Mazure, A., Perea, J., den Hartog, R., Moles, M., Le Fevre, O., Dubath, P., Focardi, P., Rhee, G., Jones, B., Escalera, E., Biviano, A., Gerbal, D. e Giuricin, G. 1996, *Astron. & Astrophysics*, **310**, 8
- Ling, E.N., Frenk, C.S. e Barrow, J.D., 1986, *M.N.R.A.S.*, **223**, 21P
- Maia, M.A.G. e da Costa, L.N., 1990, *Ap.J.*, **349**, 477
- Maia, M.A.G., da Costa, L.N., e Lathan, D.W. 1989, *Ap J. Suppl. Ser.*, **69**, 809
- Mamon, G.A. 1990, in *Paired and Interacting Galaxies*, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel and C.M. Telesco, (NASA CP-3098), 609
- Mendes de Oliveira, C. e Giraud, 1994, *Ap. J. Lett.*, **431**, 103L
- Menon, T. K., e Hickson, P. 1985, *Ap. J.*, **296**, 60
- Nichol, R.C., Briel, U.G. e Henry, J.P., 1994, *M.N.R.A.S.*, **265**, 867
- Palumbo, G., Saracco, P., Hickson, P. e Mendes de Oliveira, C. 1995, *Astron. J.*, **109**, 1476
- Peebles, P.J.E., 1980, in *The Large-Scale Structure of the Universe*, eds. Wightman, A. e Anderson, P. (Princeton : Princeton University Press)
- Poltzer, H.D. e Wise, M.D., 1984, *Ap.J.*, **285**, L1
- Postman, M., Huchra, J.P. e Geller, M.J. 1992, *Ap.J.*, **384**, 404
- Prandoni, I., Iovino, A. e MacGillivray, H. 1994, *Astron. J.*, **107**, 1235
- Rabaça, C.R., 1996, Tese de Doutorado.
- Ramella, M., Diaferio, A., Geller, M.J. e Huchra, J.P. 1994, *Astron. J.*, **107**, 1623
- Ramella, M., Geller, M.J. e Huchra, J.P., 1990, *Ap.J.*, **353**, 51
- Ramella, M., Geller, M.J. e Huchra, J.P. 1989, *Ap. J.*, **344**, 57
- Ribeiro, A.L.B., de Carvalho, R.R. e Zepf, S.E. 1994, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **267**, L13
- Rood, HJ, Williams, BA, 1989, *Ap. J.*, **339**, 772.
- Rose, J.A. 1977, *Ap. J.*, **211**, 311
- Rose, J.A. 1979, *Ap. J.*, **231**, 10
- Rubin, V.C., Hunter, D.A. e Ford, W.K. 1991, *Ap. J. Suppl.*, **76**, 153
- Sakai, S., Giovanelli, R., Wegner, G., 1994, *Astron. J.*, **108**, 33
- Shakbazyan, R.K. 1957, *Astron. Tsirk.*, **177**, 11
- Shakbazyan, R.K. 1973, *Astrofiz.*, **9**, 495
- Shakbazyan, R.K. 1978, *Astrofiz.*, **14**, 273
- Stephan, M.E. 1877, *M.N.R.A.S.*, **37**, 334
- Sulentic, J., 1987, *Ap. J.*, **322**, 605.
- Sulentic, J.W. e de Mello Rabaça, D.F. 1993, *Ap. J.*, **410**, 520
- Sulentic, J.W. e Rabaça, C.R. 1994, *Ap. J.*, **429**, 531
- Telesco, C.M. e Harper, D.A. 1980, *Ap. J.*, **235**, 392
- Tikhonov, N.A. 1987, *Astrofiz.*, **27**, 253
- Trasarti-Battistoni, R., Invernizzi, G. e Bonometto, S.A., 1997, *Ap.J.*, **475**, 1
- Vennik, J., Richter, G.M. e Longo, G. 1993, *Astron. Nachr.*, **314**, 393
- Vorontsov-Velyaminov, B.A., 1959, *Atlas and Catalog of Interacting*

Galaxies, Vol. 1 (Moscow:
Moscow University Press)
Vorontsov-Velyaminov, B.A., 1977,
Atlas of Interacting Galaxies, Part II,
Astron. & Astrophysics Suppl.,
28, 1

White, S.D.M. 1990, in *Dynamics and
Interactions of Galaxies*, ed. R.
Wielen (Heidelberg: Springer),
380
Zepf, S.E. 1993, *Ap. J.*, **407**, 448