

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA

# Caracterização de Remanescentes de Aglomerados Abertos na Galáxia\*

Daniela Borges Pavani

Tese de doutorado realizada sob orientação do Dr.  
Eduardo L. D. Bica e apresentada ao Instituto de  
Física da UFRGS em preenchimento parcial dos  
requisitos para a obtenção do título de Doutor em  
Ciências.

Porto Alegre  
Setembro - 2005

---

\*Trabalho financiado pelo CNPq.

*Aos meus pais Carlos e Luci, com todo o meu amor.*

# Resumo

O presente trabalho busca ampliar o conhecimento das relações entre aglomerados abertos de estrelas e seus remanescentes. Do ponto de vista observacional, um remanescente pode ser definido como uma concentração pouco povoada de estrelas resultante da evolução dinâmica de um sistema inicialmente mais massivo. Apesar do avanços no conhecimento teórico a respeito desses objetos e, nos últimos anos, da busca pela identificação observacional dos mesmos ter aumentado, muitas questões permanecem em aberto. Assim, no presente estudo serão analisados 23 candidatos a remanescentes através de dados fotométricos, espectroscópicos e de movimentos próprios. Esses dados fornecem informações sobre os objetos e seus campos. Por meio destas, buscam-se estabelecer critérios de definição de remanescentes de aglomerados abertos, levando-se em conta incertezas observacionais. Os dados fotométricos no infravermelho oriundos do catálogo *The Two Micron All sky Survey* possibilitam, nesse estudo, (i) estudar as propriedades estruturais dos objetos por meio dos perfis de densidade radial de estrelas; (ii) testar a semelhanças entre objetos e campos através de um método estatístico de comparação entre distribuições de estrelas no plano do diagrama cor-magnitude e, (iii) obter idades, avermelhamentos e distâncias com o uso de diagramas cor-magnitude, além de distinguir os objetos em função de um índice de ajuste de isócronas. Os dados espectroscópicos obtidos através de observações óticas no Complejo Astronómico El Leoncito (Argentina) fornecem para 12 objetos da amostra informações adicionais de avermelhamentos e idades. Os dados cinemáticos extraídos do *The Second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog* permitem, por sua vez, uma comparação objetiva entre a distribuição de movimentos próprios dos objetos e campos próximos de grande ângulo sólido. O emprego desses métodos complementares se mostra essencial no estudo em função da carência de dados completos para os candidatos a remanescentes. No que diz respeito à amostra, em geral não é possível afirmar individualmente qual objeto caracteriza-se de forma definitiva como um remanescente de aglomerado aberto devido à incompleteza dos dados, às incertezas observacionais e à baixa estatística. Entretanto, os métodos desenvolvidos permitem uma análise objetiva e sugerem a presença de remanescentes de aglomerados abertos na amostra. Além disso, há evidência da presença de binarismo, o que é esperado para sistemas evoluídos dinamicamente. Portanto, pode-se inferir sobre estágios evolutivos para remanescentes a partir das distribuições de movimento próprio de suas estrelas e de seu mapeamento no diagrama cor-magnitude.

# Abstract

The present work aims to better understand the relationship between open star clusters and their remnants. From the observational point of view, a remnant can be defined as a poorly populated concentration of stars resulting from the dynamical evolution of an initially more massive system. Despite progresses in the theoretical knowledge of these objects, and the increasing search for their observational identification in recent years, many open questions still remain. Thus, in the present study 23 candidates are analyzed through photometric, spectroscopic and proper motion data. These data provide information on objects and their fields. Through them we try to establish defining criteria of open clusters remnants, taking into account observational uncertainties. The photometric data in the infra-red is obtained from the catalogue The Two Micron All sky Survey making possible (i) the study of the structural properties of the objects by means of the radial stellar density profiles; (ii) to test the similarity or not between objects and fields through a statistical method of comparison between distributions of stars in the color-magnitude diagram plane and, (iii) to obtain ages, reddening values and distances through the color-magnitude diagram, together with the classification of the objects taking into account an index of isochrone fit. The optical spectroscopy was collected in the Complejo Astronmico El Leoncito (Argentina) and provides information on reddening values and ages for 12 objects. The kinematic data extracted from the The Second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog allowed an objective comparison between the distributions of proper motions of the objects and large solid angle offset fields. The use of these complementary methods proved to be essential in the study due to the incompleteness effects in the data for the remnant candidates. Concerning the sample, in general it is not possible individually to state which object is definitely characterized as an open cluster remnant owing to completeness effects, observational uncertainties and low statistics. However, the developed methods allow an objective analysis and suggest the presence of open cluster remnants in the sample. Moreover, there is evidence of binarism, a high fraction expected for dynamically evolved systems. Therefore, we can infer on possible evolutionary stages for remnants from the proper motion distributions of their stars and their mapping on the color-magnitude diagrams.

# Agradecimentos

No processo de nos tornarmos pesquisadores, buscando entender a natureza e os fenômenos que a caracterizam, cada vez mais me convenço que, a exemplo dela, os detalhes nos definem e o todo nos explica. O trabalho de pesquisa parte da nossa ação individual, mas só ganha consistência na medida em que interagimos com as diversas áreas do conhecimento e, especialmente, com as pessoas. Assim, a pesquisa torna-se uma ação coletiva. Por isto, quero agradecer a algumas pessoas que no detalhe explicam um pouco quem sou e aonde quero chegar.

Ao Eduardo Bica, que para mim define a palavra e a ação “orientador”. Por ao longo desses anos ter me incentivado a descobrir caminhos com uma visão questionadora e um olhar atento sobre o que não se revela. Por sua enorme paciência para dar uma nova explicação, ou simplesmente voltar a um tema já discutido. Pela sua disposição em compartilhar comigo seu conhecimento, suas idéias e seus projetos. Obrigada pela amizade.

Aos professores do Instituto de Física pelo convívio e o aprendizado. Em especial, aos professores do Departamento de Astronomia, com os quais estreitei laços durante a pós-graduação. Agradeço ao Horácio, por ter sido o primeiro a me acolher no Departamento, me levando a conhecer e trabalhar com o Bica, e pelas oportunidades de trabalharmos juntos. Pelas muitas conversas e conselhos sobre todos os assuntos: à Miriani e ao Kepler. Pelo convívio: à Fátima e ao Ducati. Pelo exemplo de que é possível construir uma carreira científica sem abrir mão de outros sonhos e realizações: à Miriani, Thaisa e Fátima. Ao Erexim, por compartilhar idéias e muitos sonhos, pela nossa amizade. Ao Sérgio pela companhia, conversas e histórias divididas nas viagens do OEI. Ao Charles, por estar sempre disposto a esclarecer minhas dúvidas, desde a graduação. Pelas discussões e colaborações iniciadas no mestrado, e que foram fundamentais para esse trabalho e a minha formação. Ao Basílio por desde a graduação até hoje ter participado da minha formação em sala de aula ou não. Obrigada por suas análises, sugestões e críticas. Por ser um exemplo de que é possível, e dá bons frutos, nos dedicarmos a por em prática na Universidade o princípio: Ensino, Pesquisa & Extensão. Quero agradecer pela experiência incrível de participar do Observatório Educativo Intinerante (OEI), pensado e colocado em prática pelo Horácio e hoje dirigido pelo Basílio.

A dois colegas, em especial, quero agradecer por contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese: ao Leandro por todas as conversas e sugestões, em especial pelas análises que resultaram num melhor tratamento das discussões do Capítulo 3; ao Evy, pelo auxílio na construção de todos os programas computacionais utilizados e por várias discussões que me ajudaram a compreender melhor a física.

Aos funcionários do Instituto de Física, que com suas opiniões e ações contribuíram e colaboraram para que esse trabalho fosse iniciado e concluído. Em especial ao Seu Waldomiro, pela atenção e dedicação, além de sua enorme paciência, a Lucinha por sua disposição em fazer tudo dar certo.

Ao Juan J. Clariá e à Andrea V. Ahumada, quero agradecer pelo privilégio de trabalharmos juntos, pelo aprendizado e amizade. Assim como obrigada à Celeste Parisi, cujo o convívio em todas as situações tem se tornado cada vez mais caloroso no trabalho e na vida. Obrigada por fazerem de Córdoba um lugar tão parecido com a minha casa. Obrigada Andrea, pela amizade e pela oportunidade de conviver com tua família que sempre me recebe com muito amor e carinho.

À toda a equipe do Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) obrigada pela assistência, recepção e aprendizado; aos colegas, professores e funcionários do Observatório Astronómico de Córdoba que me receberam com toda a atenção, muito obrigada.

Aos colegas da sala M208: Evy, Baiano, Samuel, Kelen, Rodrigo, Gui, André, Alysson, Henrique, Guilherme, Rene. E frequentadores virtuais: João, Marcos André, Thunder, Márcia, Michelle, Débora, ....., e todos os colegas da pós-graduação com os quais tive a oportunidade e o prazer de conviver mais de perto. Obrigada pelos momentos de descontração, pelas coisas que construímos juntos aqui no IF, e pela nossa amizade que já extrapolou o espaço da Universidade.

Aos colegas e amigos do laboratório por compartilharem comigo a paixão pela Astronomia. Obrigada pelos debates acalorados sobre de política, ciência, amor, anseios, planos para o futuro..... Além, é claro, pela parceria em viagens e festas: Jules, Leandro, Edu, Irapa, Fausto, Sandro, Lili, Gustavo, Aninha, Bárbara, Pat, Gustavo, Rogério, Rogemar, enfim todos. À Virginia por todas essas razões e pela amizade cada vez maior.

Aos “vizinhos-amigos-guardiões” Maristela, Rubinho, dona Leopolda e dona Tereza. Por receberem a mim e ao Márcio com carinho. Obrigada por nesse período absolutamente tumultuado das nossas vidas cuidarem da gente, da nossa casa e do Argus. Assim como obrigada, aos também novos amigos de São Lourenço: Lara, Daniel, Débora, Gabriela, Chico, Giani, Zé, Regina, Andreia, Kadinho.....que nos receberam de braços abertos e com os quais passamos a dividir uma gostosa amizade. Obrigada a todos por estarem sempre próximos ao Márcio fazendo dessa minha rotina rotina POA/São Lourenço menos pesada e mais tranquila.

Aos amigos cuja história começou a ser escrita na graduação, mas que a muito as angústias do tipo “que disciplina fazer? para que prova vamos estudar? será este mesmo o curso que quero fazer? porque, afinal de contas, escolhi viver assim?...” deixaram de ser o que no une, entre eles: Silvana, Henrique e o pequeno Artur, Erlon, André, Alysson, Verônica, Dirk, Marina, Carlos e a pequena Alice. Os encontros onde compartilhamos nossas vidas sempre me ajudaram a ver além de meu mundo cotidiano, o que é fundamental para não nos tornarmos pequenos. Obrigada pela amizade.

Às minhas sobrinhas e sobrinhos: Fabíola, Paola, Manu, Gio, Pedro e Lorenzo e ao meu afilhado Ricardo. Por sempre me lembrarem de como é gostoso descobrir o Mundo que nos cerca e por permitirem que eu compartilhe disso com vocês, tornando minha vida mais iluminada.

Aos amigos com os quais compartilho uma história de vida muito intensa, e que são fundamentais, apesar de nesse momento nossos caminhos não se cruzarem diariamente. Quero agradecer por todas as vezes em que acreditaram mais do que eu na minha capacidade de realizar meus sonhos e me impulsionaram à vida. Por tudo o que passamos juntos: Cuca, Arthur, Flávia, Soninha, Nubia, Marcelo...

À Marcinha, Karen e Simone, ao Gui, Renato e Evy por tudo que nos une e que nos transformou em uma família.

À minha família: tios, tias, primos e primas, obrigada pelo apoio e palavras de incentivo. E à família do Márcio: Serley, Ivo, Ivan, Thelma, Marcos, Marcelo e Andrea. Obrigada pelo carinho e amor.

À Fabi: irmã, confidente, amiga. Ao Fabricio cunhado-irmão. Obrigada por compartilharmos juntos ideais de vida, pelo amor e por serem sempre apoiadores incondicionais das minhas escolhas, inclusive pela Astronomia.

À minha mãe Luci, e ao meu pai Carlos por estarem sempre ao meu lado com seu carinho, amor, amizade. Por terem construído para nós essa família da qual são o núcleo. Pelos almoços de domingo que simbolizam nossa união: riso alto, debates acalorados e comidas deliciosas. Obrigada por sempre me apoiarem, compreendendo ou não as minhas escolhas, e por compartilharem da minha vida fazendo seus os meus amigos. As minhas conquistas são e serão sempre também de vocês.

Ao Márcio "... meu norte, meu sul, meu leste e meu oeste. Minha semana de trabalho, meu descanso de domingo, o meio dia, a meia noite, minha conversa, uma canção...." (WH. Auden). Obrigada por tua presença, por tudo e todos que ganhei desde que finalmente nos encontramos. Obrigada por nosso amor que me faz mais serena e capaz de realizar meus sonhos.

Obrigada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e a sociedade brasileira que a constituiu e mantém, por propiciar minha formação desde a graduação até o doutorado.

Esta tese fez uso de dados produzidos pelo *Two Micron All Sky Survey*, o qual é um projeto conjunto da *University of Massachusetts e do Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology*, projeto fundado pelo *National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation*.

# Notação

As seguintes siglas, grandezas, e unidades são amplamente utilizadas.

## Siglas

2MASS, *The Two Micron All Sky Survey* - Catálogo com acesso disponível via internet, que disponibiliza fotometria infravermelha.

UCAC2, *The Second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog* - Catálogo com acesso via internet, que disponibiliza dados cinemáticos.

XDSS, *Digitized Sky Survey* - Catálogo com acesso via internet, que disponibiliza imagens do céu.

GSC, *Guide Star Catalogue* - Catálogo com acesso via internet, que disponibiliza fotometria no ótico.

CMD - Diagrama cor-magnitude.

MS - Sequência principal.

TO, *Turn-off* - Ponto de inflexão.

## Grandezas

$(\alpha, \delta)$  - coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação)

## Unidades

yr - ano

Myr -  $10^6$  anos

Gyr -  $10^9$  anos

$M_{\odot}$  - massa solar

pc - parsec

msa/ano - milissegundo de arco por ano

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iv</b>
<b>Notação</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Aglomerados Estelares . . . . .	4
1.2 Aglomerados Abertos . . . . .	5
1.2.1 Aglomerados Embebidos . . . . .	5
1.2.2 Aglomerados Abertos propriamente ditos . . . . .	5
1.3 Remanescentes de Aglomerados Abertos . . . . .	7
1.4 Diagramas Cor-Magnitude . . . . .	10
<b>2 Seleção e análise inicial dos objetos</b>	<b>14</b>
2.1 Métodos e Fontes de Dados . . . . .	15
2.1.1 Fotometria Empregada e sua Obtenção . . . . .	15
2.1.2 Movimentos Próprios . . . . .	16
2.1.3 Espectroscopia . . . . .	17
2.2 Caracterização Morfológica . . . . .	17
2.3 Perfil radial de densidade de estrelas . . . . .	22
<b>3 Estudos Estatísticos</b>	<b>35</b>
3.1 Estudo de objetos e campos próximos: comparação entre distribuições de estrelas no CMD . . . . .	35
3.1.1 Método e aplicação . . . . .	36
3.1.2 Conclusão . . . . .	45
3.2 Combinações Aleatórias de Espectro Estelares Podem Reproduzir Espectros de Aglomerados Abertos ? . . . . .	46

3.2.1	Método e aplicação . . . . .	47
3.2.2	Comparando Contínuos . . . . .	50
3.2.3	Comparando Linhas . . . . .	52
3.2.4	Conclusões . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Espectroscopia</b>	<b>55</b>
4.1	Método para análise dos espectros . . . . .	56
4.1.1	Larguras equivalentes de aglomerados abertos . . . . .	57
4.1.2	Larguras equivalentes de espectros estelares . . . . .	61
4.1.3	Ruprecht 156 . . . . .	64
4.2	Resultados finais . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Análise de Diagramas Cor-Magnitude</b>	<b>68</b>
5.1	Obtenção de parâmetros via CMD's . . . . .	68
5.2	Resultados . . . . .	70
5.2.1	Candidatos a Remanescentes com $I_a \geq 60\%$ . . . . .	72
5.2.2	Candidatos a Remanescentes com $I_a < 60\%$ . . . . .	89
5.2.3	Candidatos a Remanescentes cujo ajuste de isócrona não foi possível . . . . .	94
5.3	Emissão de Raio-X por binárias de contato . . . . .	99
5.4	Conclusões . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Movimentos Próprios</b>	<b>101</b>
6.1	Distribuição do módulo de movimentos próprios . . . . .	102
6.2	Caracterização de velocidades absolutas . . . . .	109
<b>7</b>	<b>Caracterização de um Remanescente</b>	<b>122</b>
7.1	Balanço individual dos objetos . . . . .	125
<b>8</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>128</b>
<b>A</b>	<b>CMD's: objetos e campos sobrepostos</b>	<b>131</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>140</b>

# Lista de Figuras

1.1	Seqüências evolutivas no diagrama H-R. . . . .	12
2.1	Painel esquerdo: incertezas fotométricas totais em J ( $\tau_J$ ) em função da magnitude J; Painel direito: incertezas totais em H ( $\tau_H$ ) em função da magnitude H. . . . .	16
2.2	Imagem XDSS na banda R da região central do aglomerado aberto de idade intermediária NGC3680. É semelhante morfológicamente aos objetos esparsos da amostra. . . . .	18
2.3	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: NGC 6481, NGC 6994, NGC 6863 e Ruprecht 3. Todos classificados como compactos. . . . .	19
2.4	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: Ruprecht 31, Ruprecht 156, NGC 2645 e Waterloo 6. Morfologias compactas. . . . .	20
2.5	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: ESO211SC8, Objeto 1, ESO132SC14 e Lynga 8. Morfologia compacta. . . . .	21
2.6	Imagem XDSS na banda R de ESO389**5. Morfologia compacta. . . . .	22
2.7	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita, e cima para baixo: NGC 1663, ESO425SC6, ESO425SC15 e ESO426SC26. Todos foram classificados como esparsos. . . . .	23
2.8	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita, e de cima para baixo: ESO429SC2, ESO570SC12, NGC 1252 e NGC1901. Para este último a imagem é na banda I. Todos foram classificados como esparsos. . . . .	24
2.9	Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painel $i_{\frac{1}{2}}$ esquerda: ESO383SC10. Painel à direita: IC 1023. Morfologia esparsa. . . . .	25
2.10	Distribuição radial da densidade superficial do aglomerado aberto NGC 3680. O retângulo hachurado mostra o nível médio de contribuição do fundo do céu. Nesse caso, foram aplicados filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e para fontes não estelares. As barras correspondem às incertezas poissonianas. A linha pontilhada mostra o ajuste por um perfil de King. . . . .	26

2.11	Distribuição radial da densidade superficial de estrelas. Objetos classificados como compactos, conforme legenda nos painéis. As barras correspondem a incertezas poissonianas. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais. . . . .	28
2.12	Idem à legenda da figura 2.11. . . . .	29
2.13	Perfis radiais de densidade estelar. Objetos classificados morfologicamente como compactos. Os nomes estão indicados nos painéis. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais, tendo os três últimos seus perfis para $J < 13$ . . . . .	30
2.14	Idem à legenda da figura 2.11. . . . .	31
2.15	Perfis radiais de densidade estelar. Objetos classificados morfologicamente como esparsos. Os nomes estão indicados nos painéis. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais. . . . .	32
2.16	Idem à legenda da figura 2.15. . . . .	33
2.17	Idem à legenda da figura 2.15. . . . .	34
3.1	Distribuição angular das estrelas do campo Galáctico próximo a NGC 3680 (círculos cinzas) e das coordenadas centrais das amostragens (círculos pretos). . . . .	37
3.2	Histograma do número de amostragens por intervalo de $S^2$ para NGC 3680. À esquerda temos o objeto e as amostragens do campo com raio $3'$ ; à direita ambas com raio $7.5'$ . . . . .	41
3.3	Histogramas do número de amostragens por intervalo de $S^2$ . Em cada um são mostradas as coordenadas Galácticas $l$ e $b$ além do valor de $S^2_0$ do objeto. Objetos com morfologias compactas. . . . .	42
3.4	Idem à legenda da figura 3.3. . . . .	43
3.5	Idem à legenda da figura 3.3. . . . .	44
3.6	Histogramas do número de amostragens por intervalos de $S^2$ . Em cada um são mostradas as coordenadas Galácticas $l$ e $b$ além do valor de $S^2_0$ do objeto. Todos os objetos com morfologias esparsas. . . . .	44
3.7	Idem à legenda da figura 3.6. . . . .	45
3.8	Idem à legenda da figura 3.6. . . . .	45
3.9	Os 5 tipos espectrais que formam a base de estrelas. Os espectros são mostrados entre $3500 < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ , uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização. . . . .	47
3.10	Espectros integrados médios de aglomerado aberto, e suas respectivas idades, utilizados como espectros de comparação em relação às combinações aleatórias. Intervalo entre $3800 < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ . Uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização. . . . .	48

3.11	Os painéis mostram combinações aleatórias de espectros que são mostradas entre $3800 < \lambda < 6500$ Å. Uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização. . . . .	48
3.12	Idem à legenda da figura 3.11. . . . .	49
3.13	Idem à legenda da figura 3.11. . . . .	49
3.14	Para os quatro painéis: (A): Espectro combinado, (B): Espectro integrado médio de aglomerado aberto. (A -B): Espectro resultante da subtração ponto a ponto em fluxo. Os espectros estão normalizados em 5870 Å. Nos painéis superiores, temos os valores de desvio padrão mínimo ( $\sigma$ ) aceitos para os espectros azuis e vermelhos, respectivamente. Nos painéis inferiores, exemplo de ajustes com desvios superiores ao limite mínimo aceito. . . . .	51
3.15	Os painéis apresentam dois espectros combinados no limite de nosso critério para ajuste aceitável. Em que (A): Espectro combinado, (B): Espectro integrado médio de aglomerados abertos. (A -B): Espectro resultante da subtração ponto a ponto em fluxo. Os espectros estão normalizados em 5870 Å. . . . .	53
3.16	Diagrama dos desvios padrão das larguras equivalentes de linhas e bandas em função do desvio padrão dos contínuos para os 16 espectros que apresentam ajustes aceitáveis em relação aos espectros médios de comparação, sugerindo a não correlação entre ambos os desvios. Os pontos azuis correspondem aos valores para os espectros médios com idades entre 0.1 e 0.5 Gyrs. Os pontos vermelhos para idades de 1 a 3 Gyr. . . . .	54
4.1	Diagrama das larguras equivalentes medidas nos <i>templates</i> de aglomerados abertos de Piatti et al. (2002)[69] em função dos tipos espectrais de diferentes idades. (:) Indica um ponto com incerteza importante, o qual foi desconsiderado. . . . .	57
4.2	Espectro integrado de NGC6863 já corrigido por avermelhamento (tabela 4.4) comparado com o <i>template</i> de aglomerado aberto de 3 - 4 Gyr. Estão indicadas as linhas e bandas características de objeto. O espectro está em unidades de $F_\lambda$ e normalizado em $\lambda = 5870$ Å. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. . . . .	58
4.3	Espectros observados, sem correção por avermelhamento e normalizados a $\lambda = 5870$ Å. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.2. . . . .	59
4.4	Espectro integrado de Lynga 8 comparado com um dos espectros de aglomerado aberto (NGC6253) que compõe o <i>template</i> de 3-4 Gyr de Piatti et al. (2002)[69]. Esses espectros caracterizam-se por uma banda TiO $\lambda 6300$ Å forte. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.2. . . . .	59
4.5	Espectros observados das estrelas 2, 3 e 4 de Ruprecht 3. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.3. . . . .	60

4.6	Comparação do espectro observado e já corrigido por avermelhamento da estrela 1 de Ruprecht 3 com o <i>template</i> de estrela que melhor se ajustou aos mesmos. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros, exceto para o correspondente a estrela 4. Mesmas unidades que a figura 4.3. . . . . .	60
4.7	Espectro integrado observado e corrigido por avermelhamento de Ruprecht 3 comparado com o <i>template</i> de aglomerado Globular ([Fe/H]= -0,5). Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros, exceto para o espectro observado de Ruprecht 3. Mesmas unidades que na figura 4.3. . . . . .	61
4.8	Diagrama das larguras equivalentes medidas dos <i>templates</i> da biblioteca estelar de Silva & Cornell (1992)[80] em função dos tipos espectrais do <i>TO</i> . . . . . .	62
4.9	Espectro integrado da região central de ESO132 SC14 já corrigido por avermelhamento (tabela 4.4) comparado com o <i>template</i> de estrela. Algumas linhas espectrais estão identificadas. Os espectros estão em unidades de $F_\lambda$ e normalizados em $\lambda= 5870 \text{ \AA}$ . Foram adicionadas constantes arbitrárias, sendo que o do objeto tem $C=0$ . . . . . .	63
4.10	Painel Superior: Espectros integrados observados dos objetos compactos do grupo (2). Painel Inferior: Espectros integrados observados das estrelas mais brilhantes dos objetos esparsos do grupo (3). Foram adicionadas constantes arbitrárias. Mesmas unidades que a figura 4.9. . . . . .	65
4.11	Espectro integrado observado de Ruprecht 156. Mesmas unidades que a figura 4.9. . . . . .	66
5.1	Diagramas cor-magnitude para NGC3680. Painel Esquerdo: extração de fotometria 2MASS correspondendo ao raio de núcleo ( $r_n = 2.3' \pm 0.4'$ ). Painel Direito: extração correspondente à região central ( $r = 7.5'$ ). São mostrados, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. . . . . .	71
5.2	Diagrama cor-magnitude para NGC6481 e dois campos próximos, conforme legendas nos painéis. São mostradas os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campo de comparação está sobreposto o ajuste obtido para o objeto. . . . . .	73
5.3	Diagrama cor-magnitude para NGC6994 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	74
5.4	Diagramas cor-magnitude: NGC6863 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	75
5.5	Diagramas cor-magnitude para NGC1663 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	76
5.6	Diagramas cor-magnitude para ESO425SC6 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	77
5.7	Diagramas cor-magnitude para ESO425SC15 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	78
5.8	Diagramas cor-magnitude para Ruprecht 3 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	79
5.9	Diagramas cor-magnitude para ESO426SC26 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	80
5.10	Diagramas cor-magnitude para ESO429SC2 e dois campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2. . . . . .	81

5.11	Diagramas cor-magnitude para Ruprecht 31 e campos próximos, conforme legendas nos painéis. Idem à legenda da figura 5.2. . . . .	83
5.12	Diagramas cor-magnitude para NGC1252 e campos próximos. São mostradas, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campos de comparação é sobreposto o ajuste obtido para o objeto. . . . .	84
5.13	Diagramas cor-magnitude para NGC1901 e campos próximos. É mostrada a região contaminada por estrelas da Grande Nuvem de Magalhães (LMC). Idem à legenda da figura 5.12. . . . .	85
5.14	Diagramas cor-magnitude para IC1023 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12. . . . .	86
5.15	Diagramas cor-magnitude para ESO383SC10 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12. . . . .	87
5.16	Diagramas cor-magnitude para Lynga 8 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12. . . . .	88
5.17	Diagramas cor-magnitude para NGC2645 e campos próximos. São mostradas, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campos de comparação é sobreposto o ajuste obtido para o objeto. . . . .	90
5.18	Diagramas cor-magnitude para Waterloo 6 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17. . . . .	91
5.19	Diagramas cor-magnitude de ESO211C8 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17. . . . .	92
5.20	Diagramas cor-magnitude de ESO570SC12 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17. . . . .	93
5.21	Diagramas cor-magnitude de Objeto 1 e campos próximos. Mesma legenda da figura anterior. Idem à legenda da figura 5.17. . . . .	95
5.22	Diagramas cor-magnitude de Ruprecht 156 e dois campos próximos ao sul e ao norte, conforme legenda nos painéis. . . . .	96
5.23	Diagramas cor-magnitude de ESO132SC14 e dois campos próximos. No painel do objeto são mostradas isócronas de Padova e a seqüência de binárias, assim como os parâmetros obtidos do ajuste. . . . .	97
5.24	Diagramas cor-magnitude de ESO389**5 e dois campos próximos ao norte ao sul. . . . .	98
5.25	Luminosidades Raio-X em função da localização no CMD para fontes Raio-X identificadas como pertencentes aos aglomerados abertos NGC752 e M67 e ao campo Galáctico . . . . .	99
6.1	É mostrada a distribuição de movimentos próprios de NGC3680, através de histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio. Painel à esquerda: distribuição interna ao $r_n = 2.3 \pm 0.4'$ . Painel à direita: distribuição interna à região central ( $r = 7.5'$ ). Em ambos painéis os máximos correspondem à distribuição de movimentos próprios das estrelas sem companheira e os valores maiores de movimento próprio sugerem a presença de estrelas binárias. São mostradas latitude e longitude Galácticas. . . . .	103

6.2	Os histogramas indicam o número de estrelas por intervalo de movimento próprio. São mostrados os objetos (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. A distribuição de movimentos próprios sugere uma componente de estrelas sem companheira e a presença de prováveis binárias. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas. . . . .	104
6.3	Os Histogramas mostram o número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. As distribuições apresentam o mesmo comportamento do indicado na figura 6.2. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas. . . . .	105
6.4	Os Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. As distribuições apresentam o mesmo comportamento do indicado na figura 6.2. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.	106
6.5	Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios sugere significativa presença de prováveis binárias em número igual ou superior ao número de estrelas sem companheira. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas. . . . .	107
6.6	Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios apresenta mesmo o mesmo comportamento descrito na figura 6.5. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas. . . . .	108
6.7	Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios dos dois objetos apresenta semelhança com a distribuição dos respectivos campos. São mostradas latitude e longitude Galácticas. . . . .	108
6.8	Diagrama da componente de movimento próprio $\mu_\delta$ em função da componente $\mu_\alpha \cos \delta$ . Painéis conforme a legenda. Os diagramas s permitem a comparação do objetos com campos de mesmo ângulo sólido. . . . .	109
6.9	Idem à legenda da figura 6.2, porém em km/s. . . . .	111
6.10	Idem à legenda da figura 6.3, porém em km/s. . . . .	112
6.11	Idem à legenda da figura 6.4, porém em km/s. . . . .	113
6.12	Idem à legenda da figura 6.5, porém em km/s. . . . .	114
6.13	Idem à legenda figura 6.6, porém em km/s. . . . .	115

6.14	<b>Painel Superior:</b> distribuição de velocidades projetadas das estrelas de M67 para a região do núcleo e fora dele. À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde as áreas hachuradas indicam a contribuição do campo de comparação (mesmo ângulo sólido). À direita temos a distribuição de velocidades projetadas onde as linhas pontilhadas correspondem ao ajuste de uma função gaussiana. <b>Painel Inferior:</b> CMD para M67 mostrando o locus ocupado pelas estrelas com $v_p > 70\text{km/s}$ (círculos fechados). São mostradas duas linhas sólidas que delimitam as região esperada para binárias não resolvidas considerando as incertezas fotométricas do 2MASS, além de uma isócrona de 3.2 Gyr. . . . .	116
6.15	<b>Painel Superior:</b> distribuição de velocidades projetadas das estrelas de NGC3680 para a região central ( $r = 7.5'$ ). À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde a área hachurada corresponde à contribuição do campo de comparação. À direita é mostrado o resultado da subtração da contribuição do campo em relação à distribuição de velocidades projetadas das estrelas do aglomerado. <b>Painel Inferior:</b> CMD absoluto para NGC3680 mostrando o <i>locus</i> ocupado pelas estrelas em cada faixa de velocidades, conforme legenda no próprio painel. É mostrada uma isócrona de Padova de metalicidade solar. As estrelas de alta velocidade ( $v_p > 25\text{ km/s}$ ) localizam-se assimetricamente à direita da isócrona. . . . .	118
6.16	<b>Painel superior:</b> distribuição de velocidades projetadas das estrelas dos objetos que compõem grupo A. À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde a área hachurada corresponde à contribuição dos campos de comparação. à direita é mostrado o resultado da subtração da contribuição dos campos em relação à distribuição de velocidades projetadas das estrelas dos objetos do grupo A. <b>Painel Inferior:</b> CMD absoluto composto para os objetos que compõem o grupo A, mostrando o <i>locus</i> ocupado pelas estrelas em cada faixa de velocidades, conforme legenda no próprio painel. São mostradas duas isócronas de Padova de metalicidade solar. As estrelas de alta velocidade ( $v_p > 25\text{ km/s}$ ) localizam-se assimetricamente à direita da isócrona. . . . .	119
6.17	Mesma legenda da figura 6.16, porém para a distribuição de velocidades projetadas dos objetos que compõem o grupo B. . . . .	120
A.1	Diagrama $J \times (J - H)$ para NGC 3680 e campo. Painel à esquerda: extração para um raio de $3'$ . Painel à direita: raio de $7.5'$ . Os círculos cheios correspondem ao aglomerado e os pontos, ao campo (tabela 3.2). . . . .	132
A.2	Diagramas cor-magnitude 2MASS. Cada objeto está sobreposto a um campo próximo correspondente. Círculos cheios correspondem às estrelas do objeto e os pontos, às estrelas do campo. Todos eles são classificados como compactos. . . . .	133
A.3	Diagrama $J \times (J - H)$ . Idem à figura A.2. . . . .	134

A.4	Conforme legenda da figura A.2, mais quatro candidatos a remanescentes classificados como compactos . . . . .	135
A.5	Diagrama cor-magnitude para o compacto ESO 389**5 e campo próximo de comparação. Idem à legenda da figura A.2. . . . .	136
A.6	Diagramas $J \times (J - H)$ dos objetos sobrepostos aos campos correspondentes. Círculos cheios: estrelas do objeto; pontos: estrelas do campo. Objetos classificados como esparsos. . . . .	137
A.7	Diagramas $J \times (J - H)$ dos objetos sobrepostos aos campos correspondentes. Círculos cheios: estrelas do objeto; pontos: estrelas do campo. Objetos classificados como esparsos. Para NGC 1901, foi aplicado um filtro fotométrico para exclusão de estrelas na direção de LMC. Todos eles classificados como esparsos. . . . .	138
A.8	Idem à legenda da figura A.6. . . . .	139

# Lista de Tabelas

2.1	Coordenadas Galácticas e equatoriais (J2000.0) da amostra de 23 candidatos a remanescentes e do aglomerado aberto NGC3680. Os objetos estão classificados como compactos (C) ou esparsos(E). † coordenadas dadas pela centragem do objeto através do perfil radial obtido no presente trabalho. O Objeto 1 foi descoberto por Eduardo Bica em buscas sistemáticas no XDSS. . . . .	25
3.1	Resultados do teste estatístico para os 23 objetos estudados e o aglomerado aberto evoluído NGC 3680. As informações das colunas de 3 a 7 foram retiradas da Tabela 1 de Bica et al. 2001 [12].	39
3.2	Parâmetros obtidos para os campos, incluindo os valores de ascensão reta e declinação (J2000.0) correspondentes. . . . .	40
3.3	Espectros combinados que geraram os melhores ajustes. . . . .	52
3.4	Janelas espectrais para as bandas e linhas trabalhadas. . . . .	53
4.1	Observações dos 12 objetos estudados. Nomenclatura: A.A.: Andrea Ahumada; C.P.: Celeste Parisi D.P.: Daniela Pavani; J.S.: Jules Soares. . . . .	56
4.2	Tipo espectral do <i>turn-off</i> e as correspondentes idades. As colunas apresentam valores extraídos da Tabela 7 de Mermilliod (1981)[61]. . . . .	62
4.3	Idades correspondentes a cada tipo espectral do <i>TO</i> . Valores inferidos com base na tabela 3.10 de Binney J. & Merrifield M. (1998) [14] e as isócronas de Padova (Girardi et al. 2002)[42]. . . .	63
4.4	Idades e avermelhamentos para objetos estudados. . . . .	66
7.1	Principais parâmetros obtidos para os 23 candidatos a remanescentes e o aglomerado aberto NGC3680.	123
7.2	Desempenho dos objetos conforme o método utilizado. “apresentou perfil característico de objeto esparsos, porém possui $d < 1'$ . . . . .	126

# Capítulo 1

## Introdução

Entender os mecanismos de formação e evolução da Galáxia é um dos grandes desafios da Astronomia moderna que, desde muito tempo, vem despertando a curiosidade e instigando mentes. Não é difícil, aliás, compreendermos o porquê. Basta nos distanciarmos das grandes cidades modernas, que espalham luz artificial em todas as direções, e voltarmos nossos olhos em direção ao céu: em uma noite sem Lua, a olho nu, veremos a faixa de luz de aparência difusa que o atravessa de horizonte a horizonte, dando nome a nossa Galáxia: Via Láctea.

Foi a partir de Galileu, que em 1610 apontou seu telescópio para o céu, que passamos a entender melhor a natureza de nossa Galáxia. A faixa de luz revelou-se um grande número de estrelas débeis, cuja luz chega até nós com intensidade menor, não podendo assim serem resolvidas individualmente sem o uso de instrumentos. A partir de então, o estudo sistemático dos diversos objetos que povoam nosso céu passou a ser o caminho natural para a compreensão da estrutura e da história de formação da Via Láctea, além de ampliar constantemente as fronteiras de nosso Universo conhecido.

O estudo científico a respeito da Via Láctea teve grande impulso a partir do início do século XVIII. Thomas Wright<sup>1</sup> sugeriu que a grande faixa que cruza o céu seria um efeito ótico devido a nossa imersão em uma camada de estrelas. Influenciado por esse estudo, Immanuel Kant<sup>2</sup> avançou na compreensão dessa estrutura, mostrando como a Via Láctea, sendo um sistema de estrelas, poderia ser explicada considerando sua estrutura similar ao arranjo do Sistema Solar, mas em uma escala bem maior. Em seu estudo, entre outras coisas, Kant sugeriu que a Via Láctea poderia não ser o único sistema de estrelas e que algumas nebulosas - objetos aproximadamente elípticos com aparência difusa e emitindo uma luz débil - vistas no céu poderiam constituir universos-ilha. Tais objetos teriam estrutura similar à da Via Láctea, mas vistos a grandes distâncias e em diferentes ângulos de visada. Mais tarde, no final do século XVIII, com o aumento do poder dos telescópios, outros estudos sistemáticos a respeito das nebulosas foram realizados. Entre eles, incluí-se o de Charles Messier, que compilou em um catálogo 109 nebulosas brilhantes no céu do hemisfério norte. William Herschel buscou determinar o

---

<sup>1</sup>Ver comentário em *Review of Publications-An Original Theory or New Hypothesis of the Universe (1750)*, Wright, Thomas Of Durham; Hoskin, Michael A., *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. 66, p.280, 1972.

<sup>2</sup>Como relatado em *General Natural History and Theory of the Heavens*, 1905.

tamanho e a forma da Via-Lactea por meio de contagens de estrelas, chegando a catalogar aproximadamente 5000 nebulosas. A lista de Herschel foi constantemente ampliada ao longo do século XIX até que Dreyer (1888) [31] compilou 7840 objetos em seu *New General Catalog*. Mais tarde, o próprio autor complementou a lista com mais 5086 objetos, formando o *Index Catalog* (Dreyer 1895, 1908)[32, 33]. Na seqüência desses acontecimentos, estudos de Shapley & Shapley (1919)[78] tornaram clara a existência de um componente esferoidal na Galáxia, e a posição do Sol ficou basicamente determinada. Atualmente muitos dos objetos brilhantes não estelares (galáxias, aglomerados globulares e abertos de estrelas, etc) são identificados por seus números nos catálogos de Dreyer, precedidos pelas abreviaturas NGC ou IC. Da mesma forma, objetos proeminentes do céu do hemisfério norte ainda são freqüentemente descritos por seus números no catálogo Messier, como, por exemplo, a Galáxia Andrômeda, referida por M31.

O conhecimento, portanto, a respeito da Galáxia evoluiu. Hoje são consideradas três partes principais: o halo e o bojo (componentes esferoidais), e o disco. De uma maneira geral, podemos descrever tais estruturas como segue. O halo é aproximadamente esférico e sua densidade estelar é maior em direção ao centro Galáctico. As órbitas de seu diversos objetos podem ser muito excêntricas. O bojo é a estrutura central, de difícil observação, pois existe uma grande quantidade de poeira no disco que bloqueia a passagem da luz visível. Possui uma grande quantidade de estrelas: 1 milhão de vezes a densidade da vizinhança solar. De acordo com evidências observacionais e modelos, o bojo central poderia ter uma barra (Blitz & Spergel 1991)[15]. Quanto ao centro Galáctico, s pode ser observado através de ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, raio-x e raios gama. Ele abriga um buraco negro de 3,6 milhões de massas solares (Genzel et al. 2003)[40]. O disco ou plano Galáctico tem  $\sim 30$  kpc de diâmetro e distintas escalas de altura, que delimitam seus dois componentes estelares: o disco fino e o disco espesso. O disco fino é uma estrutura com escala de altura de  $\sim 0.35$  kpc; nele está bem definida a relação segundo a qual um crescimento nos valores da escala de altura e de dispersão de velocidades está associado à idade estelar. O disco espesso foi detectado através de contagem de estrelas (Gilmore & Reid 1983)[41] e possui uma escala de altura em torno de 1 kpc. O valor da dispersão vertical de velocidades no disco espesso é de 40-45 km/s. Sua distribuição de metalicidades apresenta um pico em  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$  dex, enquanto a do disco fino alcança um pico em  $-0.2$  dex (Wyse 1999)[89]. Os objetos e o gás que compõem o disco estão em rotação, sendo a distribuição do gás não é homogênea. Nas partes médias e externas do disco, formam-se regiões estreitas na qual a densidade do gás aumenta significativamente, formando os braços da estrutura espiral de nossa Galáxia. Os braços espirais - perturbações que geram ondas de densidade comprimindo o gás e gerando nuvens moleculares e regiões HII - possuem grande atividade de formação estelar. A explicação das estruturas espirais foi inicialmente sugerida por B. Lindblad e construída matematicamente por Lin & Shu (1967)[54].

Na Via Láctea, os objetos são classificados em populações estelares, descrição inicialmente desenvolvida por Baade (1944)[4]. A classificação das populações leva em conta idades, distância ao plano da Galáxia, órbitas e composição química. Essa classificação evoluiu até os dias atuais, chegando à População II do Halo (subanãs, aglomerados globulares pobres em metais, estrelas RR Lyrae com  $P > 0,4$  dias); População II do Bojo

(aglomerados globulares ricos em metais, estrelas gigantes do bojo); População Intermediária II do Disco Espesso (objetos que apresentam cinemática e distribuição de abundância química entre os valores correspondentes encontrados no halo e no disco fino, como o sistema de aglomerados globulares do disco); População Intermediária I do Disco Fino (nebulosas planetárias, novas, estrelas gigantes vermelhas, aglomerados abertos evoluídos); População I Jovem, que está associada a gás, poeira e braços espirais (por exemplo, estrelas OB e supergigantes), incluindo também estrelas pré-seqüência principal (T Tau) e aglomerados abertos embebidos.

No estudo da Galáxia, a região de 1 kpc em torno do Sol, denominada vizinhança solar, é de fundamental importância. Certas estrelas, intrinsecamente muito débeis, só podem ser vistas nessa região. Além disso, é a região mais próxima a nós e de fácil observação. Com seu estudo, busca-se lançar as bases para entender a Via Láctea em grande escala.

A compreensão da evolução química da Via Láctea é fundamental para o melhor entendimento da sua formação e evolução como um todo. Isso porque os modelos que buscam explicar os processos que levaram a formação das estruturas como o halo, bojo, discos fino e espesso estão relacionados com a metalicidade. A distribuição de abundâncias químicas (ou metalicidades) ao longo do raio Galáctico, denominado gradiente radial de abundância química, é definido entre outras variáveis, pela taxa de formação estelar, a função de massa inicial, a produção relativa de elementos, a homogeneidade do meio interestelar e o fluxo radial de entrada ou saída de gás. Para dar uma dimensão do papel desempenhado pela metalicidade e a história de enriquecimento químico no melhor entendimento da formação da Galáxia podemos citar o trabalho de Eggen, Lynden & Sandage (1962)[34] que influenciou profundamente esse tema. A partir do estudo das órbitas das estrelas da vizinhança solar para as quais velocidades espaciais tinham sido bem determinadas, os autores reformularam a conclusão clássica de que as estrelas de alta velocidades próximas ao Sol tenderiam a ser pobres em metais. Eles propuseram que as excentricidades ( $e$ ), as energias de oscilação vertical ( $E_z$ ) e o momento angular ( $L_z$ ) de seus modelos orbitais estavam correlacionados com a metalicidade no sentido de que as metalicidades decrescem a partir do valor solar,  $e$  e  $E_z$  crescem, enquanto  $L_z$  decresce. Dessas correlações Eggen e colaboradores inferiram que a Via Láctea ou teve uma história violenta, ou a maioria das estrelas de baixa metalicidade não teriam se formado em um disco suportado centrifugamente. A partir dos argumentos que sustentavam essa afirmação os autores propuseram um cenário em que a Galáxia teria se formado de uma nuvem protogaláctica girante aproximadamente esférica, inicialmente pobre em metais e aproximadamente em queda livre. No colapso, para conservar seu momento angular, a nuvem aumentou a sua taxa de velocidade de giro e, em consequência, formaram-se as estrelas pobre em metais e os aglomerados globulares do halo. Mais adiante outros autores propuseram cenários distintos, estando atualmente o proposto por Eggen superado<sup>3</sup>. A utilização de gradientes de abundância química observados no disco estão, dessa forma, entre os principais vínculos para modelamento da evolução química da Galáxia. A magnitude dos gradientes pode ser obtida por meio de diversos objetos,

---

<sup>3</sup>Para maiores detalhes ver Galactic Astronomy/ James Binney e Michael Merrifield, pg. 684-690. Princeton series in astrophysics.

tais como regiões HII, estrelas *early type*<sup>4</sup>, nebulosas planetárias e aglomerados abertos. Podemos citar recentes pesquisas de Deharveng et al. (2000)[24] , Andrievsky et al. (2004)[3] , Friel et al. (2002)[39] e Maciel et al. (2003)[57] para regiões HII, variáveis cefeidas, aglomerados abertos e nebulosas planetárias, respectivamente. Valores médios encontrados estão geralmente dentro da faixa de -0.04 a -0.10 dex/kpc para as melhores razões de elementos observados, que são O/H e S/H em nebulosas planetárias e Fe/H em estrelas.

O estudo de gradientes envolve não somente a determinação de magnitudes, mas também a de possíveis variações espaciais e temporais. Para ambas variações, ainda persistem várias questões a serem respondidas. No que diz respeito a variações espaciais, alguns trabalhos indicam um achatamento do gradiente de abundância a grandes distâncias Galatocêntricas. Isso foi mostrado por Maciel & Quizera (1999)[56] através de uma amostra de nebulosas planetárias Galácticas e, mais recentemente, por Costa et al. (2004)[23] através de um estudo de nebulosas localizadas na direção do anticentro Galáctico. Resultados semelhantes são encontrados a partir de investigações de regiões HII. Por outro lado, nenhum achatamento é encontrado em trabalhos recentes com estrelas O e B do disco Galáctico (Smart 2000) [82] ou nebulosas planetárias (Henry et al. 2004)[43]. Neste último caso, achatamentos de gradientes já foram determinados. Já a evolução temporal de gradientes vem sendo um vínculo essencial em vários e recentes modelos de evolução química (Tosi 2000, Hou et al. 2000, Alibés et al. 2001, Chiappini et al. 2001)[86, 45, 1, 21].

## 1.1 Aglomerados Estelares

Entre os diversos objetos de nossa Galáxia, os aglomerados estelares assumem destacado papel. Para estudá-los, podemos empregar técnicas observacionais e/ou teóricas, como simulações de N-corpos que visam entender sua origem, evolução e processos dinâmicos. Os aglomerados globulares, por exemplo, foram fundamentais na determinação do centro Galáctico e no estabelecimento da existência do halo. As estrelas em aglomerados embebidos em nuvens moleculares são fonte de importante informação para a investigação da evolução de discos circumstelares e para a compreensão da origem de sistemas planetários (Lada & Lada 2003)[53]. Já os abertos são importantes traçadores da formação estelar e da estrutura espiral no disco Galáctico.

Podemos definir um aglomerado estelar como um sistema de estrelas com estrutura núcleo/halo. O núcleo está em geral ligado gravitacionalmente e o halo perde estrelas para o campo Galáctico após ocorrer segregação de massa. Segundo a estrutura, idade, cinemática, o número de estrelas que os compõem e a distribuição espacial em relação ao núcleo Galáctico, os aglomerados podem ser classificados em abertos e globulares.

Aglomerados abertos e globulares fornecem uma ampla visão dos processos de formação e evolução estelar. Em ambos, a formação estelar ocorreu de forma mais ou menos simultânea a partir de sua nuvem molecular progenitora. Eles contêm uma significativa amostra de estrelas em um amplo espectro de massa com a mesma origem e concentrados em um pequeno volume. Nesse sentido, constituem, pois, importantes laboratórios

---

<sup>4</sup>*early-type*: estrelas quentes e luminosas de tipo espectral O, B, A, e F0 ao F5. *late-type*: estrela do tipo espectral K, M, S, ou C, com uma temperatura superficial mais baixa que a do Sol.

astrofísicos.

A hipótese mais aceita para os aglomerados globulares é a de que sua formação se deu a partir de nuvens moleculares gigantes com  $\sim 10^8 M_\odot$ . Eles apresentam uma forma esférica ou de um elipsóide ligeiramente achatado, onde a densidade estelar cresce das regiões externas em direção ao centro. O número de estrelas pode atingir centenas de milhares de estrelas (estima-se em cinquenta mil a cem mil o número de estrelas do aglomerado M13). Avalia-se a massa total de um aglomerado globular, por exemplo, pela dispersão na velocidade radial de suas estrelas. Encontram-se assim valores típicos da ordem de  $10^5 M_\odot$  massas solares. As estrelas que compõem tais aglomerados constituem a parte mais antiga da Galáxia. A abundância de metais nos globulares situados no halo é pequena: apenas 1/200 a 1/5 da abundância no Sol; já aqueles situados no bojo atingem a metalicidade solar (Barbuy et al. 1998)[5].

Quanto à sua origem, resultados recentes indicam que os globulares formariam dois subsistemas distintos. O primeiro deles seria composto por globulares do halo velho e do bojo/disco, sendo nativos, em sua maioria, da Galáxia e tendo se formado concomitantemente com o componente esferoidal. O segundo englobaria os globulares jovens do halo, além de alguns objetos do halo velho, tendo sido acretados à Galáxia através de eventos de mistura (*merger*), tais como os observados na galáxia anã de Sagitário (Mackey & Gilmore 2003)[59].

## 1.2 Aglomerados Abertos

Os aglomerados abertos são formados continuamente e por isso são encontrados em distintas faixas de idade. Existem também aqueles considerados os progenitores dos abertos, os aglomerados embebidos.

### 1.2.1 Aglomerados Embebidos

Nos últimos anos, pode-se dizer que uma nova classe de aglomerados passou a ser sistematicamente estudada - os embebidos - como consequência do desenvolvimento de detectores infravermelhos.

Os embebidos nascem imersos em nuvens moleculares gigantes e, durante sua formação e evolução, são visíveis no infravermelho, pois estão fortemente obscurecidos por poeira. Lada & Lada (2003)[53] estimaram a taxa de nascimento para aglomerados embebidos dentro de 2 kpc do Sol. Esta excede o número de aglomerados abertos observados no ótico por ordem de uma magnitude ou mais, indicando que há uma alta taxa de mortalidade dos embebidos. Segundo os autores, menos de 4-7 % dos aglomerados embebidos sobrevivem para emergir de sua nuvem molecular e tornarem-se aglomerados da idade das Pleiades.

### 1.2.2 Aglomerados Abertos propriamente ditos

Os aglomerados abertos são formados ao longo do plano Galáctico e a massa de sua nuvem progenitora pode variar entre  $10^4$  e  $10^6 M_\odot$ . Eles contêm desde dezenas a algumas centenas de estrelas, em alguns casos milhares, distribuídas em uma estrutura com alguns parsecs de raio. O estudo da distribuição espacial dos aglomerados

abertos - sua idade, processo de formação, evolução dinâmica e dissolução - pode fornecer importantes testes sobre a evolução estelar, a formação e a evolução do disco Galáctico. Entre os abertos, os velhos com idades próximas às das Hyades (700 Myr), ou ainda mais velhos, fornecem importantes informações sobre a componente mais evoluída do disco Galáctico. Dados fotométricos e espectroscópicos fornecem informações sobre idades, abundâncias e cinemática que clarificam as relações entre aglomerados abertos velhos e outras populações Galácticas. O estudo em faixas cada vez maiores em distâncias e idades tem sido usado para explorar possíveis gradientes de abundâncias e a relação entre idade e abundância de aglomerados. Tal estudo aponta para uma complexa história do enriquecimento químico e mistura do disco (Friel 1995)[37].

Em Friel (2002)[39], encontramos um apanhado dos principais resultados, presentes na literatura, envolvendo aglomerados abertos. A projeção sobre o plano Galáctico da distribuição espacial dos abertos evidencia diferenças entre a distribuição de jovens e velhos. Os jovens são encontrados no plano do disco, ao passo que os velhos ( $> 700$  Myr) são encontrados somente a mais de 7 kpc do centro Galáctico. É interessante notar que encontramos globulares do disco nas regiões internas, onde não encontramos os abertos velhos. Já a distribuição cumulativa de idades para a população de abertos conhecida, indica duas populações com diferentes tempos de vida característicos: uma grande população com idade típica de 200 Myr, e outra, muito menor mas substancial, com 3 a 5 Gyr (Janes & Phelps, 1994)[48].

O delicado balanço entre efeitos que competem para a formação e a destruição de aglomerados abertos produz a população característica desses objetos que vemos hoje. Conhecer em detalhes essa população é uma tentativa de quantificar tais efeitos. Assim, segundo Friel, devemos considerar como as condições iniciais (por exemplo, propriedades das nuvens), os eventos de perda ou acreção e/ou ou propriedades intrínsecas dos aglomerados (massa e densidade central, órbitas características) combinam-se para produzir a população de abertos atual e como eles mudaram ao longo do tempo de vida da Galáxia. Sabemos que aglomerados são destruídos no tempo tanto pela ação de forças internas (perda de massa através da evolução dinâmica e evolução estelar) quanto por forças externas, como interações com o campo da Galáxia ou nuvens moleculares. Portanto, para o conhecimento completo dos aglomerados e para o uso dos mesmos como indicadores da evolução e da estrutura Galáctica, precisamos conhecer a importância dos diversos efeitos já citados.

Para verificar e quantificar a dependência do tempo de vida de um aberto com a massa, diversos autores têm lançado mão de dados cinemáticos em simulações de N-corpos. Como resultado passamos a compreender melhor como vários efeitos, tais como, localização orbital, massa e estrutura interna estão relacionados com a sobrevivência de um aglomerado aberto. Nesse sentido, combinando resultados de Hsu et al. (1996)[46] com os de Terlevich (1987)[85] e de la Fuente Marcos (1995, 1996, 1997, 1998)[25, 26, 27, 28], podemos fazer algumas observações gerais. Abertos pequenos e pobremente povoados são os primeiros a se dissolverem a partir de efeitos dinâmicos internos, na ordem de alguns milhões de anos, e explicam a maior parte da população de abertos. Para estes aglomerados não parece haver relação entre a taxa de dissolução e a localização na Galáxia. Em outras palavras, efeitos dinâmicos internos se sobrepõem a efeitos externos no que tange à dissolução dessa

população. Para ricos e massivos, os efeitos do campo Galáctico tornam-se significativos, sendo controlados pela massa do aglomerado. Aqueles com massa intermediária ( $\sim 500 a 1000 M_{\odot}$ ) podem sobreviver alguns bilhões de anos, se residirem nas regiões externas do disco (por exemplo, NGC752 e NGC3680). Aglomerados que sobrevivem mais que apenas alguns bilhões de anos devem ser muito mais massivos que o “normal” (NGC6791), ou então devem estar localizados exclusivamente em regiões externas do disco Galáctico (NGC188), ou ambos (Friel 2002)[39].

No que diz respeito a abundâncias químicas em abertos, podemos citar estudos de Friel et al. (2002)[39] e Maciel et al. (2005)[58]. O primeiro estudo encontrou um gradiente de abundância de  $-0.06 \pm 0.1$  dex/kpc sobre uma faixa em raio Galatocêntrico de 7 a 16 kpc. Os autores encontraram uma fraca indicação de inclinação do gradiente de abundância com o aumento da idade dos aglomerados abertos da amostra, porém tal resultado é limitado por uma restrita escala na distância para os aglomerados mais jovens. Entretanto, encontraram resultado consistente com a inclinação quando analisaram abertos localizado além de 10 kpc. Na vizinhança solar, os abertos não mostraram correlação entre idade e metalicidade. De uma maneira geral, pode-se dizer que a amostra estudada mostra um claro decréscimo da metalicidade do disco com a distância e uma falha na relação entre idade dos abertos e sua metalicidade na vizinhança solar. No mínimo, para abertos, pode-se afirmar que o local de formação é mais importante que a idade na determinação da abundâncias. No segundo trabalho, os autores constataram que o gradiente de  $[Fe/H]$  medido em aglomerados abertos sustenta fortemente um achatamento no tempo do gradiente de abundância obtido a partir de medidas de  $O/H$  e  $S/H$  de nebulosas planetárias.

### 1.3 Remanescentes de Aglomerados Abertos

Em uma busca em imagens do céu através, por exemplo, de mapas *DSS* ou *XDSS* (*Digitized Sky Survey*) os aglomerados abertos podem em geral ser identificados através do contraste visual de densidade de estrelas que excede à do fundo do céu. Porém, além dos abertos, encontramos grupos de estrelas espalhados por diversas regiões do céu, cuja identificação torna-se difícil se levarmos em conta somente sua aparência. Ao buscarmos por aglomerados abertos, podemos encontrar seus resíduos finais, associações, partes de associações e sistemas múltiplos de estrelas, ou ainda efeitos não-físicos, como flutuações de campo. Como consequência, nos catálogos encontramos concentrações pouco povoadas ou com baixas densidades de estrelas, as quais podem ser de natureza diversa. Um exemplo são os grupos de estrelas bem jovens, as associações, usualmente identificadas a partir das propriedades das estrelas da seqüência principal superior, e das estrelas em estágios pré-seqüência principal: as T Tauri. De acordo com o tipo, elas são chamadas de associações OB ou T Tau. As associações rapidamente se dispersam, pois o pequeno número de estrelas envolvido não é suficiente para manter o equilíbrio do sistema e contrabalançar a ação das forças internas, para que as estrelas permaneçam unidas por um longo período. Dessa forma, torna-se fundamental sermos capazes de distinguir os objetos encontrados e, em sendo abertos,

identificar em que estágio da evolução estão, o que não é de modo algum trivial.

Na seção 1.2, vimos que as forças internas e externas que agem sobre os abertos conduzem sua evolução no tempo e podem levá-los à dissolução. Assim, por exemplo, a dissolução pode ocorrer por efeitos externos como uma ou mais passagens próximas a nuvens moleculares e/ou choques com o disco Galáctico (Wielen 1971)[88]. Portegies et al. (2002)[70] confirmam tal fato ao mostrar que aglomerados abertos localizados dentro de 150 pc a partir do centro Galáctico podem se dissolver em  $\sim 50$  Myr. Já Bergond et al. (2001)[8] apontam que na vizinhança solar a maioria dos abertos evaporam completamente em menos de 1 Gyr. A despeito desses resultados, podemos encontrar objetos mais velhos: no catálogo de aglomerados abertos de Lyngå(1987)[55] existem 70 objetos mais velhos que 1 Gyr, correspondendo a 6% do total do mesmo.

Abertos evoluem dinamicamente e como os diversos efeitos que levam a perda de estrelas podem conduzi-los a dissolução, é de se esperar que existam seus resíduos finais, que têm recebido a denominação de aglomerado aberto remanescente. Assim, esses objetos, ao corresponderem aos estágios finais da evolução de aglomerados abertos apresentam as características que definem os abertos levadas ao extremo. O número de objetos na Via Láctea é provavelmente muito maior do que o já catalogado, e suscita várias questões, tais como: há um local preferencial na Galáxia onde possamos encontrá-los? É possível detectá-los?

Para respondermos as questões propostas é necessário entendermos as modificações sofridas por um aglomerado aberto ao longo de sua evolução dinâmica. Os efeitos dinâmicos internos que agem sobre um aberto estão relacionados a evaporação de massa, essa é causada por três efeitos (Elson et al. 1987)[35]: (i) escape de estrelas fracamente ligadas, que ganham energia através de choques internos de dois corpos e/ou de perturbações externas; (ii) escape de estrelas lançadas do aglomerado por espalhamento de três ou quatro corpos envolvendo binárias; e (iii) perda de massa durante a evolução estelar. Assim a segregação de massa tem origem na equipartição de energia através da relaxação de dois corpos que redistribui a energia dos encontros estelares, permitindo a migração das estrelas mais massivas para o centro do aglomerado. Na região central de aglomerados mais evoluídos, por exemplo, a segregação de massa deve erodir a baixa seqüência principal, criando um núcleo rico em estrelas gigantes (Takahashi & Portegies Zwart 2000)[70].

Para os estágios finais, simulações numéricas de de la Fuente Marcos (1997, 1998)[27, 28] e Terlevich (1987)[85] mostraram que a composição final de remanescentes depende de sua função inicial de massa, fração de binárias primordiais, distância Galatocêntrica e massa total. As simulações mostraram também que existe uma forte dependência entre a escala de tempo para a dissolução do aglomerado e a evaporação de massa estelar. Os remanescentes resultantes desses estudos, são ricos em binárias e podem não conter objetos colapsados (estrelas anãs brancas ou de nêutrons), já que estes podem ser segregados e perderem-se para o campo Galáctico. Portegies Zwart et al. (2002)[84], entre outros, destacam a importância das binárias na evolução dinâmica do aglomerado. Do ponto de vista teórico, chegou-se à conclusão que binárias primordiais podem dominar estágios iniciais da evolução dinâmica de aglomerados (de La Fuente Marcos 1998 e referências lá citadas)[28]. Apesar de terem uma massa maior do que a massa média das estrelas em um aglomerado, as

massas das binárias não permanecem constantes ao longo de sua existência. A perda de massa devido à evolução estelar, as colisões estelares e a troca de massa entre as componentes pode alterar significativamente a órbita da binária ou mesmo separá-la. Por exemplo, binárias primordiais, as quais são muito próximas, poderão ser modificadas ou até separadas por mecanismos como a perda ou a transferência de massa durante a evolução da primária da seqüência principal para o ramo das gigantes. Em consequência de sua natureza relativamente massiva, binárias tendem a ocupar regiões internas dos aglomerados, podendo uma mudanças em seus parâmetros físicos (massa é o mais importante), desse modo, afetar significativamente toda a evolução dinâmica do sistema. Ainda segundo de la Fuente Marcos, podemos esperar que remanescentes de aglomerados ricamente povoados tenham como sobreviventes preferenciais binárias em que ambos componentes sejam estrelas de baixa massa - estrelas *late-type*. Isso porque a escala de tempo para a dissolução dos aglomerados, nesse caso dominada por efeitos dinâmicos externos, é maior que a escala de tempo característico para a perda de massa pela evolução estelar. Entretanto, para aglomerados pouco povoados, a escala de tempo de dissolução, dominada por efeitos dinâmicos internos, pode ser significativamente menor que o tempo de evolução estelar, mesmo no caso de estrelas moderadamente massivas. Dessa forma, remanescentes de aglomerados pouco povoados seriam relativamente fáceis de serem identificados porque conteriam estrelas *early-type*. Já os remanescentes de aglomerados muito povoados poderiam ser de mais difícil detecção, pois conteriam somente estrelas mais débeis.

Do ponto de vista observacional, um remanescente de aglomerado aberto pode ser definido como uma concentração pouco povoada de estrelas resultante da evolução dinâmica de um sistema inicialmente mais massivo (Pavani et al. 2001)[67]. Apesar do avanço no conhecimento teórico desses objetos e da busca, nos últimos anos, pela identificação observacional dos mesmos ter aumentado, muitas questões permanecem em aberto, gerando debate. Nesse sentido, podemos destacar, por exemplo, NGC 6994 (M73), que foi interpretado tanto como um possível remanescente de aglomerado aberto velho quanto como uma flutuação randômica da densidade de estrelas na direção do objeto (Bassino et al. 2000; Carraro 2000; Ordenkirchen & Soubiran 2002)[6, 19, 65]. Bassino e colaboradores empregaram em sua análise espectros de alta resolução das estrelas brilhantes, velocidades radiais, parâmetros atmosféricos e movimentos próprios. Por outro lado, Carraro lançou mão de estudos da densidade estelar na região do objeto a partir de fotometria Johnson nas bandas B, V e I, enquanto Ordenkirchen utilizou espectros de alta resolução de 6 estrelas brilhantes.

Bica et al. (2001)[12], por sua vez, apresentaram uma amostra com 34 possíveis remanescentes de aglomerados abertos. Estes se localizam a latitudes Galácticas relativamente altas ( $|b| > 15^\circ$ ) e possuem um número menor de estrelas quando comparadas a aglomerados usuais; porém, em contrapartida, apresentam um significativo contraste de densidade em número de estrelas mais brilhantes em relação ao campo Galáctico. É preciso salientar que alguns desses objetos já foram estudados em detalhes. Entre eles, estão NGC1252 e NGC1901 (Pavani et al. 2001)[67]: o primeiro concluído como sendo um possível remanescente a 0,64 kpc do Sol, de  $3 \pm 1$  Gyrs; o segundo como sendo um sistema físico dinamicamente comparável às Hyades, a 0,45 kpc do Sol e com uma idade de  $0,6 \pm 0.1$  Gyr. Ambos foram estudados a partir de fotometria nas bandas B e V, movimentos

próprios disponíveis do Catálogo Tycho e comparações entre os diagramas cor-magnitude (a partir daqui mencionada pela sigla em inglês, CMD) dos objetos e diagramas teóricos do campo Galáctico na direção dos mesmos. Da amostra citada, NGC7772 foi estudado em conjunto com NGC7036 (Carraro 2002)[20]. Ambos objetos são apontados como remanescentes: o primeiro localizado a 1 kpc do Sol, com 14 membros e uma idade de 1,5 Gyr, e o segundo com 17 membros a 1 kpc do Sol e um raio de núcleo de 3-4 minutos de arco, com uma idade de 3-4 Gyr. Carraro utilizou fotometria UBVI para construção de diagramas cor-cor e CMD's, contagens de estrelas para obtenção do perfil de densidade em número de estrelas. Na literatura recente, encontramos ainda o trabalho de Baume, Villanova e Carraro (2003)[7], no qual NGC1663 é apresentado como um remanescente de 200 Myr e 0.7 kpc do Sol e NGC1582 como um muito pobre, extenso e contaminado aglomerado aberto. Nessa análise foram empregadas fotometria  $UBV(I)_c$ , espectros de alta resolução das estrelas brilhantes, fotometria no infravermelho próximo do Catálogo Two Micron All-Sky Survey (2MASS) e movimentos próprios do Catálogo Tycho-2. No mesmo ano, Pavani et al. (2003)[68] apresentaram Ruprecht 3 como um possível remanescente a 0,72 kpc do Sol e  $1.5 \pm 0.5$  Gyr, utilizando para isso dados fotométricos nas bandas J e H, espectroscopia integrada e de estrelas individuais e métodos estatísticos para a subtração de estrelas de campo no CMD. Bonatto et al. (2004)[16] apresentaram NGC2180 como sendo um provável representante ou elo entre o estágio de aglomerado aberto evolução e remanescente. Em sua análise, foi empregada fotometria J e H a partir da qual uma série de parâmetros estruturais foram obtidos, tais como: função de massa, de luminosidade, raio limite e raio de núcleo. Comparações também foram feitas com outros bem conhecidos aglomerados abertos: M67, NGC3680, NGC188 e possíveis remanescentes encontrados na literatura. A partir destas, verificou-se que o objeto possui uma função de luminosidade cuja estrutura é achatada e erodida, indicando a ocorrência de segregação de massa e evaporação. Foi obtida para NGC2180 uma idade de  $700 \pm 70$  Myr, distância ao Sol de  $0,91 \pm 0,08$  kpc e massa estelar observada  $m_{obs} \sim 47M_{\odot}$ .

Do exposto até aqui, verifica-se que vem sendo ampliado o conhecimento teórico dos mecanismos que influenciam a evolução final dos aglomerados abertos, assim como a identificação de seus prováveis remanescentes. Tal fato mostra a atualidade desse debate e sua pertinência. Do ponto de vista observacional, há um grande número de objetos a serem estudados, e o presente trabalho visa contribuir nesse sentido.

## 1.4 Diagramas Cor-Magnitude

Os diagramas cor-magnitude (CMD's) constituem importante método de análise de estrelas e especialmente de aglomerados abertos e seus remanescentes. A partir deles, é possível obterem-se parâmetros fundamentais, tais como: módulo de distância, avermelhamento e idade; ou seja, através dos CMD's, pode-se identificar as estrelas em seus diferentes estágios evolutivos e ainda comparar posições de estrelas na direção do objeto com as daquelas do campo, o que auxilia na determinação da pertinência da estrela em relação ao objeto.

O CMD apresenta a magnitude absoluta ou aparente versus o índice de cor, sendo esta a principal diferença

em relação ao Diagrama H-R. Este último apresenta medidas de magnitude visual absoluta versus tipo espectral das estrelas e foi obtido pela primeira vez de maneira independente, no início do século passado, por Ejnar Hertzsprung e Henry N. Russell, que construíram tais gráficos com estrelas conhecidas.

Ao construirmos um diagrama H-R para as estrelas conhecidas da vizinhança solar vemos as principais etapas evolutivas pelas quais as estrelas podem passar ao longo de sua evolução. Na figura 1.1 podemos identificar os três agrupamentos principais. A Sequência Principal (MS), que contém 90% das estrelas, e as que nela se encontram apresentam como característica marcante o fato de a massa crescer no mesmo sentido da luminosidade. Para as estrelas da MS a massa determina o ritmo de vida. É nessa etapa evolutiva que as estrelas passam a maior parte de suas vidas, e por conseqüência é o agrupamento mais populoso. O segundo agrupamento é composto por estrelas gigantes e supergigantes azuis e vermelhas. Para uma estrela, quanto maior a luminosidade maior o raio, mantendo a temperatura constante. As estrelas nessa etapa evolutiva são, portanto, muito maiores em raio e mais luminosas, que as localizadas na MS. O terceiro agrupamento é composto por estrelas pouco luminosas. Seus raios são menores que aqueles das estrelas da MS. Devido aos raios menores e por apresentarem temperaturas próximas a 10000 k, são chamadas de anãs brancas.

As estrelas da MS, a exemplo do Sol, têm como fonte energética a fusão do hidrogênio. Da energia que pode ser extraída das cadeias de fusão nuclear, desde o hidrogênio até o ferro, a maior parte é obtida na primeira etapa,  $H \rightarrow He$ . A MS é justamente a região no diagrama H-R na qual as estrelas caracterizam-se por queimar hidrogênio no núcleo. As demais regiões no diagrama correspondem a outras fases na vida das estrelas, onde a energia disponível é muito menor <sup>5</sup>.

No caso de um aglomerado em que as estrelas se formam a partir da mesma nuvem molecular progenitora, todas têm essencialmente a mesma idade. Um aglomerado muito jovem terá um diagrama H-R com estrelas T-Tauri evoluindo para a MS. Já outro com idade em torno de 100 Myr, terá suas estrelas luminosas ainda na MS. A medida que o tempo passa, as estrelas de maior massa, no topo da MS, evoluem e se tornam supergigantes vermelhas. Dessa forma, quanto mais velho o aglomerado, menor a extensão da parte superior da MS, sendo maior o número de estrelas gigantes ou supergigantes na parte superior direita do diagrama. Em um dado ponto da vida do aglomerado, as estrelas que estão saindo da MS são as estrelas cujo tempo de vida na MS coincide com a idade do aglomerado (Shu 1982)[79]. Pode-se assim estimar a idade de um aglomerado através do ponto de inflexão ou *turn-off* (TO) - ponto em que as estrelas do aglomerado estão saindo da MS, pelo do esgotamento do hidrogênio no núcleo.

Esse efeito de mudanças em um H-R, ou CMD, com a idade do aglomerado é um instrumento poderoso para os modelos de evolução estelar. Deles podem resultar CMD's teóricos para diferentes idades. Os CMD's observados dos aglomerados podem, então, ser confrontados com as previsões do modelo, permitindo, desse modo, testar a validade deste último e, em última análise, de nossa compreensão de como estrelas evoluem e dos processos físicos em seus interiores que causam essa evolução. De modelos de evolução estelar são também

---

<sup>5</sup>Para mais detalhes ver em Astronomia: Uma visão geral do Universo. 2ed.-São Paulo:Editora da Universidade de São Paulo, 2003. Do mesmo livro, página 152, é reproduzida a 1.1.

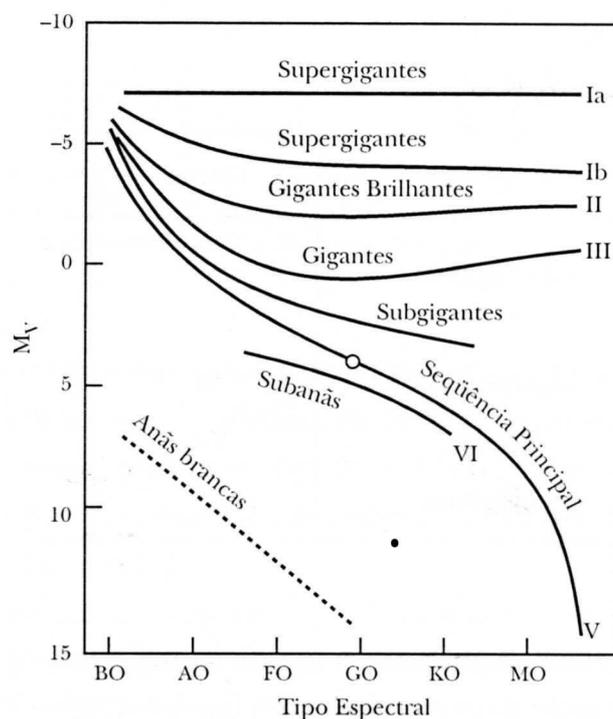


Figura 1.1: Seqüências evolutivas no diagrama H-R.

obtidas curvas de idades, chamadas isócronas. O termo vem do grego "ao mesmo tempo" e corresponde a uma curva conectando todas as estrelas de uma dada população no CMD. A isócrona representa o instantâneo das propriedades dessa população, quando todas as estrelas tem a mesma idade. De uma maneira geral, podemos descrever a construção de isócronas como segue. Para cada modelo de evolução estelar que se deseja estudar são feitas escolhas de abundâncias químicas iniciais para os elementos químicos em uma população estelar a qual se deseja reproduzir. A partir dessas escolhas são realizados cálculos para estrutura estelar, de acordo com as cadeias de fusão nuclear adequadas. Leva-se em conta a evolução no tempo da população através da resolução, repetidas vezes, de equações para cada estrela, buscando reproduzir as mudanças sofridas pelos elementos químicos em função das reações de fusão. Para cada intervalo de tempo é necessário calcular a luminosidade e a cor para todas as estrelas da população. Os trabalhos de Bressan (1993)[17], Bertelli et al. (1994)[9], Chiosi et al. (1997)[22], Girardi et al.(2002)[42], entre outros, fornecem um panorama geral a respeito dos modelos e parâmetros utilizados para a construção de isócronas. Através do ajuste de isócronas ao CMD observado de um aglomerado, podemos inferir a idade do mesmo. Para obtermos um bom ajuste é importante ter-se um ou mais parâmetros independentes que auxiliem na escolha das isócronas que serão testadas, devido ao fato da distância, metalicidade e avermelhamento estarem degenerados em um CMD.

Pelo fato de todas as estrelas em um aglomerado estarem aproximadamente a mesma distância (isto é válido para aglomerados cujas distâncias são bem maiores que o seus diâmetros), as diferenças de magnitude são intrínsecas, ou seja, refletem diferenças reais de brilho entre as estrelas do aglomerado. Esse fato é bastante

útil, pois permite construir o CMD do aglomerado e estudar a relação entre suas estrelas sem a preocupação de conhecer a distância. Quando os efeitos de extinção interestelar são importantes, é preciso obter primeiramente as cores intrínsecas das estrelas, desavermelhando as magnitudes e as cores dos objetos antes de determinar o módulo de distância. Determina-se a extinção visual a partir do excesso de cor, e corrige-se as magnitudes e os índices de cor das estrelas do objeto que está sendo estudado.

Ao longo dos próximos capítulos, são estudados 23 candidatos a remanescentes de aglomerado aberto através de dados fotométricos, espectroscópicos e de movimentos próprios. Esses dados fornecem informações sobre os objetos e seus campos, além de idades, avermelhamentos, distâncias e cinemática. Com tais informações, buscamos estabelecer critérios de definição de remanescentes de aglomerados abertos, sem deixar de levar em conta, evidentemente, incertezas observacionais. O objetivo deste trabalho de pesquisa é pois, contribuir para uma melhor compreensão da evolução dos aglomerados abertos e dos subsistemas de abertos quanto às suas posições na Galáxia, idades e propriedades cinemáticas.

## Capítulo 2

# Seleção e análise inicial dos objetos

A seleção de candidatos a remanescentes de aglomerados abertos para estudo teve como base concentrações estelares já classificadas como aglomerados abertos, apresentando apenas uma única exceção. Os objetos foram escolhidos a partir de uma lista construída por Eduardo Bica de concentrações pobremente povoadas, pertencentes a catálogos (Alter et al. 1980 [2], Lyngå1987 [55]), por meio de contraste visual de estrelas em relação ao fundo do céu.

A amostra contém 23 objetos. Destes, 5 constam em publicações recentes: NGC 1663 é apresentado como um remanescente por Baume, Villanova & Carraro (2003)[7], sendo seu estudo aqui ampliado; Ruprecht 3 é um dos primeiros objetos estudados durante o desenvolvimento desta tese, tendo resultados preliminares já publicados (Pavani et al. 2003 [68]); NGC 1252 e NGC 1901 (Bica et al. 2001, Pavani et al. 2001)[12], [67] são estudados em minha dissertação de mestrado; finalmente, NGC 6994 (Bassino et al. 2000; Carraro 2000; Ordenkirchen & Soubiran 2002)[6, 19, 65] é aqui rediscutido.

Para esse estudo, foram adotados os seguintes critérios de seleção: (i) objetos pobremente povoados com contraste visual de estrelas, já catalogados; (ii) objetos compactos para espectroscopia integrada e (iii) objetos esparsos para espectroscopia individual de estrelas. Entre aqueles selecionados inicialmente, deu-se preferência aos que apresentaram uma distribuição no CMD favorável há existência de seqüências evolutivas. Sempre que possível, buscamos altas latitudes Galácticas para evitar contaminação por estrelas do disco Galáctico. Ainda entre os 23 candidatos da amostra, é preciso salientar que 10 constam na lista de 34 candidatos a remanescentes de aglomerados abertos de Bica et al. (2001)[12], onde densidades em número de estrelas brilhantes foram calculadas e comparadas com as de campos correspondentes, apresentando significativo contraste.

No presente estudo, o aglomerado aberto NGC 3680 tem o papel de objeto de comparação. Seu estágio evolutivo aproxima-se em muitos aspectos daquilo que se espera para remanescentes de aglomerados abertos, pois já passou pelas etapas de equipartição de energia e segregação de massa que causam erosão da baixa MS (Bonatto et al. 2004[16]).

Nas próximas seções, veremos os métodos empregados nesta pesquisa, bem como a origem dos dados fo-

tométricos, espectroscópicos e cinemáticos. Além disso, explicaremos como foram classificados os objetos da amostra, concluindo, por fim, com um estudo estrutural dos mesmos.

## 2.1 Métodos e Fontes de Dados

Na literatura sobre possíveis aglomerados abertos remanescentes, vemos que os principais métodos utilizados são estudos fotométricos e espectroscópicos em diferentes bandas e além de movimentos próprios. A partir da fotometria, obtêm-se CMD's, funções de luminosidade e massa, além de perfis de densidade em número de estrelas. Dos espectros, entre outros, resultam informações sobre tipos e classes espectrais, velocidades radiais, abundâncias químicas e avermelhamentos. As informações cinemáticas são fundamentais, por sua vez, para simulações e podem indicar a pertinência de uma estrela para um dado sistema estelar. Cada método permite, assim, a obtenção de diferentes parâmetros e pode delinear os critérios para a caracterização de remanescentes de aglomerados abertos.

Neste estudo em particular, o perfil radial de densidade permite realizar uma análise estrutural dos objetos. A construção de CMD's aliada a informações espectroscópicas pode fornecer diagnóstico sobre a condição de sistema físico, situação que resulta em valores de avermelhamento, módulo de distância e idades. A utilização de movimentos próprios, por fim, complementa análise e possibilita o estudo do binarismo estelar.

### 2.1.1 Fotometria Empregada e sua Obtenção

Os dados fotométricos no infravermelho, nas bandas J e H, foram extraídos do catálogo *The Two Micron All sky Survey* (Skrutskie et al. 1997)[81], 2MASS. Esse catálogo é resultado de uma varredura cobrindo todo o céu, que ocorreu entre 1997 e 2001. Foram utilizados 2 telescópios de 1.3 metro, um em Mount Hopkins, Arizona - EUA, e outro no CTIO, Chile. Cada telescópio é equipado com uma câmera de três canais, consistindo cada canal em detectores de HgCdTe de  $256 \times 256$  pixels com capacidade de observar o céu, simultaneamente, nas bandas J ( $1.25 \mu\text{m}$ ), H ( $1.65 \mu\text{m}$ ) e  $K_S$  ( $2.17 \mu\text{m}$ ). O 2MASS possui dois catálogos principais - o Catálogo de Fontes Pontuais (*Point Source Catalog* - PSC) e o Catálogo de Fontes Extensas (*Extended Source Catalog* - XSC) - além da produção de imagens reunidas em um Atlas (Atlas Images). O PSC consiste em mais de 500 milhões de estrelas e Galácticas com incertezas fotométricas associadas a cada banda. O XSC possui 1,6 milhão de Galáxias resolvidas. Pode-se acessar o catálogo a partir do endereço <http://irsa.ipac.caltech.edu>, ou ainda através da página do serviço de catálogos VizieR Service<sup>1</sup>, no SIMBAD, buscando-se pelo 2MASS.

As incertezas totais são consideradas aqui em magnitude ( $\tau$ ), dadas pela combinação da incerteza instrumental com as incertezas associadas em calibração, fornecidas pelo 2MASS. As incertezas tornam-se significativas a partir de magnitudes  $> 15$ , sendo por isso aplicado um corte em J para esse valor em todas as extrações realizadas. Os CMD's observados são na forma  $J \times (J - H)$ , pois é em J que as incertezas em magnitude

---

<sup>1</sup><http://vizier.hia.nrc.ca/viz-bin/VizieR>.

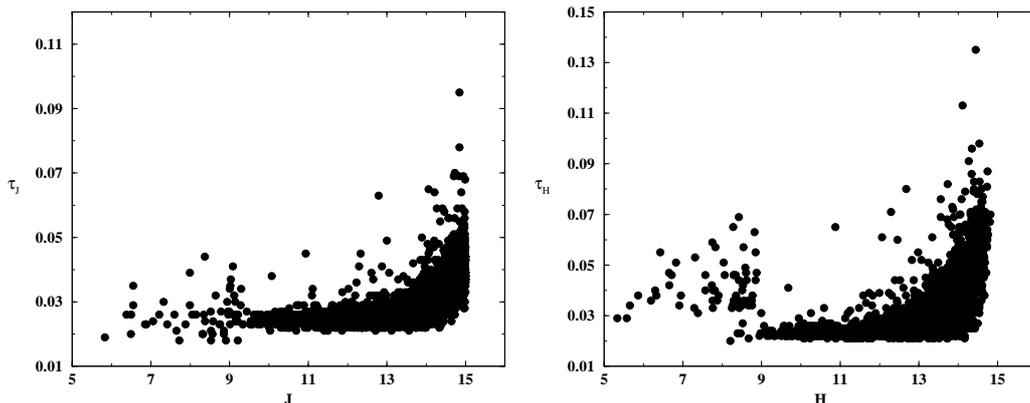


Figura 2.1: Painel esquerdo: incertezas fotométricas totais em J ( $\tau_J$ ) em função da magnitude J; Painel direito: incertezas totais em H ( $\tau_H$ ) em função da magnitude H.

atingem os menores valores, como podemos ver na figura 2.1, cujos valores dizem respeito ao aglomerado aberto NGC 3680. Ocorre saturação fotométrica para magnitudes brilhantes (J, H < 9), como consequência vemos em ambos painéis pontos atingindo grandes valores em incertezas. As incertezas ( $\tau$ ) alcançam em média 0.045 para J = 15, ao passo que, para H, esse valor é alcançado para magnitude 14,5. Como os objetos da amostra não são muito avermelhados, não se utiliza a banda  $K_S$ , onde os erros são ligeiramente maiores.

As incertezas em cor são calculadas a partir dos valores dados para as incertezas totais em magnitude, assim tem-se:

$$\Omega_{(banda_1-band_2)} = \sqrt{\tau_{banda_1}^2 + \tau_{banda_2}^2} \quad (2.1)$$

Cabe frisar ainda que o Vizier Service permite acesso a uma biblioteca de catálogos publicados e a tabelas de dados astronômicos disponíveis na rede. Através desse serviço, dados de fotometria fotográfica oriundos dos catálogos *Guide Star Catalogue-GSC.2* e *USNO A2.0*, úteis para alguns estudos complementares, foram igualmente acessados.

## 2.1.2 Movimentos Próprios

Como fonte de medidas de movimentos próprios, utiliza-se o catálogo *The Second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog* (UCAC2), a partir do Vizier. O UCAC2 possui posições e movimentos próprios para 48.330.571 fontes (a maioria estelares) com fotometria suplementar para 99,5% das fontes 2MASS. O catálogo cobre, atualmente, o céu desde  $-90^\circ$  até  $+40^\circ$  graus de declinação, alcançando  $+52^\circ$  em algumas áreas. As posições atuais são obtidas de observações com o *USNO 8-inch Twin Astrograph* equipado com uma câmera CCD com chip Kodak 4 k. A precisão das posições, dependendo da magnitude, é de 15 a 70 milissegundo de arco (msa) com estimativa de incertezas sistemáticas de 10 msa ou menores. Os movimentos próprios são obtidos, desse modo, a partir da utilização de 140 catálogos espaciais baseados em terra, incluindo Hipparcos/Tycho e

AC200.2 entre outros. As incertezas alcançam 1 a 1.3 msa/ano para estrelas de magnitude 12, e em torno de 4 a 7 msa/ano para estrelas de magnitude 16 (Zacharias et al. 2004)[90].

### 2.1.3 Espectroscopia

Os dados espectroscópicos, obtidos em turnos de observação, integram um trabalho em colaboração com o Observatório Astronômico de Córdoba, realizado no Complejo Astronômico El Leoncito (CASLEO/Argentina). Desses turnos, três contaram com minha presença e de Andrea Ahumada (do Observatório de Córdoba): novembro de 2001, maio de 2003 e março de 2004. O turno de maio de 2003 contou também com a participação de Celeste Parisi. Em 2002, as observações foram realizadas em maio por Andrea Ahumada e Jules Soares (da UFRGS) e em outubro por Andrea Ahumada e Celeste Parisi. Ao todo foram obtidos espectros de, no mínimo, 35 objetos. Nas observações, foi empregada uma câmera CCD contendo um chip Tektronics de  $1024 \times 1024$  pixels anexada a um espectrógrafo REOSC (modo simples). O tamanho de cada pixel é  $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ ; sendo que um pixel corresponde a  $0,94'' \times 0,94''$  do céu. A fenda longa corresponde a  $4.7'$ , permitindo uma amostra do fundo do céu. O seeing (degradação de uma imagem pontual de estrela por efeitos na atmosfera terrestre) durante as noites era tipicamente de  $2.0'$ . Uma rede de 300 ranhuras/mm foi usada. O espectro resultante cobre o intervalo 3600 a 6900 Å, com uma dispersão média na região observada de  $\approx 138 \text{ \AA/mm}$  ( $3.3 \text{ /pix}$ ). A fenda tem uma largura de  $4.5'$ , resultando em uma resolução de  $\approx 17 \text{ \AA}$ , medida por meio da largura a meia altura (FWHM) de linhas de comparação. Para calibração em comprimento de onda foram feitas exposições de uma lâmpada de He-Ne-Cu, antes e depois de cada objeto e estrela padrão. As estrelas padrões empregadas são da lista de Stone & Baldwin (1983)[83].

O turno de 2001 teve os dados reduzidos por Andrea em Córdoba. A redução dos dados correspondentes ao turno de maio de 2002 foi iniciada no Observatório Astronômico de Córdoba/Argentina, em 2003, e posteriormente completada por mim no Instituto de Física da UFRGS. Parte dos dados do turno de 2004 foi reduzida em conjunto em Córdoba. Nessas reduções, utilizou-se o pacote IRAF, seguindo os procedimentos padrões. Foram subtraídos *bias* e usados *flat-fields* previamente combinados para corrigir as imagens de variações de alta e baixa frequências espaciais. Foram realizadas subtrações do fundo do céu. A extinção atmosférica foi corrigida de acordo com os coeficientes dados por Minniti et al. (1989)[62] e as calibrações de fluxo foram então aplicadas. No Capítulo 4, serão apresentados os resultados espectroscópicos já obtidos.

## 2.2 Caracterização Morfológica

A amostra de candidatos a remanescentes quando visualizada através de mapas do DSS e XDSS reflete duas morfologias características. Um conjunto apresenta-se pouco povoado, alcançando pequenos valores de tamanho angular, sendo centralmente concentrados. Esses objetos são denominados aqui compactos (C, na Tabela 2.1). O outro conjunto apresenta-se mais povoado, alcançando tamanhos angulares maiores e as estrelas encontram-se

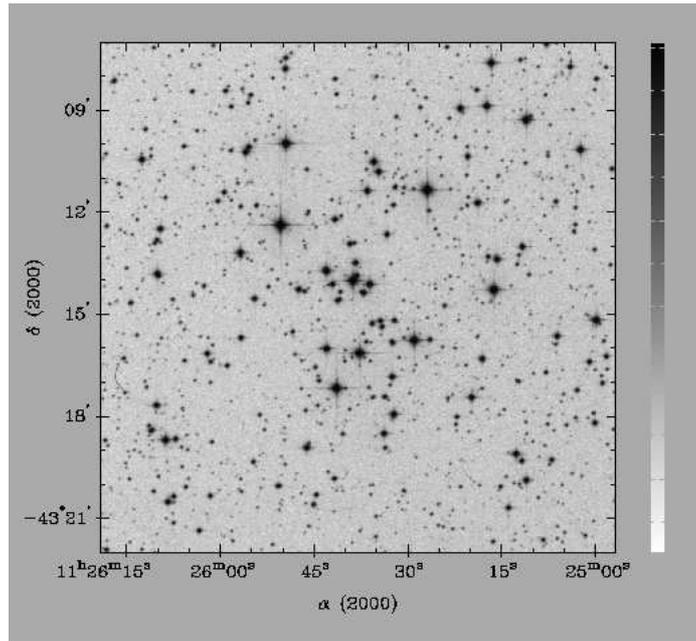


Figura 2.2: Imagem XDSS na banda R da região central do aglomerado aberto de idade intermediária NGC3680. É semelhante morfológicamente aos objetos esparsos da amostra.

dispersas. Estes são denominados esparsos (E, na Tabela 2.1).

Devido à morfologia diferenciada, é necessário particularizar o tratamento dado, pois um tipo de estudo pode ser mais adequado que outro. Assim, por exemplo, nossos objetos compactos possibilitam a obtenção de espectro integrado, ao passo que, para os esparsos, é mais indicada a espectroscopia de estrelas individuais. Espectros integrados das concentrações estelares podem ser comparados a bibliotecas espectrais de aglomerados abertos. Já a espectroscopia de estrelas individuais possibilita a obtenção de tipos e classes espectrais, que aponta, por sua vez, a pertinência da estrela em relação ao objeto ao relacionar tais informações com a posição da estrela no CMD. Além de ser também um vínculo de idade através da classe espectral obtida para a estrela na região do TO.

Da ocorrência de morfologias diferenciadas resulta, naturalmente, uma questão, qual seja: morfologias diferenciadas estariam associadas a distintas fases evolutivas através de processos dinâmicos que levam ao despoamento do objeto? Uma outra possibilidade seria uma origem evolutiva distinta para compactos e esparsos vinculada, por exemplo, à sua posição na Galáxia.

A figura 2.2 apresenta a imagem XDSS na banda R do aglomerado aberto NGC 3680 para a extração de raio 7.5', compreendendo sua região central. Essa apresenta-se estendida, sendo o aglomerado semelhante estruturalmente aos objetos esparsos da presente amostra. O raio limite, definido como a região no perfil radial de densidade estelar onde ocorre a fusão do perfil de King (King 1966)[52] com a contribuição do fundo do céu, é de  $22 \pm 1'$  (Bonatto et al. 2004) [16].

As figuras de 2.11 a 2.14 mostram imagens XDSS na banda R dos objetos classificados como compactos (Tabela 2.1). Eles apresentam um alto contraste visual da densidade de estrelas em relação ao fundo do céu e

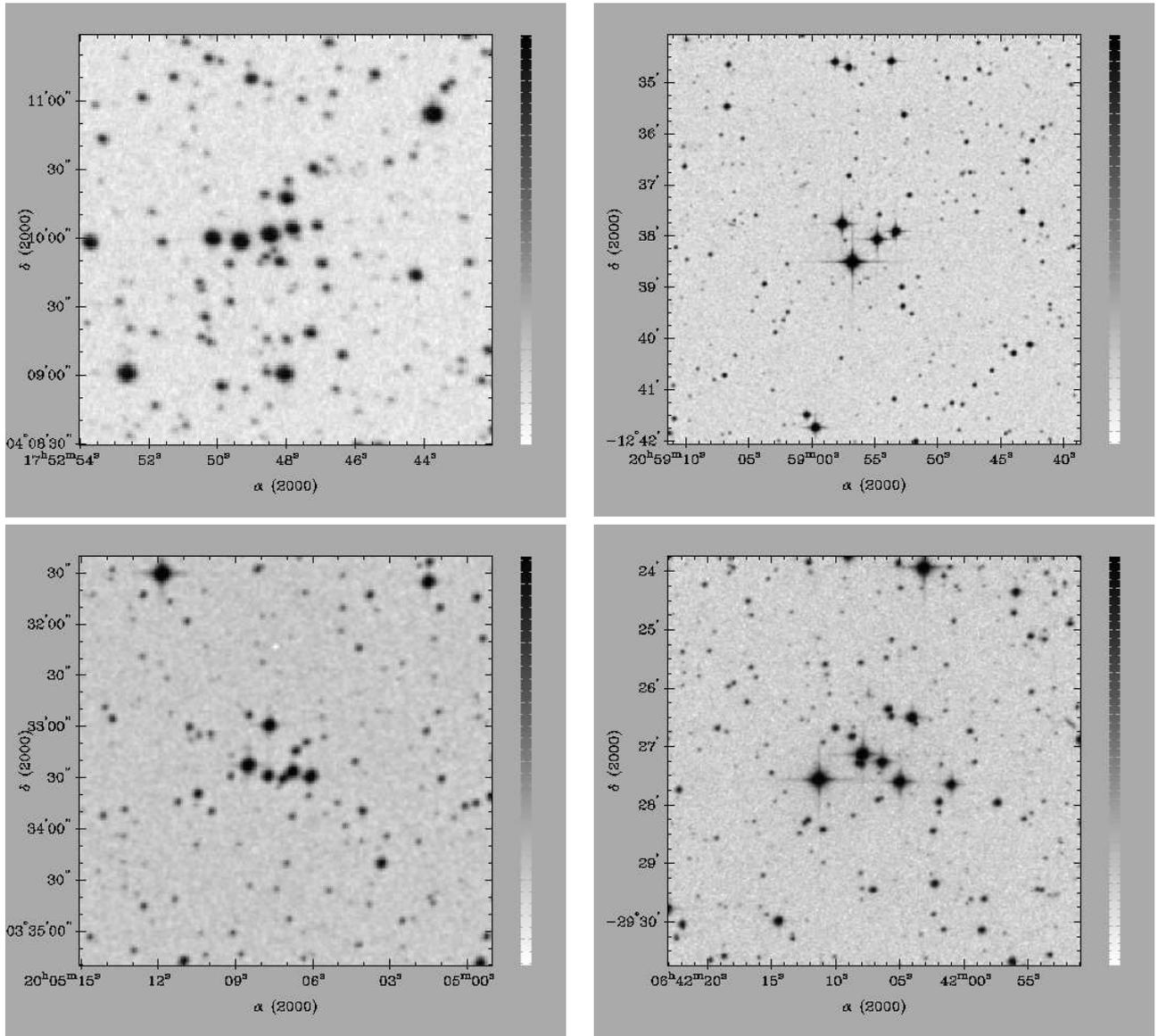


Figura 2.3: Imagens de diferentes diâmetros angulares do *XDSS* na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: NGC 6481, NGC 6994, NGC 6863 e Ruprecht 3. Todos classificados como compactos.

possuem tipicamente até 10 estrelas.

As imagens *XDSS* dos objetos esparsos são mostradas nas figuras 2.15 a 2.17. Eles apresentam um contraste visual de densidade em relação ao fundo do céu, porém suas estrelas não estão tão concentradas como nos objetos classificados como compactos e, em geral, possuem um ângulo sólido maior.

A Tabela 2.1 contém os objetos além do aglomerado aberto de idade intermediária NGC 3680. As colunas indicam: (1) nome; (2) tipo morfológico: C para compactos e E para esparsos; (3) e (4) longitude e latitude Galáticas, respectivamente; (5) ascensão reta -  $\alpha$  e (6) declinação -  $\delta$ , J2000.0, (7) raio limite obtido através do perfil radial de estrelas, (8) contraste de densidade objeto/campo  $\delta_c$ .

O contraste de densidade objeto/campo é dado por  $\delta_c = \frac{\sigma(0)}{\sigma_{fundo\ do\ céu}}$  onde  $\sigma(0)$  é a densidade estelar na direção do centro do objeto ( $R = 0$ ) e  $\sigma_{fundo\ do\ céu}$  é a densidade de um anel externo ao objeto, correspondendo

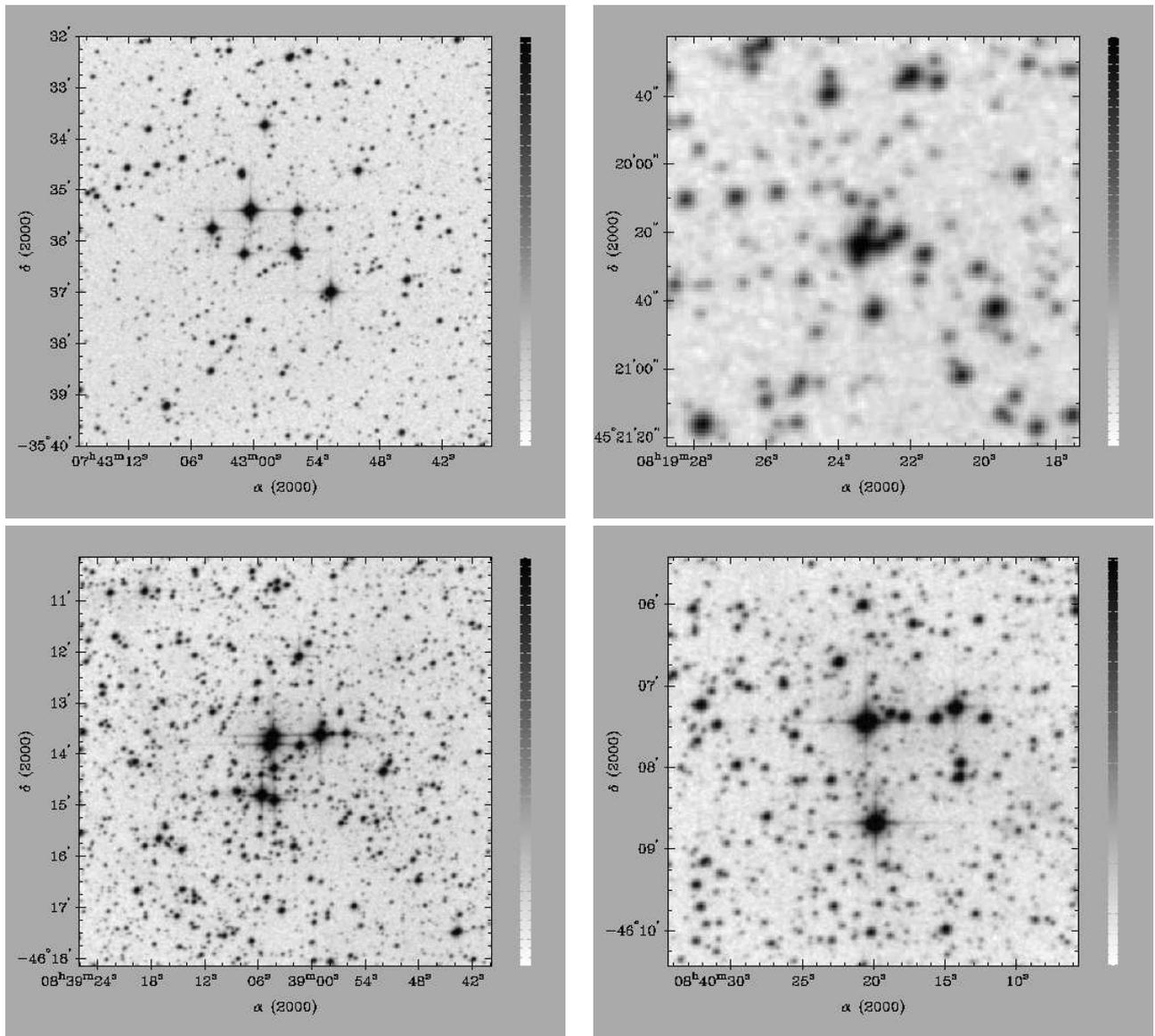


Figura 2.4: Imagens de diferentes diâmetros angulares do *XDFSS* na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: Ruprecht 31, Ruprecht 156, NGC 2645 e Waterloo 6. Morfologias compactas.

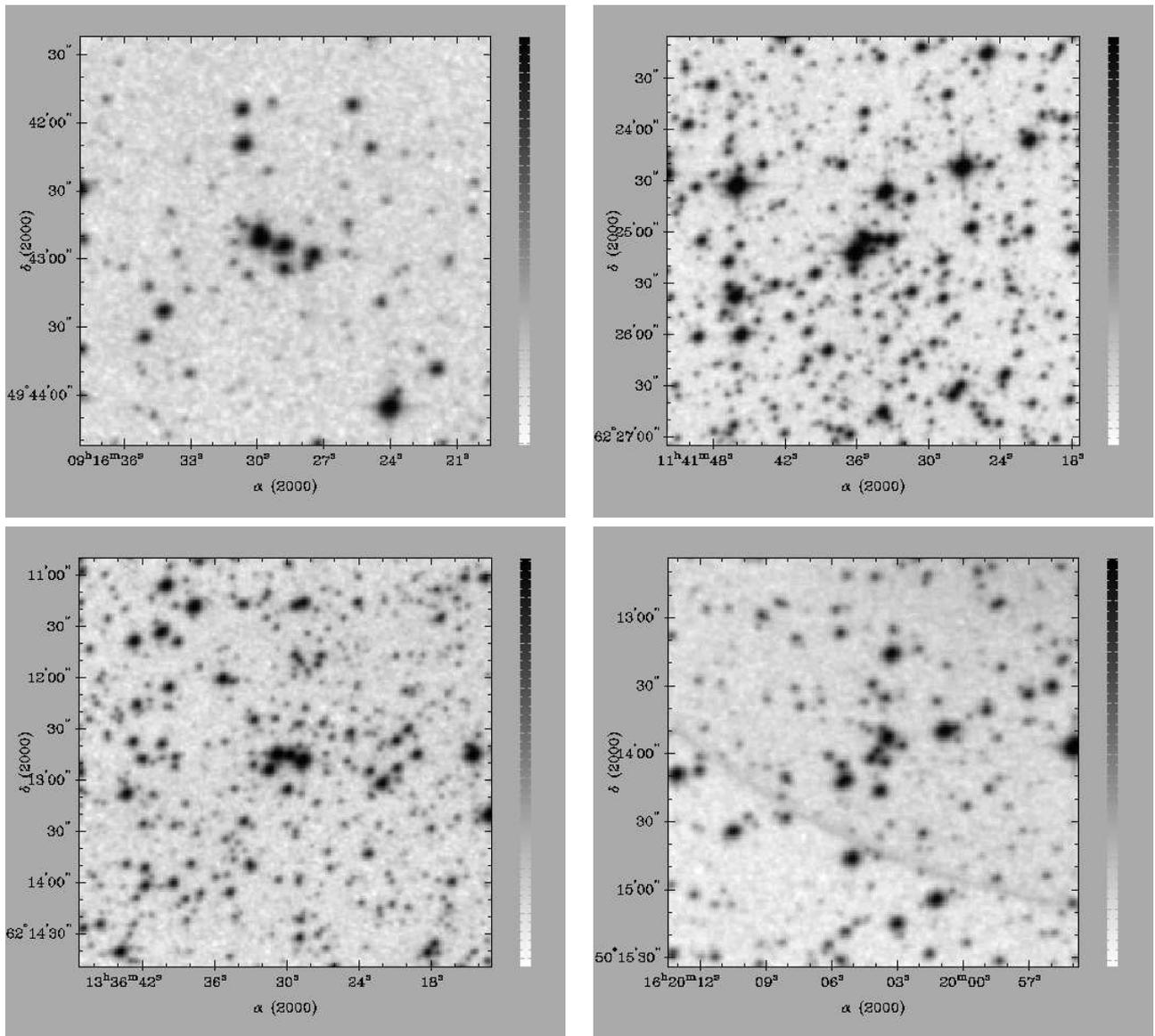


Figura 2.5: Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDFSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita e de cima para baixo: ESO211SC8, Objeto 1, ESO132SC14 e Lynga 8. Morfologia compacta.

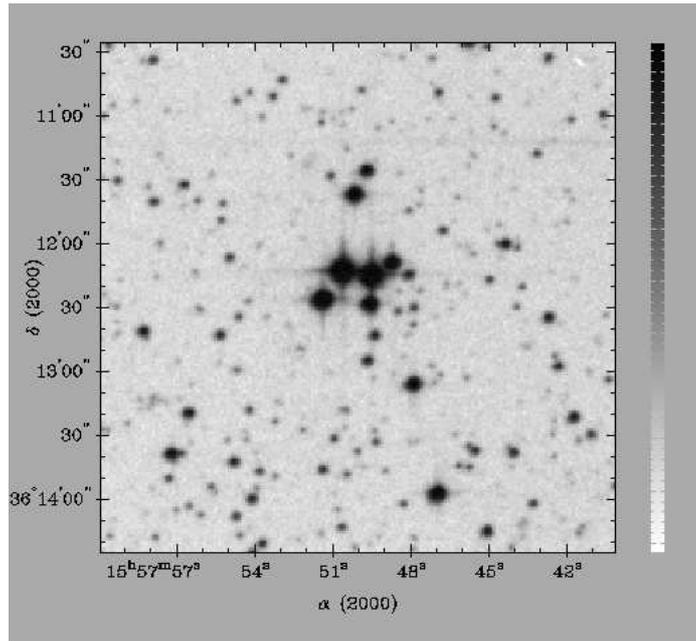


Figura 2.6: Imagem XDFSS na banda R de ESO389\*5. Morfologia compacta.

ao fundo do céu.

Posto isso, para entendermos se e como a morfologia está associada a distintas fases evolutivas, é preciso verificar inicialmente se ela está associada a parâmetros estruturais. Assim, na próxima seção serão traçados os perfis radiais de densidade de estrelas procurando-se ajustar, quando possível, perfis de King. Basicamente, constitui-se em um perfil de densidade atingido pelos aglomerados que realizam a equipartição de energia e apresentam segregação de massa (King 1966)[52]. O ajuste de perfis de King fornece raio de núcleo e densidade central. Se o ajuste não ocorrer, será possível inferir o raio limite para cada objeto e a forma de seu perfil. Nos capítulos seguintes, parâmetros fotométricos e cinemáticos vão complementar esse estudo. Desse modo, as informações em seu conjunto permitirão o melhor entendimento das propriedades dos remanescentes de aglomerados abertos, bem como indicarão como se relacionam morfologia, estrutura e fases evolutivas dos mesmos.

## 2.3 Perfil radial de densidade de estrelas

O perfil radial de densidade estelar fornece uma visão geral da estrutura de um aglomerado. Ele é definido como sendo a distribuição do número de estrelas por área (ângulo sólido) na direção do objeto. Nesta seção serão mostrados, pois, os perfis dos candidatos a remanescentes da amostra.

A contagem de estrelas para cada objeto e seu campo foi feita a partir da fotometria 2MASS. Os dados extraídos do catálogo passaram por dois filtros. O primeiro em magnitude onde excluam-se estrelas com  $J > 15.0$ , a fim de evitar a presença de estrelas débeis, submetidas a grandes incertezas fotométricas e que podem conter detecções espúrias. O segundo filtro ocorreu para as estrelas com  $J < 15.0$  mag. Nesse caso, foi utilizado

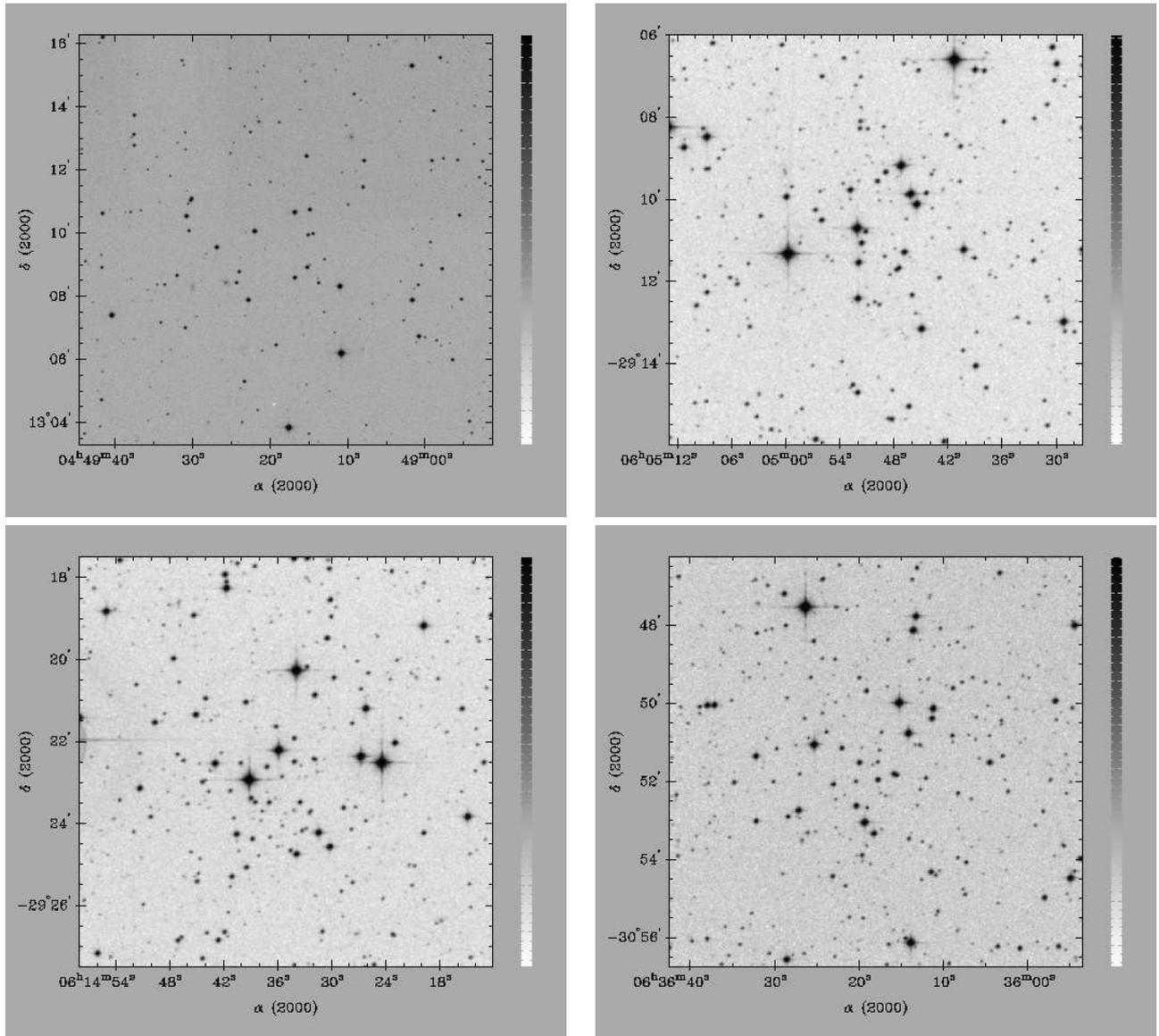


Figura 2.7: Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita, e cima para baixo: NGC 1663, ESO425SC6, ESO425SC15 e ESO426SC26. Todos foram classificados como esparsos.

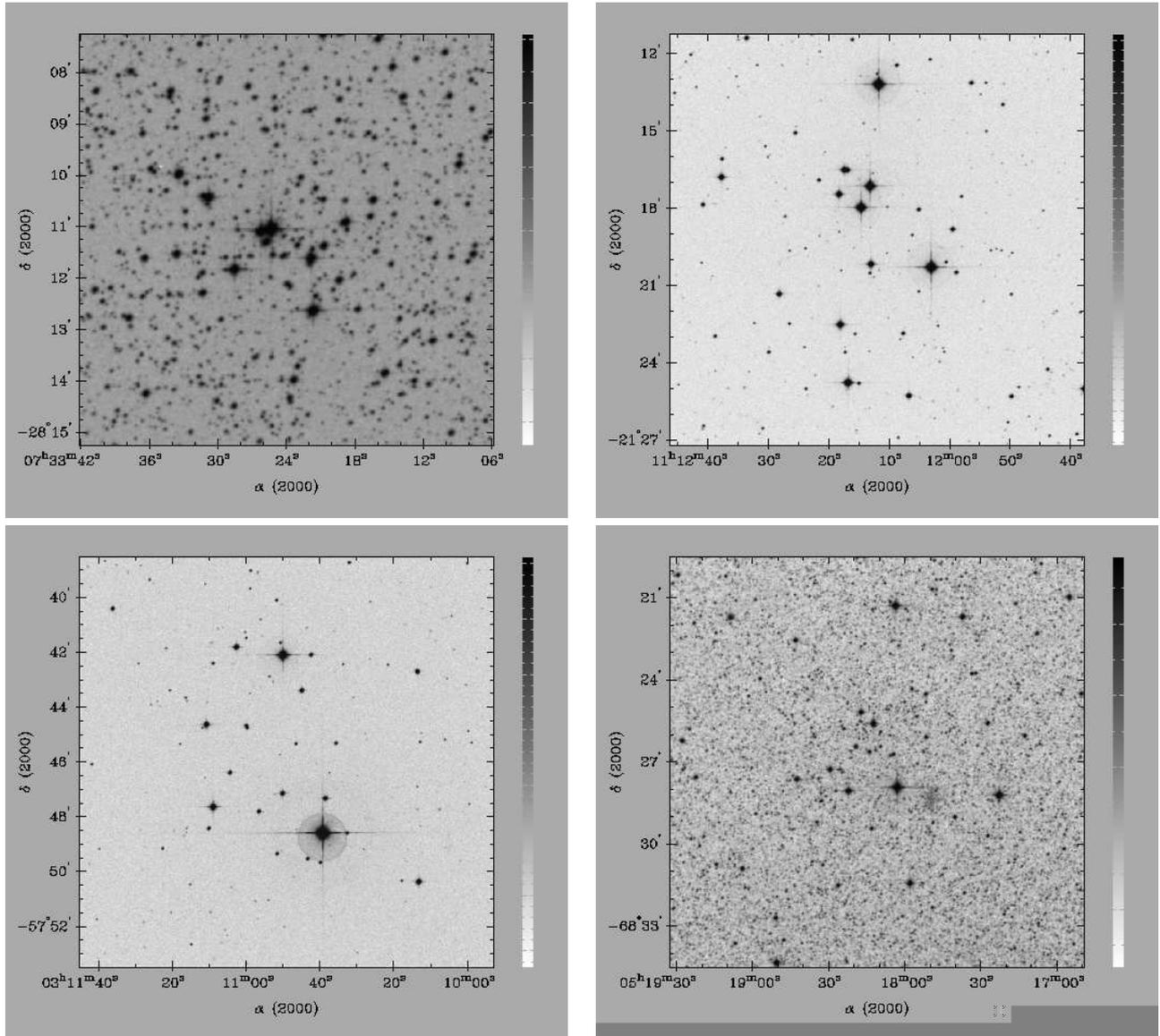


Figura 2.8: Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Painéis da esquerda para a direita, e de cima para baixo: ESO429SC2, ESO570SC12, NGC 1252 e NGC1901. Para este último a imagem é na banda I. Todos foram classificados como esparsos.

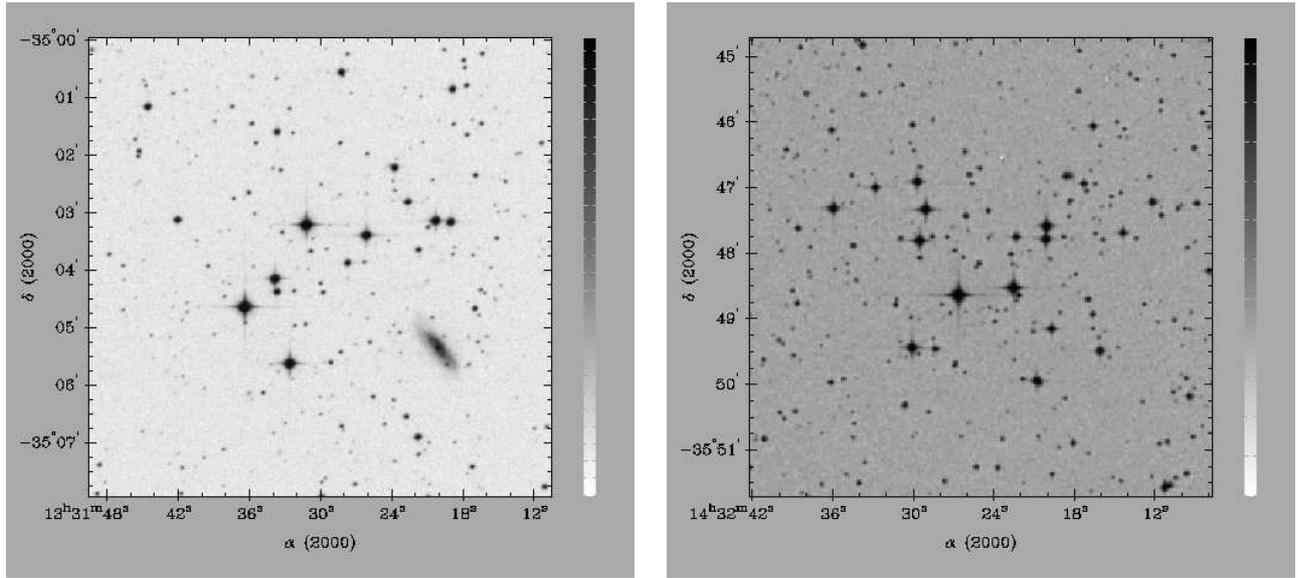


Figura 2.9: Imagens de diferentes diâmetros angulares do XDSS na banda R. Paineil à esquerda: ESO383SC10. Paineil à direita: IC 1023. Morfologia esparsa.

Nome	M	l	b	$\alpha$	$\delta$	$R_{lim}$	$\delta_c$
		o	o	h:m:s	o'::''		
NGC 6481	C	29.94	14.93	17:52:48	4:10:00	$1.5 \pm 0.5$	2.1
M 73, NGC 6994, Cr426, OCl-89	C	33.71	-39.93	20:58:55	-12:38:03	$4.5 \pm 0.5$	5.7
NGC 6863	C	32.27	-17.99	20:05:07	-3:33:20	$1.5 \pm 0.5$	2.5
NGC1663, OCl-461	E	185.88	-19.66	4:49:18	13:09:47	$5 \pm 0.5$	2.7
ESO425SC6	E	235.39	-22.28	6:04:50	-29:10:59	$3 \pm 0.5$	4.7
ESO425SC15	E	236.37	-20.35	6:14:35	-29:22:30	$3.5 \pm 0.5$	3.0
Ruprecht 3, OCl-642, ESO 426SC33	C	238.77	-14.81	6:42:07	-29:27:15	$2.5 \pm 0.5$	4.1
ESO426SC26	E	239.62	-16.51	6:36:18	-30:51:30	$3 \pm 0.5$	2.7
ESO429SC2	E	242.59	-4.16	7:33:24	-28:11:15	$4.5 \pm 0.5$	1.7
Ruprecht 31, OCl-711, ESO 368SC9	C	250.08	-5.97	7:42:58	-35:35:50	$3 \pm 0.5$	1.5
Ruprecht 156, OCl-744, ESO 259SC2	C	262.06	-5.17	8:19:23	-45:20:23 <sup>†</sup>	$4 \pm 0.5$	1.4
NGC 2645, Pis6,OCl-754,BH 40, ESO 259SC14, Waterloo 4	C	264.78	-2.90	8:39:03	-46:14:08	$9.5 \pm 0.5$	1.7
Waterloo 6	C	264.82	-2.67	8:40:17	-46:07:55 <sup>†</sup>	$1 \pm 0.5$	1.2
ESO211SC8	C	271.51	-0.43	09:16:28.7	-49:42:52 <sup>†</sup>	$2 \pm 0.5$	2.5
ESO570SC12	E	274.06	35.89	11:12:07.2	-21:21:00 <sup>†</sup>	$3 \pm 0.5$	2.5
NGC 1252, ESO 116?11	E	274.08	-50.83	3:10:49	-57:46:00	$6 \pm 0.5$	2.8
NGC 1901, Bok 1, OCl-791.1	E	279.03	-33.60	5:18:11	-68:27:00	$4 \pm 0.5$	5.2
Objeto 1	C	294.94	-0.63	11:41:34.5	-62:25:05 <sup>†</sup>	$2 \pm 0.5$	1.7
ESO132SC14	C	308.15	0.20	13:36:30	-62:12:49	$2 \pm 0.5$	1.7
ESO383SC10	E	312.13	27.08	13:31:30	-35:03:56	$3 \pm 0.5$	3.9
IC1023, ESO 385SC39	E	324.95	22.71	14:32:25	-35:48:13	$4 \pm 0.5$	1.9
Lynga 8, OCl-962, ESO 226SC1	C	333.27	-0.07	16:20:03.8	-50:13:59 <sup>†</sup>	$1.5 \pm 0.5$	1.6
ESO389*5	C	339.91	12.94	15:57:50	-36:12:25	$2 \pm 0.5$	1.5
NGC 3680, Mel-106	E	286.76	16.92	11:25:38	-43:14:30	$22 \pm 1$	3.5

Tabela 2.1: Coordenadas Galácticas e equatoriais (J2000.0) da amostra de 23 candidatos a remanescentes e do aglomerado aberto NGC3680. Os objetos estão classificados como compactos (C) ou esparsos(E). <sup>†</sup> coordenadas dadas pela centragem do objeto através do perfil radial obtido no presente trabalho. O Objeto 1 foi descoberto por Eduardo Bica em buscas sistemáticas no XDSS.

## NGC 3680

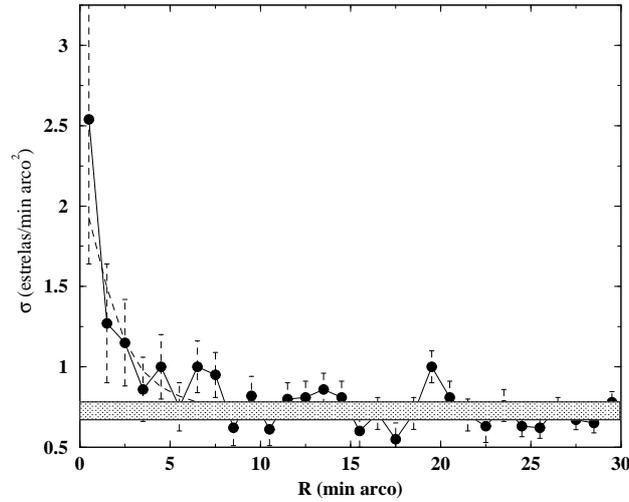


Figura 2.10: Distribuição radial da densidade superficial do aglomerado aberto NGC 3680. O retângulo hachurado mostra o nível médio de contribuição do fundo do céu. Nesse caso, foram aplicados filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e para fontes não estelares. As barras correspondem às incertezas poissonianas. A linha pontilhada mostra o ajuste por um perfil de King.

um filtro do próprio catálogo 2MASS, denominado `cc_flag`, que permite selecionar fontes pontuais livres de confusão com fontes não estelares.

A distribuição radial de estrelas foi obtida através da contagem do número de estrelas internas a anéis concêntricos centrados no objeto, com passo  $1'$  ou  $2'$  em raio, dividida pela área de cada anel correspondente.

Sendo  $N_i$  o número de estrelas no anel e  $A_i$  a área do  $i$ -ésimo anel, a densidade superficial de estrelas é dada pela expressão

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \quad (2.2)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n$ , e  $n$  é o número total de anéis específico para cada objeto.

A densidade de estrelas do campo próximo de comparação de cada objeto têm mesma da expressão 2.2, porém o campo corresponde ao anel mais externo, onde o perfil radial do objeto deixa de ser significativo.

As incertezas poissonianas são dadas pela expressão:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{N_i}}{A_i} \quad (2.3)$$

Na figura 2.10, vemos o perfil radial de densidade superficial do aglomerado de idade intermediária NGC 3680. A distribuição é suave, apresentando uma concentração de estrelas bem definida na região central, bem como um excesso de estrelas em um halo entre  $17' \leq R \leq 22'$ . O raio limite é  $R \approx 22'$ . O ajuste por um perfil de King (King 1966)[52] resultou em um raio de núcleo  $r_n = 1.85' \pm 1.6'$  e uma densidade central  $\sigma_{Kc} = 1.34 \pm 1.4$  estrelas/min arco<sup>2</sup>. Em todas as figuras para os perfis radiais de densidade de estrelas, os retângulos hachurados

correspondem à contribuição do fundo do céu.

Os objetos compactos na figura 2.11 apresentam essencialmente um ponto acima da contagem de estrelas para o fundo do céu correspondendo, em geral, ao diâmetro visual inferido para cada objeto (ver tabela 2.1). Não possuem halos, com exceção de NGC 6994. O ajuste de um perfil de King não é possível para esse tipo de distribuição. Esse tipo de perfil define basicamente um núcleo coincidindo com o raio limite do objeto.

Na figura 2.12, o perfil radial da concentração compacta Ruprecht 31 apresenta uma distribuição indicando que o objeto é centralmente concentrado; ocorre uma sobredensidade entre  $1.5' < r < 4.5'$ , que poderia indicar a presença de um halo. O perfil radial de Ruprecht 156 não apresenta um único ponto acima da contagem para o fundo do céu, e sim um perfil que indica uma região central estendida. Porém a imagem XDSS para o objeto indica um diâmetro visual menor que  $1'$ . Já NGC2645 apresenta uma distribuição que lembra a de NGC 3680, relativamente suave, sugere uma sobredensidade entre  $5' < r < 9$ . A figura mostra um ajuste do perfil de King (King 1966)[52], que forneceu um raio de núcleo  $r_n = 2.82' \pm 1.92'$  e uma densidade central  $\sigma_{Kc} = 2.1' \pm 1.62'$  estrelas/min arco<sup>2</sup>. O perfil radial de NGC2645 confirma o que vemos no mapa XDSS da figura 2.12: uma concentração de estrelas bem destacada do fundo do céu, apesar de sua relativa baixa latitude Galáctica. Seu perfil é semelhante ao encontrado para aglomerados abertos. Essas características podem apontar NGC 2645 como não necessariamente um remanescente, mas como um aglomerado aberto pouco povoado e evoluídos dinamicamente. Para Waterloo 6 não utilizou-se o filtro `cc_flag`, que, para regiões muito densas, pode não diferenciar estrelas de contaminações espúrias. O objeto está localizado a baixa latitude ( $|b| < 3^\circ$ ). Waterloo 6 um perfil apresenta uma distribuição acima da contagem para o fundo do céu considerando-se as barras de erro, entretanto, o perfil pode igualmente estar representando uma flutuação de estrelas do campo.

A figura 2.13 apresenta as concentrações estelares de mais baixa latitude Galáctica (ver tabela 2.1). ESO211SC8 apresenta um pico central bem destacado da contribuição do fundo do céu. As extrações fotométricas na direção de Objeto 1, ESO132SC14 e Lynga 8 apresentaram uma grande presença de estrelas débeis em função da baixa latitude. Para essas concentrações, foram construímos perfis considerando-se estrelas até  $J < 13$ . Nesses três casos, vemos uma região central bem definida. Na figura 2.14 vemos o compacto ESO389\*\*5, cuja distribuição é semelhante aos compactos da figura 2.11, com um ponto acima da contagem para o fundo do céu.

A figura 2.15 apresenta os quatro primeiros objetos esparsos. NGC1663 apresenta um perfil que decresce até se confundir com a contribuição do fundo do céu. Para ESO425SC6, é mostrado um ajuste por um perfil de King (King 1966)[52], onde podemos observar que o perfil radial do objeto cai mais rapidamente do que o ajuste. Este último fornece um  $r_n = 0.27' \pm 0.73'$  e  $\sigma_{Kc} = 2.75 \pm 1.67$  estrelas/min arco<sup>2</sup>. Os dois painéis seguintes mostram os objetos esparsos ESO425SC15 e ESO426SC26, cujos perfis indicam uma região central estendida que define o raio limite do objeto.

A figura 2.16 mostra o ajuste por um perfil de King para ESO429SC2, que forneceu um  $r_n = 2.45' \pm 1.32'$  e  $\sigma_{cK} = 1.08 \pm 0.44$  estrelas/min arco<sup>2</sup>, não coincidindo, no entanto, ajuste e perfil radial do objeto. O objeto apresenta um possível halo entre  $2.5' < r < 4.5'$ . ESO570SC12 tem um perfil semelhante ao dos objetos

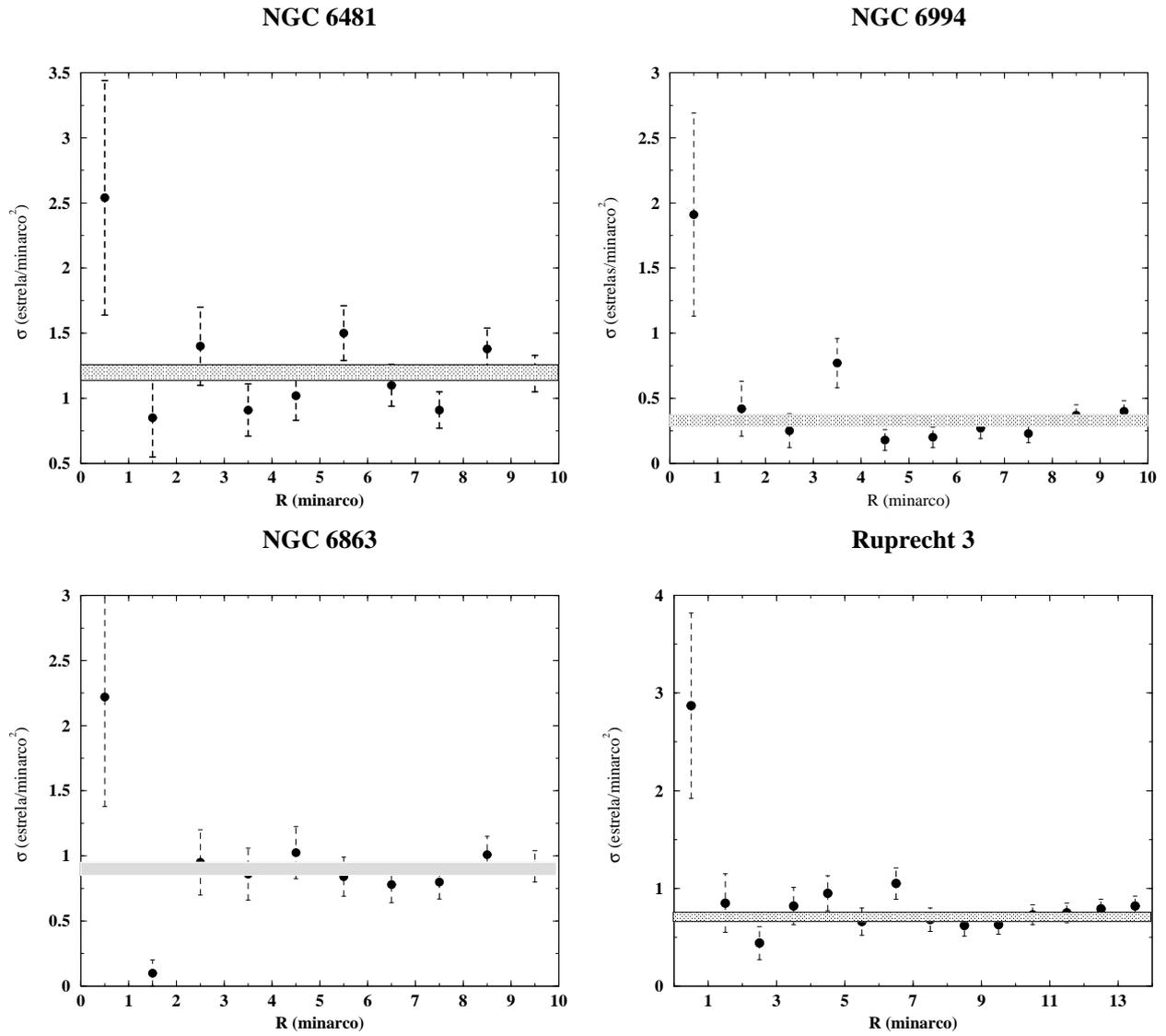


Figura 2.11: Distribuição radial da densidade superficial de estrelas. Objetos classificados como compactos, conforme legenda nos painéis. As barras correspondem a incertezas poissonianas. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais.

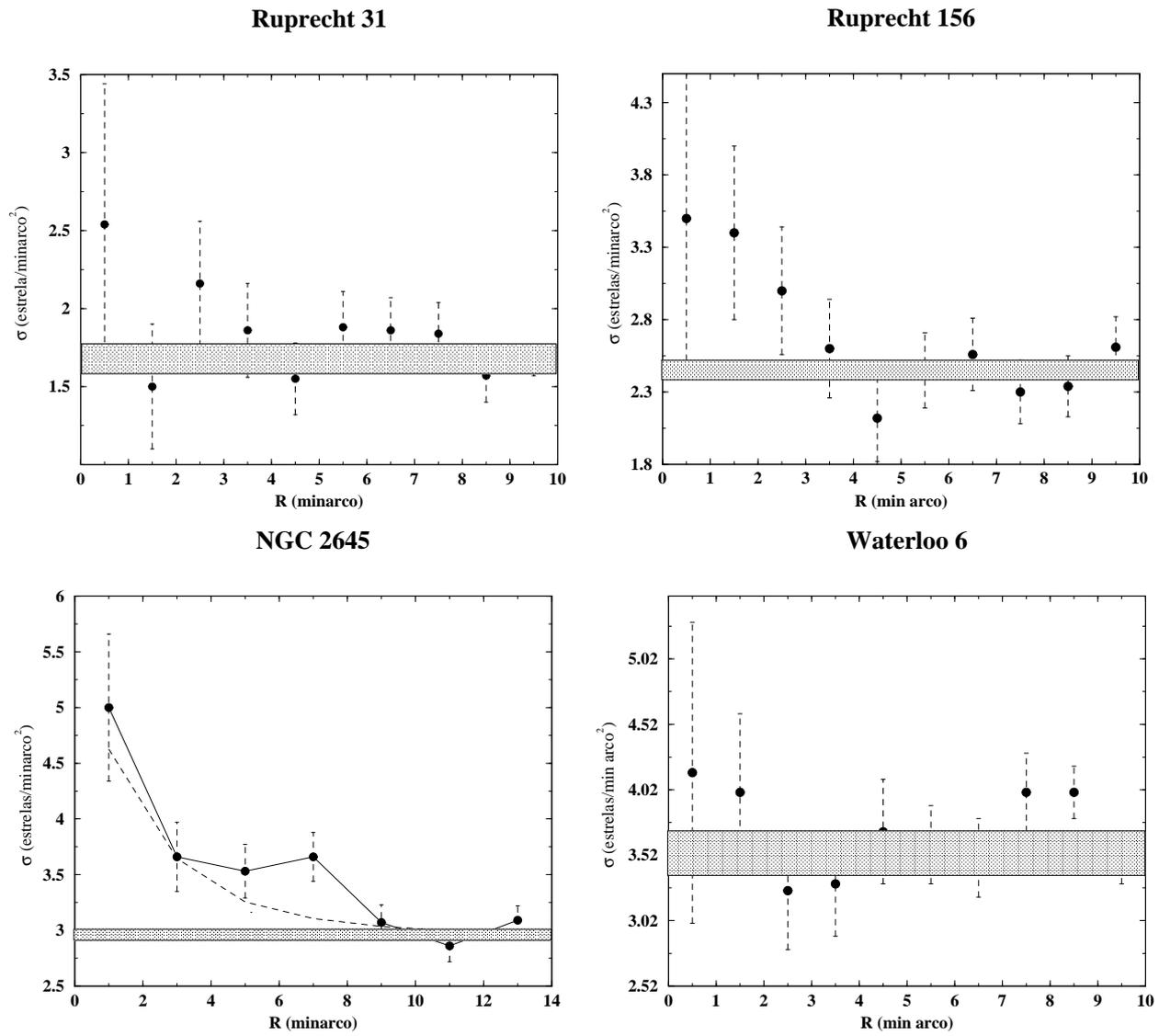


Figura 2.12: Idem à legenda da figura 2.11.

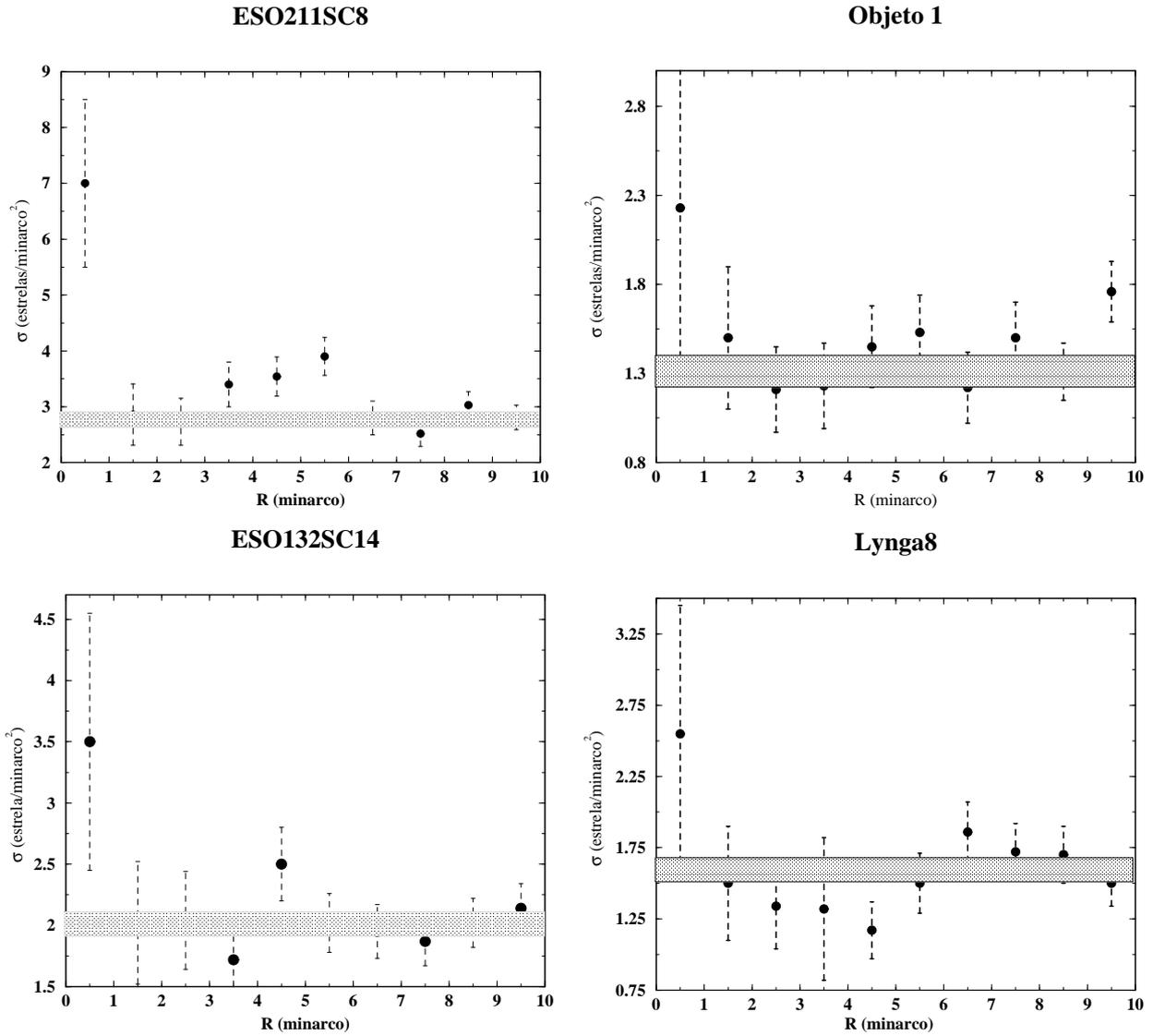


Figura 2.13: Perfis radiais de densidade estelar. Objetos dclassificados morfologicamente como compactos. Os nomes estão indicados nos painéis. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais, tendo os três últimos seus perfis para  $J < 13$ .

### ESO389E5

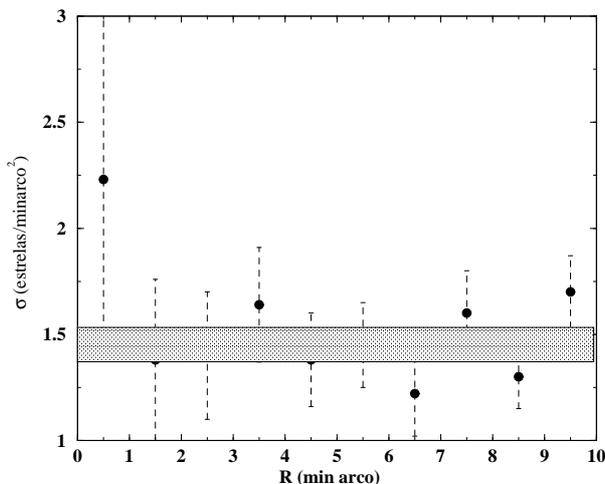


Figura 2.14: Idem à legenda da figura 2.11.

compactos que apresentam um único ponto acima da contagem do campo. NGC1252 apresenta um perfil que revela uma região central estendida limitando o objeto, da mesma forma para IC 1023 (figura 2.17), embora ambos sugiram a presença de um halo. NGC1901 tem um perfil semelhante ao de ESO425SC6. O ajuste por um perfil de King forneceu um  $r_n = 0.48' \pm 0.9'$  e  $\sigma_{cK} = 2.73' \pm 6.17'$  estrelas/min arco<sup>2</sup>. Devido ao objeto estar localizado na direção da Grande Nuvem de Magalhães (LMC), foi necessário aplicar um filtro em cor (ver Capítulo 5). ESO383SC10 (2.17) tem um perfil radial ajustado por um perfil de King, cujos valores fornecidos foram  $r_n = 0.35' \pm 0.9'$  e  $\sigma_{cK} = 2.01' \pm 2.17'$ , mas cujos perfis não são coincidentes.

De maneira geral, podemos dizer que os objetos compactos são tipicamente representados por perfis caracterizados por um ponto acima da contribuição do fundo do céu que define o raio limite do objeto. As exceções são NGC2645, cuja distribuição é semelhante à do aglomerado aberto NGC 3680 e, Ruprecht 156 com uma distribuição semelhante á dos esparsos. As concentrações classificadas morfológicamente como esparsas são tipicamente representadas por perfis radiais que indicam uma região central estendida definindo raios limite que alcançam valores maiores do que aqueles obtidos para os objetos compactos. O mesmo vale para aqueles objetos para os quais se obteve um ajuste por um perfil de King, onde a transição objeto/campo ocorre suavemente. O objeto ESO570SC12 é uma exceção, pois reproduz o perfil típico dos objetos compactos, além de ESO383SC10 que sugere uma condição de objeto intermediário ente os perfis típicos

A última coluna da tabela 2.1 indica o contraste de densidade objeto/campo ( $\delta_c$ ). Esse valor foi calculado dividindo-se a densidade do anel central do objeto pela densidade do anel externo representativo do campo, que corresponde ao fundo do céu. O valor de  $\delta_c$  pretende quantificar a impressão visual que temos ao olhar a imagem XDSS dos objetos, isto é, nos indica o quanto o objeto de fato se destaca do campo em função da densidade de ambos. Dos 23 candidatos a remanescentes da amostra, 13 têm  $\delta_c > 2.5$ .

Como podemos notar, os perfis radiais de densidade estelar propiciam, assim, o refinamento da classificação

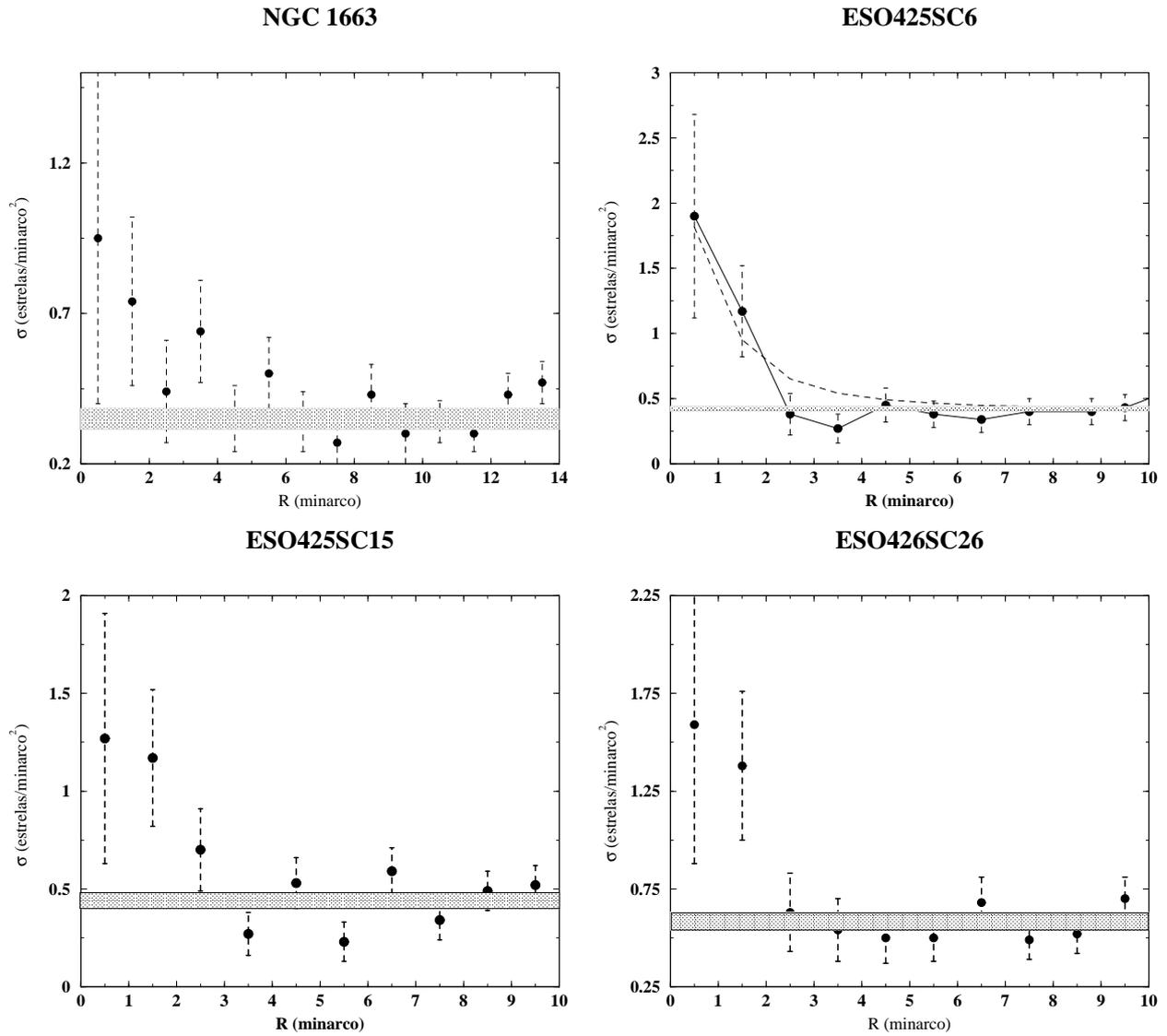


Figura 2.15: Perfis radiais de densidade estelar. Objetos classificados morfológicamente como esparsos. Os nomes estão indicados nos painéis. Os retângulos hachurados correspondem ao nível de contribuição do fundo do céu. Foram aplicados aos dados fotométricos filtros em magnitude ( $J > 15.0$ ) e por fontes não pontuais.

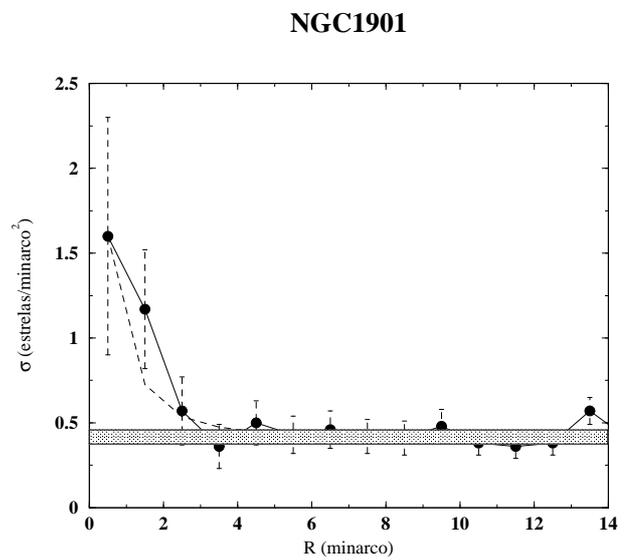
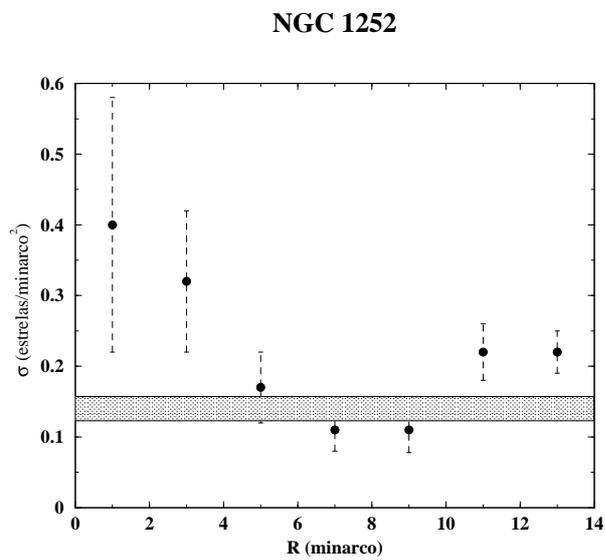
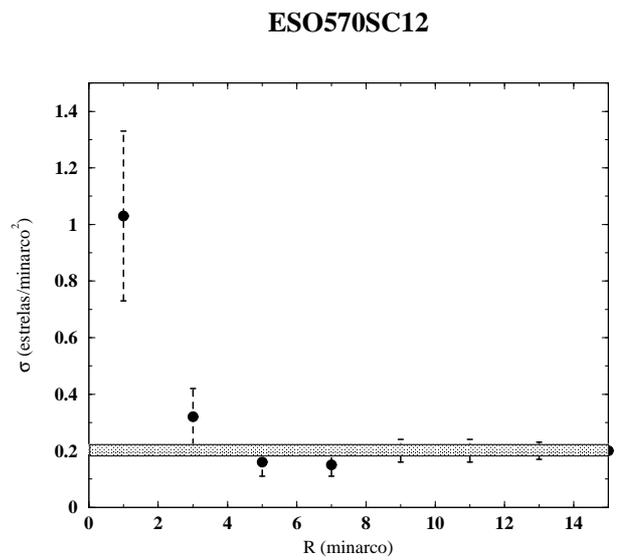
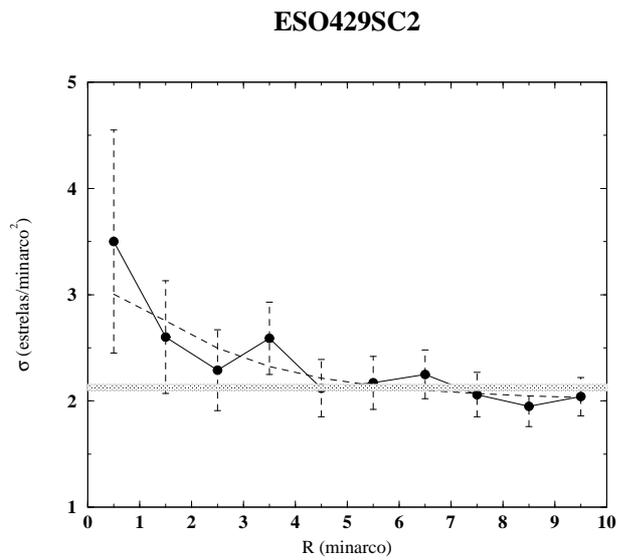


Figura 2.16: Idem à legenda da figura 2.15.

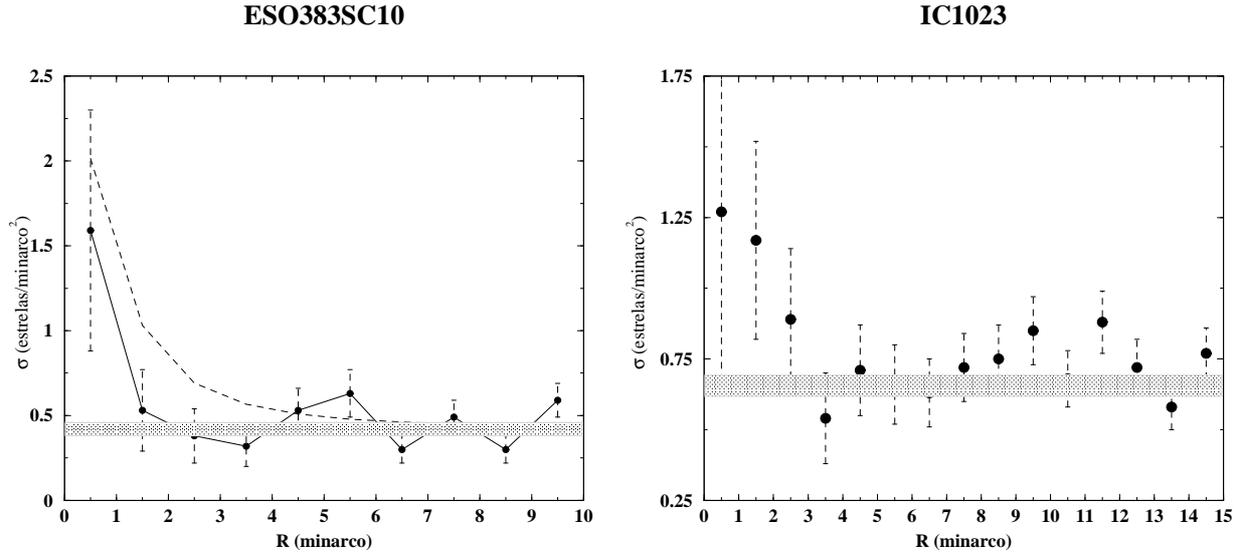


Figura 2.17: Idem à legenda da figura 2.15.

morfológica, feita a partir de mapas XDSS, para uma classificação quantitativa. Além disso, refletem a existência de estágios evolutivos visíveis, sobretudo nos objetos em que foi possível um ajuste do perfil de King. A depressão acentuada na região central do perfil do objeto em relação ao perfil ajustado, como no caso de ESO383SC10 (figura 2.17), sugere a perda de estrelas para o campo Galático.

As propriedades estruturais, por sua vez, sugerem que remanescentes de aglomerados abertos vão perdendo suas estrelas, ficando restritos a regiões centrais compactas ou esparsas, que definem o raio limite do objeto. No caso da amostra, NGC 2645 pode representar um estágio evoluído de um aglomerado aberto pouco povoado. Ruprecht 156, um compacto com perfil típico de esparsos, assim como ESO570SC12 um esparsos com perfil típico de compacto, podem ser um elo entre distintas fases evolutivas. ESO426SC6, ESO429SC2, ESO383SC10 e NGC1901 podem estar em um estágio evolutivo anterior ao representado por remanescentes compactos, um estágio entre aglomerado aberto evoluído e remanescente.

Os resultados estruturais sugerem a existência de estruturas relativamente estáveis com uma sobrevida dinâmica em relação a aglomerados. Tais estruturas poderiam constituir sistemas múltiplos de estrelas ou ainda ter origem em aglomerados abertos, configurando-se como remanescentes. A análise e a obtenção de parâmetros a partir de CMD's, espectroscopia e movimentos próprios consideradas aqui devem propiciar uma melhor compreensão das propriedades estruturais obtidas para os objetos da presente amostra, possibilitando assim sua caracterização.

## Capítulo 3

# Estudos Estatísticos

Este capítulo compreende duas seções que apresentam resultados de estudos estatísticos. A primeira corresponde a uma comparação entre objetos e campos, através das respectivas distribuições de estrelas no plano do CMD. É discutida a natureza dos objetos por meio de um método objetivo que inclui efeitos de flutuação estatística para testar a hipótese dos objetos serem campo. A segunda diz respeito a uma discussão sobre combinações aleatórias de espectros estelares e questiona-se sobre a possibilidade destas reproduzirem espectros de aglomerados abertos.

### 3.1 Estudo de objetos e campos próximos: comparação entre distribuições de estrelas no CMD

No estudo de candidatos a remanescentes de aglomerados abertos, uma questão fundamental é a diferenciação entre sistemas físicos e flutuações de estrelas de campo. Tal diferenciação não é trivial porque, diferentemente dos aglomerados abertos, os remanescentes podem conter, teoricamente, 1 dezena de estrelas (De la Fuente Marcos 1998 [28]) o que dificultaria seu estudo e obtenção de parâmetros.

Na análise de aglomerados estelares, são utilizados, entre outras ferramentas, CMD's, dados espectroscópicos em diferentes comprimentos de onda e movimentos próprios. Em princípio, essa combinação pode resolver o problema da diferenciação. Porém, em alguns casos, não é possível utilizar tais ferramentas plenamente. Podemos citar o caso de objetos localizados a distâncias que não permitem a obtenção de movimentos próprios, espectroscopia de baixa resolução não fornecendo velocidades radiais e/ou classes espectrais, ou ainda fotometria pouco profunda, que limita o uso de CMD's. Levando-se em conta tais limitações, é procedente buscar métodos matemáticos que auxiliem na análise sobre a condição ou não de sistema físico para concentrações estelares.

Apesar de menos povoados do que os aglomerados abertos, os remanescentes ainda devem apresentar um contraste visual em número de estrelas em relação ao fundo do céu. Estudos que comparam a região na direção de concentrações estelares com a do campo Galáctico próximo são indicadores da natureza física desses sistemas e podem ser realizados de diversas formas.

Bica et al. (2001) [12] apresentam 34 objetos que possuem um significativo contraste de densidade de número de estrelas brilhantes quando comparados a seus campos. Para minimizar a contaminação por estrelas do campo, os candidatos a remanescentes estudados encontram-se a latitudes Galácticas relativamente altas ( $|b| < 15^\circ$ ). A comparação entre densidades foi feita de duas maneiras: (i) os autores contaram as estrelas a partir de imagens do DSS na região do aglomerado acima de uma magnitude limite para a qual o objeto prevalece sobre o campo de sua vizinhança; compararam então essa contagem com a de estrelas baseada na previsão de um modelo teórico de estrutura Galáctica para a mesma faixa de magnitudes; (ii) a mesma contagem de estrelas foi comparada com a contagem de estrelas em 100 campos vizinhos utilizando o GSC com o mesmo ângulo sólido do objeto. Para a amostra selecionada, é possível verificar que, apesar de menos povoados do que os aglomerados abertos, os candidatos a remanescentes apresentam um alto contraste de densidade de número de estrelas em relação ao campo Galáctico (Tabela 1 de Bica et al. 2001 [12]).

Com base no método citado, apresentaremos a seguir um método complementar para a análise de candidatos a remanescentes e seus campos. Vamos analisar a distribuição de estrelas no plano do CMD dos candidatos a remanescentes e compará-la à do campo Galáctico. Dos 23 objetos que estão em foco neste trabalho, 10 pertencem à lista de 34 candidatos a remanescentes do artigo já mencionado.

No capítulo anterior, estudamos as propriedades estruturais das concentrações estelares da presente amostra. Vimos que os objetos classificados morfologicamente como esparsos e compactos têm perfis radiais de densidade de estrelas típicos para cada classificação. Nesse momento, passaremos ao estudo da distribuição das estrelas no plano do CMD dos objetos e de campos Galácticos próximos, verificando igualmente se alguma correlação com as propriedades estruturais pode ser feita.

Os dados fotométricos 2MASS foram extraídos levando-se em conta o perfil de densidade radial (Seção 2.3) de forma a englobar a região com maior contraste em relação ao campo, não implicando, desse modo, a inclusão de toda a extensão do objeto. Também do catálogo 2MASS, foram extraídos os campos correspondentes a cada objeto. Estes, estando sempre a uma distância máxima correspondente a 1 diâmetro do objeto em declinação, para minimizar assim a possibilidade de sobreposição objeto/campo. Essa escolha não exclui, no entanto, a possibilidade da região na direção do objeto estar contaminada com estrelas de campo.

### 3.1.1 Método e aplicação

A utilização de diferentes testes estatísticos para comparação entre distribuições bidimensionais de pontos no CMD vem sendo aplicados por diversos autores, de acordo com o objetivo a ser alcançado. Kerber (2004)[50] lançou mão de 4 deles com o intuito de alcançar um método objetivo capaz de reproduzir e discriminar CMD's modelados que melhor reproduzam as características de um CMD observado. Os testes estatísticos escolhidos, efetuam de alguma forma comparações entre contagens de estrelas em caixas no plano do CMD. No mencionado trabalho encontramos uma descrição de cada uma desse teste e sua aplicação. De maneira geral podemos descrevê-los, segundo o autor, como segue. A teste  $\chi^2_\gamma$  (Mighell 1999)[63], foi utilizado essencialmente como

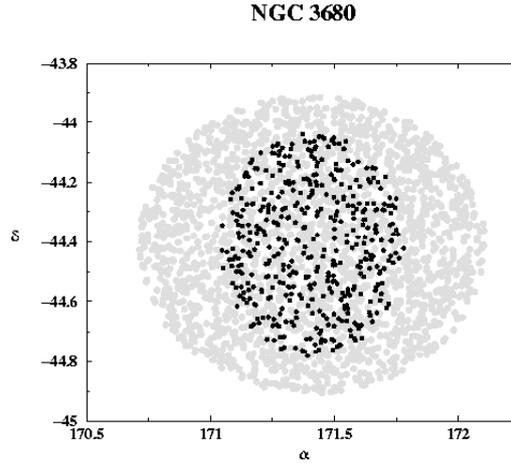


Figura 3.1: Distribuição angular das estrelas do campo Galáctico próximo a NGC 3680 (círculos cinzas) e das coordenadas centrais das amostragens (círculos pretos).

medida de “dispersão”<sup>1</sup> entre duas distribuições de pontos em um plano. Assim, quanto menor for o seu valor, melhor será o CMD modelado. O teste pss, usado no estudo de segregação espacial de Galáxias por Santiago & Strauss (1992)[74], indicou a compatibilidade entre duas distribuições. O terceiro teste abordado foi o W de Saha (Saha 1998)[76], Valls-Gabaud & Lastennet 1999)[87], onde o valor de W é proporcional à probabilidade do modelo ser compatível com a observação. O quarto e último teste estatístico foi o L, uma versão empírica para a estatística de verossimilhança descrita e usada por Hernandez et al. (1999)[44], foi interpretado como uma função de probabilidade ao longo do plano do CMD. Os resultados deste trabalho foram também publicados em Kerber & Santiago (2005)[51].

Para o nosso caso, necessitamos de um método objetivo envolvendo a comparação entre CMD’s que permita testar a hipótese dos objetos serem campo. Para tanto, partimos da premissa que se a distribuição de estrelas no CMD de uma concentração estelar reproduzir a distribuição de estrelas de regiões no campo próximo, ambas com mesmo ângulo sólido, poderemos dizer que tal concentração é representativa do campo.

Para podermos comparar tais distribuições foi selecionado para cada objeto um campo próximo de grande ângulo sólido. Em seguida, obtiveram-se regiões representativas do mesmo, por meio de uma amostragem simples da população. Foram, então, sorteados aleatoriamente pontos internos ao diâmetro angular do campo próximo. Esses pontos correspondem às coordenadas centrais, em ascensão reta e declinação, de regiões de mesmo diâmetro angular que o objeto.

As regiões foram denominadas amostragens e seu número varia de acordo com o par objeto/campo. Na figura 3.1, vemos as estrelas pertencentes ao campo de NGC 3680 (tabela 3.1) e as coordenadas centrais em  $\alpha, \delta$  das amostragens.

Tendo-se os objetos, campos próximos e amostragens correspondentes, aplicou-se o método a seguir descrito para comparação de distribuições no plano do CMD.

---

<sup>1</sup>Aspas utilizadas pelo autor.

O CMD de cada objeto foi dividido em caixas limitadas em cor ( $\Delta_{(J-H)} = 0.125$ ) e magnitude ( $\Delta_J = 0.5$ ), formando uma grade sobre o mesmo. Foram consideradas somente aquelas caixas que continham estrelas. A mesma grade cor-magnitude foi aplicada ao CMD do campo Galáctico próximo de grande ângulo sólido e aos CMD's das amostragens, criadas a partir desse campo. Em cada caixa da grade, foram contadas as estrelas e calculada a densidade correspondente

$$\rho_{cx} = \frac{N_{estrelas}}{\Omega} \quad (3.1)$$

onde  $\Omega$  é o ângulo sólido do objeto ou do campo próximo, dependendo da situação. As amostragens do campo têm ângulo sólido igual ao do objeto a que estão relacionadas.

Nessa primeira etapa, desse modo, foram obtidas as densidades de cada caixa em cor e magnitude correspondentes ao campo próximo, às amostragens e aos objetos.

No Apêndice A são disponibilizados CMD's com as estrelas dos objetos da amostra sobrepostas às estrelas do campo Galáctico próximo selecionado. Os raios de extração correspondem aos valores apresentados nas colunas (8) e (4) das tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Para testarmos a hipótese do objeto ser campo foi necessário definirmos como seria feita a comparação entre as densidades obtidas. A premissa inicial foi traduzida em uma estatística  $S_i$ , que reflete as flutuações estatísticas do campo, definida por

$$S_i^2 = \sum_{j=1}^n (\rho_{jcx} - \rho_{campo})^2 \quad (3.2)$$

onde  $n$  corresponde ao número de caixas da grade para cada par objeto/campo no CMD,  $\rho_{jcx}$  corresponde as densidades para o objeto ou para cada amostragem, dependendo da situação. E, finalmente  $\rho_{campo}$  corresponde a densidade do campo próximo de grande ângulo sólido. A estatística que usamos inspira-se na estatística  $\chi_\gamma^2$  de (Mighell 1999)[63].

Cada objeto tem um único valor de  $S_o^2$  que reflete a distribuição de suas estrelas no plano do CMD, o mesmo valendo para cada amostragem. O conjunto dos valores  $S_i^2$  das amostragens reflete como as estrelas do campo próximo estão distribuídas no CMD.

A fim de realizar uma análise quantitativa da semelhança do objeto com relação ao campo próximo, para cada par objeto/campo, construímos um histograma que representa a distribuição adotada pelos  $S_i^2$ . Tem-se, então, a frequência das amostragens por intervalos de  $S_i^2$ .

Para relacionarmos  $S_o^2$  com a probabilidade de ser representativo do campo, calculamos sua proximidade da mediana,  $S_M^2$ , da distribuição das amostragens - valor que ocupa a posição central dos dados ordenados. Assim, teoricamente, se  $S_o^2$  for igual a  $S_M^2$ , o objeto será 100% representativo do campo; conservadoramente assumimos que, se  $S_o^2$  localiza-se fora da distribuição das amostragens a probabilidade associada a esse objeto será  $p < 1\%$ . A probabilidade é dada, pois, pela expressão

Nome	M	D (')	d(')	$C_{\text{obj}}$	$C_{\text{mod}}$	$C_{\text{GSC}}$	R (')	$S_o^2$	p
NGC 6481	C	1.3	1.1	-	-	-	1	0.820	< 1
M 73, NGC 6994	C	9	9	5	1.30	1.01	2	0.060	< 1
NGC 6863	C	2	1.5	3	1.00	0.37	1	0.575	< 2
NGC 1663	E	11	11	-	-	-	5.5	0.005	< 10
ESO 425SC6	E	6	6	36	13	4.67	3	0.026	< 1
ESO 425SC15	E	6	6	10	3.8	3.84	3	0.027	< 1
Ruprecht 3	C	3.5	3	-	-	-	1.5	0.102	< 1
ESO 426SC26	E	7	7	15	6.47	5.85	3	0.0286	< 6
ESO429SC2	E	5	3.5	-	-	-	2.5	0.144	< 2
Ruprecht 31	C	3.5	2.5	-	-	-	1.75	0.142	< 2
Ruprecht 156	C	0.7	0.7	-	-	-	2	0.281	< 1
NGC 2645	C	4.5	3.5	-	-	-	2.5	0.256	< 1
Waterloo 6	C	3.5	3	-	-	-	2	0.780	< 90
ESO211SC8	C	1.2	0.8	-	-	-	1	2.010	< 1
ESO 570SC12	E	13	13	10	3.01	2.15	5	0.0047	< 1
NGC 1252	E	14	11	8	1.02	1.04	7	0.0008	< 1
NGC 1901	E	19	19	9	0.91	2.63	3	0.0303	< 1
Objeto 1	C	0.9	0.5	-	-	-	1	1.38	< 1
ESO132SC14	C	0.8	0.4	-	-	-	1	1.85	< 1
ESO 383SC10	E	5	3.5	-	-	-	2.5	0.0404	< 1
IC 1023	E	5	5	13	4.72	3.19	2.5	0.0683	< 1
Lynga 8	C	1	0.9	-	-	-	1	0.8900	< 1
ESO389**5	C	1.8	1.0	-	-	-	1	0.5900	< 1
NGC 3680	E	15	15	20	6.14	3.55	3	0.0710	< 1
							7.5	0.0192	< 8

Tabela 3.1: Resultados do teste estatístico para os 23 objetos estudados e o aglomerado aberto evoluído NGC 3680. As informações das colunas de 3 a 7 foram retiradas da Tabela 1 de Bica et al. 2001 [12].

$$p = \frac{\aleph - j}{\frac{\aleph}{2}} * 100 \quad (3.3)$$

onde  $\aleph$  é o número de intervalos e  $j$  é o intervalo em que localiza-se o valor da estatística para o objeto,  $S_o^2$ .

Note que  $\aleph/2$  é o intervalo correspondente à posição da mediana,  $S_M^2$ .

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as concentrações estelares e seus campos, respectivamente, e incluem o aglomerado aberto de idade intermediária NGC 3680. A tabela 3.1 fornece em suas colunas: (1) nome; (2) classificação morfológica; (3) e (4) diâmetro maior e menor, respectivamente; (5) e (6) resultado da contagem de estrelas na direção do objeto, segundo um modelo e (7) através do GSC (informações extraídas da Tabela 1 de Bica et al. 2001 [12]). As últimas colunas dizem respeito à considerações feitas nesta subseção, quais sejam: (8) raio da extração; (9) estatística  $S_o^2$  e (10) probabilidade do objeto ser representativo do campo. A tabela 3.2 apresenta os campos estudados, onde as colunas indicam: (1) campo correspondente ao objeto estudado; (2) e (3) ascensão reta e declinação em J2000.0; (4) raio angular do campo; (5) número de estrelas do campo; (6) número de estrelas do campo efetivamente usadas na comparação.

A figura 3.2 apresenta histogramas de  $S_M^2$  para NGC 3680 para dois raios de extração distintos. As amostragens nos dois histogramas foram construídas a partir do mesmo campo Galáctico próximo, apenas com raios

Nome	$\alpha$	$\delta$	$R_C$	$N_t$	$N_p$
	h:m:s	°:':"	'		
Campo de NGC 6481	17:52:48	4:45:00	30	3144	826
Campo de NGC 6994	20:58:55	-13:26:03	30	1090	213
Campo de NGC 6863	20:05:07	-4:13:20	30	2842	671
Campo de NGC1663	4:49:18	13:59:47	30	1171	805
Campo de ESO 425SC6	6:04:50	-30:22:59	30	1231	627
Campo de ESO 425SC15	6:14:35	-30:04:30	30	1383	766
Campo de Ruprecht 3	6:42:07	-30:07:15	30	2063	886
Campo de ESO 426SC26	6:36:18	-31:35:30	30	1768	1043
Campo de ESO429SC2	7:33:24	-28:51:15	30	6013	3581
Campo de Ruprecht 31	7:42:58	-36:22:50	30	4786	3918
Campo de Ruprecht 156	8:19:23	-45:56:23	30	6454	3629
Campo de NGC 2645	8:39:03	-46:54:08	30	8438	5965
Campo de Waterloo 6	8:40:20	-46:44:55	30	8673	5657
Campo de ESO211SC8	9:16:29	-49:43:10	30	9898	2610
Campo de ESO 570SC12	11:12:12	-22:15:13	30	650	308
Campo de NGC 1252	3:10:49	-58:40:00	30	534	279
Campo de NGC 1901	5:18:11	-69:07:00	24.73	1704	613
Campo de Objeto 1	11:41:37	-63:05:05	23	1000	2234
Campo de ESO132SC14	13:36:30	-62:52:49	21.77	1000	1839
Campo de ESO 383SC10	13:31:30	-35:43:56	30	1307	303
Campo de IC 1023	14:32:25	-36:28:13	30	1885	866
Campo de Lynga 8	16:20:04	-50:54:04	20.36	10000	1779
Campo de ESO389**5	15:57:50	-36:47:25	30	4248	612
Campo de NGC 3680	11:25:38	-44:24:30	30	2184	1326 (r = 3) 1685 (r = 7.5)

Tabela 3.2: Parâmetros obtidos para os campos, incluindo os valores de ascensão reta e declinação (J2000.0) correspondentes.

distintos. A partir da figura, podemos constatar que a presença de estrelas de campo no CMD do aglomerado influencia diretamente em seu valor  $S_o^2$ . Para  $r = 3'$ , cujo CMD apresenta pouca contaminação por estrelas notavelmente de campo (figura A.1, painel à esquerda), o valor de  $S_o^2$  do aglomerado não pertence à distribuição de valores das amostragens tendo, por definição,  $p < 1\%$  de ser representativo do campo. Já para  $r = 7.5'$ , cuja extração sabíamos conter contaminação significativa por estrelas do campo,  $S_o^2$  pertence à distribuição de valores das amostragens e a probabilidade resulta em  $p < 8\%$ .

A última coluna da tabela 3.1 apresenta em valores percentuais a semelhança entre um objeto e o campo próximo correspondente. Entre os compactos, NGC 6863 e Ruprecht 31 (figura 3.3) apresentam probabilidades  $p < 2$ , de serem representativos de seus campos. Já Waterloo 6 (figura 3.4) possui alta probabilidade de ser representativo do campo próximo ( $p < 90\%$ ), isto é, de ser uma flutuação de estrelas do campo. Entre os esparsos, NGC 1663, ESO426SC6 (figura 3.6) e ESO429SC2 (figura 3.7) apresentam probabilidades de  $p < 10$ ,  $p < 6$  e  $p < 2$ , respectivamente. O restante dos objetos nas figuras 3.3 a 3.8, classificados tanto como compactos quanto esparsos apresentam valores de  $S^2$  que caem nos limites da asa ou fora da distribuição de amostragens do campo próximo, isto é, têm probabilidade  $p < 1\%$ .

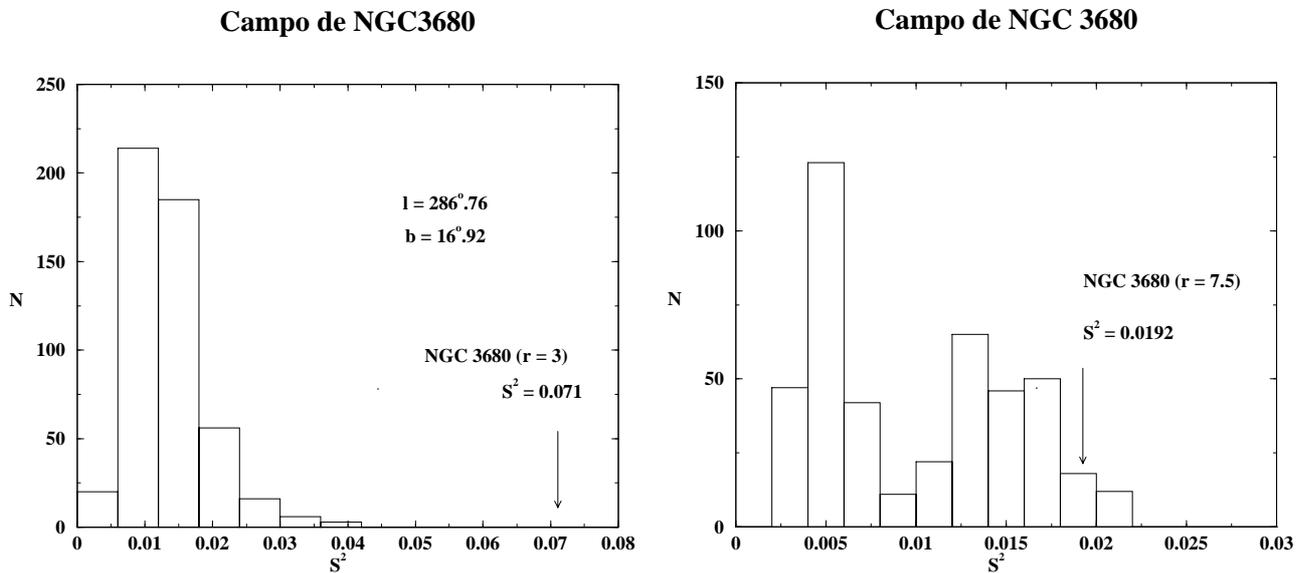


Figura 3.2: Histograma do número de amostragens por intervalo de  $S^2$  para NGC 3680. À esquerda temos o objeto e as amostragens do campo com raio  $3'$ ; à direita ambas com raio  $7.5'$ .

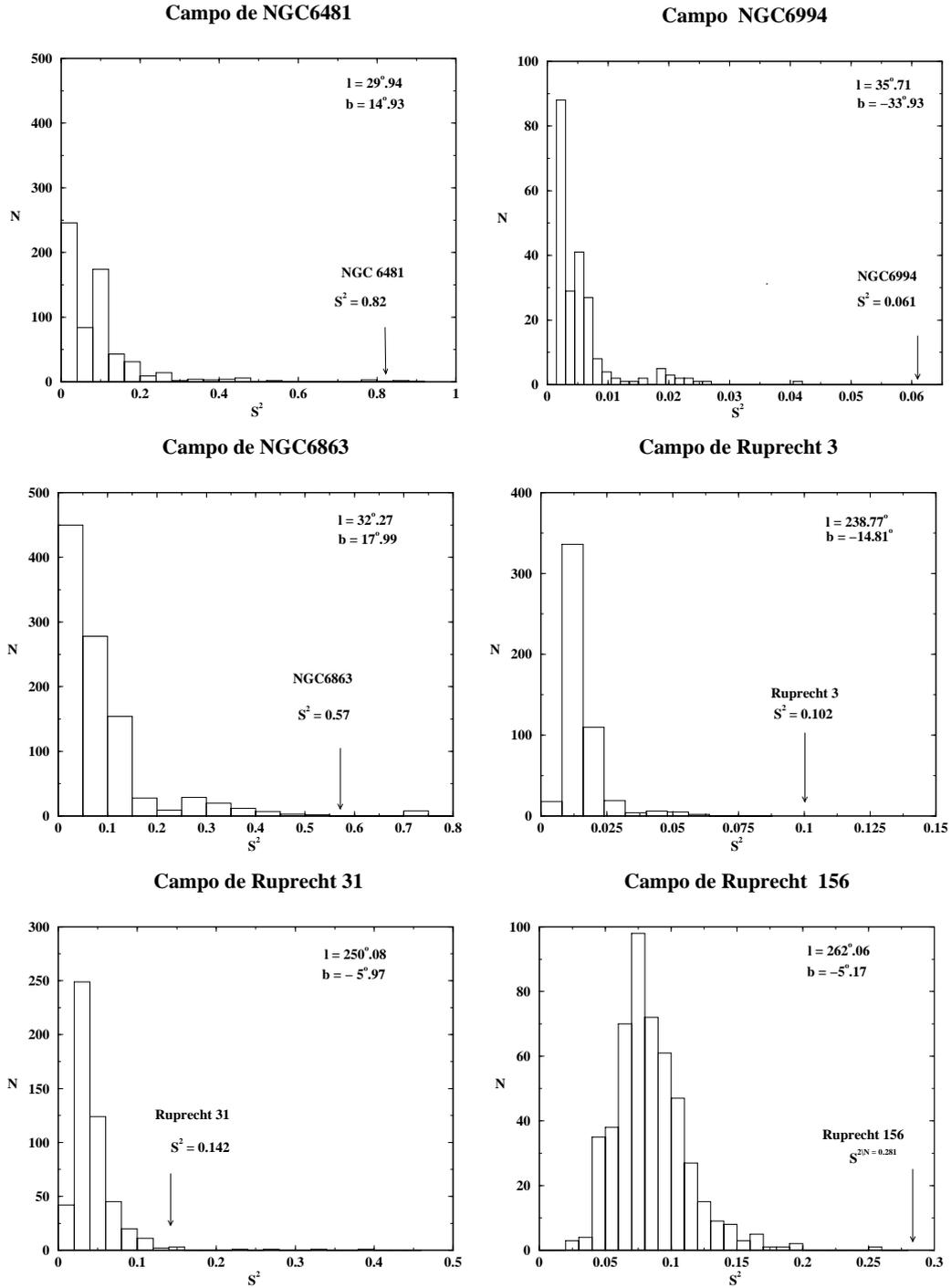


Figura 3.3: Histogramas do número de amostragens por intervalo de  $S^2$ . Em cada um são mostradas as coordenadas Galácticas  $l$  e  $b$  além do valor de  $S_o^2$  do objeto. Objetos com morfologias compactas.

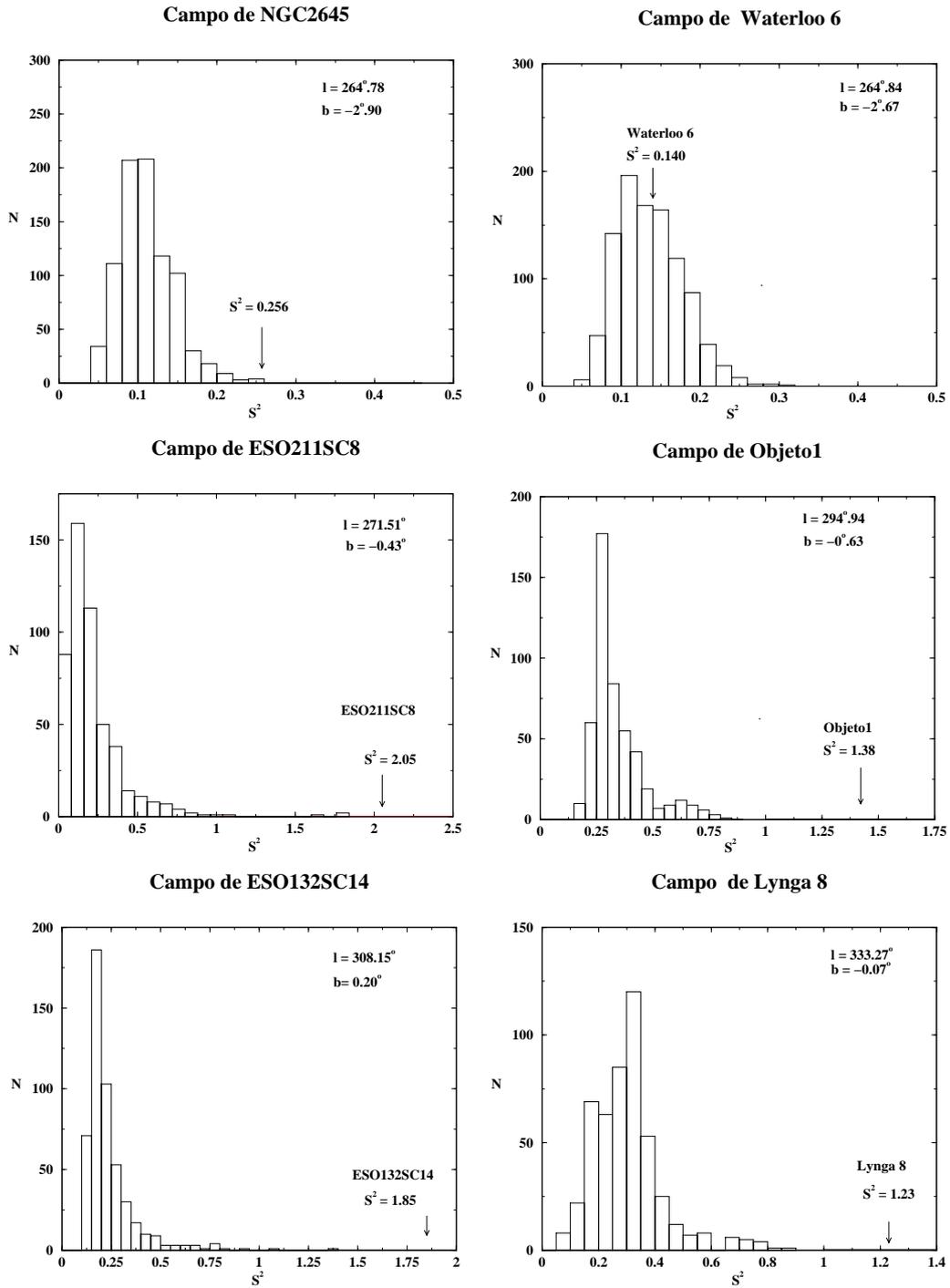


Figura 3.4: Idem à legenda da figura 3.3.

**Campo de ESO389E5**

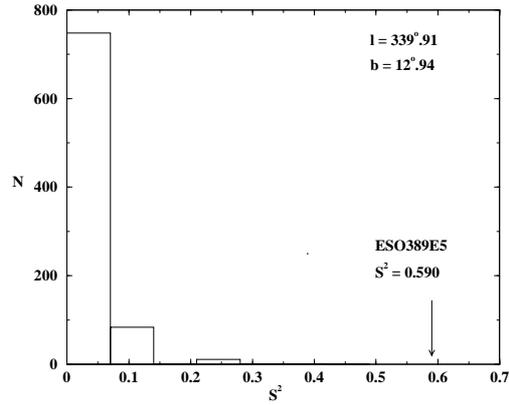
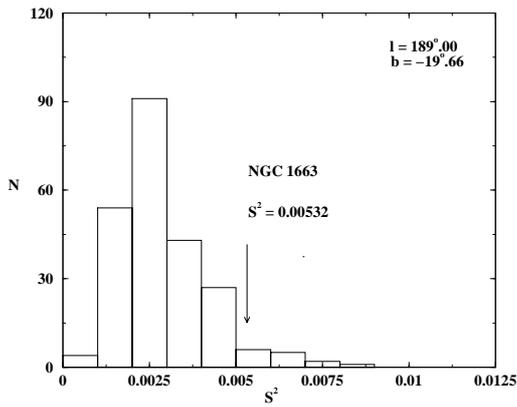
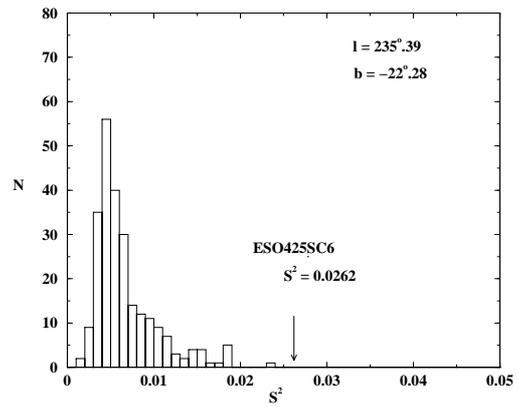


Figura 3.5: Idem à legenda da figura 3.3.

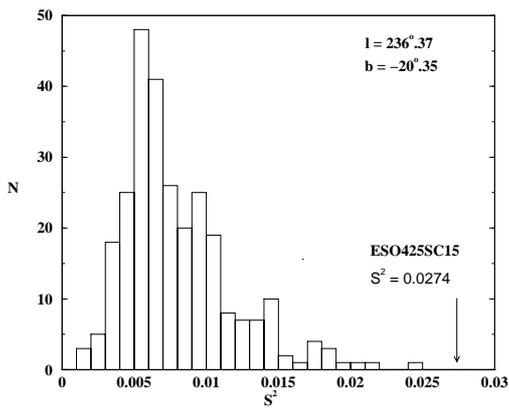
**Campo de NGC1663**



**Campo de ESO425SC6**



**Campo de ESO425SC15**



**Campo de ESO426SC26**

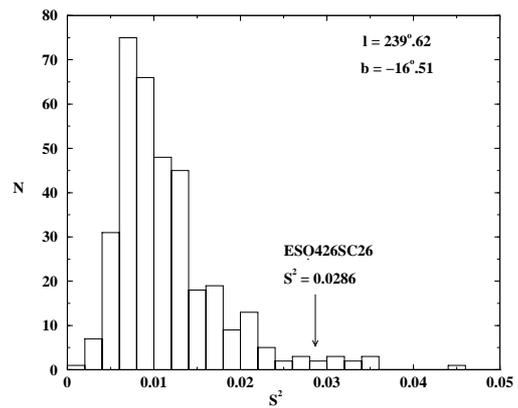


Figura 3.6: Histogramas do número de amostragens por intervalos de  $S^2$ . Em cada um são mostradas as coordenadas Galácticas  $l$  e  $b$  além do valor de  $S^2$  do objeto. Todos os objetos com morfologias esparsas.

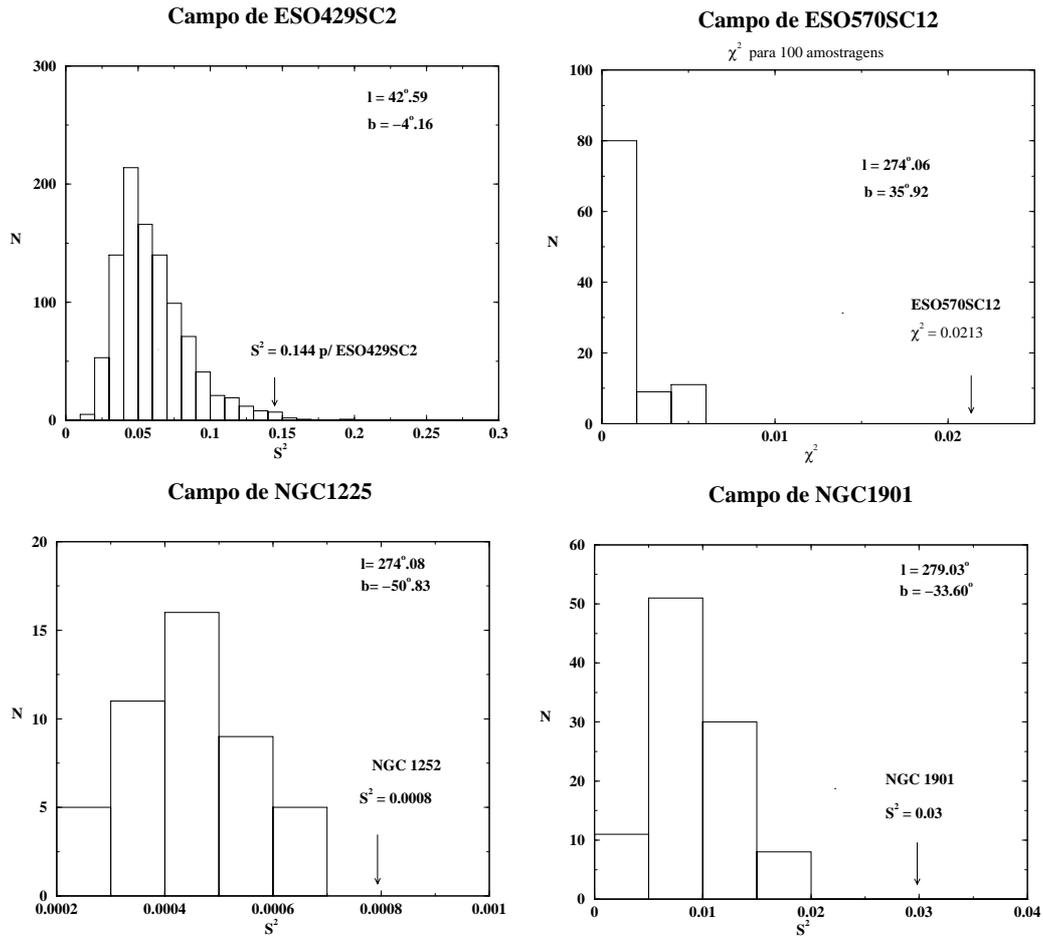


Figura 3.7: Idem à legenda da figura 3.6.

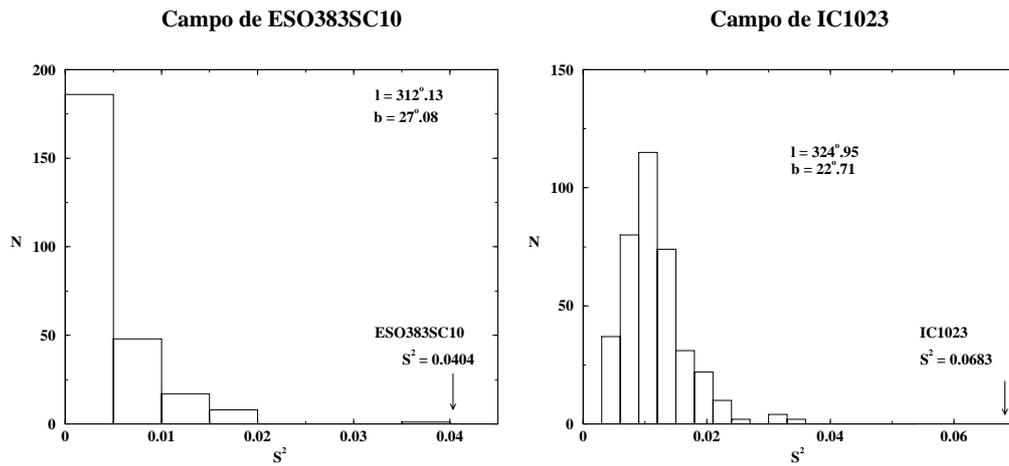


Figura 3.8: Idem à legenda da figura 3.6.

### 3.1.2 Conclusão

O teste para verificar a semelhança entre objeto e campo, através de um método estatístico de comparação entre distribuições de estrelas no CMD, fornece importantes resultados. Mesmo não sendo possível afirmar por

meio dele se um sistema é físico, o método é capaz de indicar se um objeto representa uma distribuição, em cor e magnitude, esperada para o campo na vizinhança. Além disso, o teste estatístico é sensível ao contraste de densidade entre objeto e campo. Dos 23 objetos estudados, 17 apresentaram uma probabilidade  $p < 1\%$  de serem representativos do campo, 5 apresentaram  $1 < p < 10\%$  e 1 probabilidade  $p < 90\%$ . Assim, podemos considerar que 22 objetos da amostra se configuram como fortes candidatos a remanescentes de aglomerados abertos, e um - Waterloo 6 - como uma provável flutuação de estrelas do campo. Da amostra total de objetos classificados morfologicamente como compactos, 77% possui probabilidade  $p < 10\%$ . Em relação aos esparsos 70% deles ficou dentro dessa mesma faixa de probabilidades. Esses resultados sugerem que não existe correlação entre as propriedades estruturais e a semelhança ou não entre a distribuição de estrelas de objetos e campos próximos no CMD.

Por fim, ressalta-se o CMD como uma potente ferramenta, que além de fornecer parâmetros como idades, avermelhamentos e distâncias, permite estudos adicionais como os desenvolvidos nesta seção.

## 3.2 Combinações Aleatórias de Espectro Estelares Podem Reproduzir Espectros de Aglomerados Abertos ?

Como já discutido nos capítulos anteriores, aglomerados abertos ao evoluírem, passam pelos processos de relaxação dinâmica, segregação de massa e equipartição de energia, que serão mais ou menos intensos dependendo de sua posição na Galáxia, massa e densidade. A luz integrada de um aglomerado aberto irá refletir sua população estelar em termos da proporção em fluxo de cada tipo espectral e deve seguir uma função de massa.

Os remanescentes de aglomerados abertos são o resultado da perda de estrelas do aglomerado progenitor, e estas são preferencialmente estrelas da baixa MS. A erosão sistemática da função de massa pode levar ao domínio da luz integrada por poucas estrelas mais luminosas. Mas ainda assim espera-se que sua luz integrada seja semelhante à de aglomerados abertos, possibilitando a identificação de remanescentes com distintos tipos espectrais. Santos et al. (1990)[73] mostra que o espectro integrado de um aglomerado aberto é dominado pelas estrelas da alta MS, TO e gigantes.

Ao estudarmos a luz integrada de candidatos a remanescentes de aglomerados abertos surge uma questão: será possível distinguir entre sistemas físicos e flutuações de campo através da análise da luz integrada? Ou, em outras palavras, conjuntos de estrelas que resultam ser flutuações de campo podem reproduzir o espectro integrado de aglomerados abertos? Como já dito, os espectros reais de aglomerados abertos seguem uma função de massa, portanto, espera-se que combinações aleatórias de estrelas não reproduzam os mesmos facilmente.

A seguir será mostrado um estudo onde buscou-se verificar se espectros resultantes da combinação aleatória de estrelas assemelham-se a espectros de aglomerados abertos.

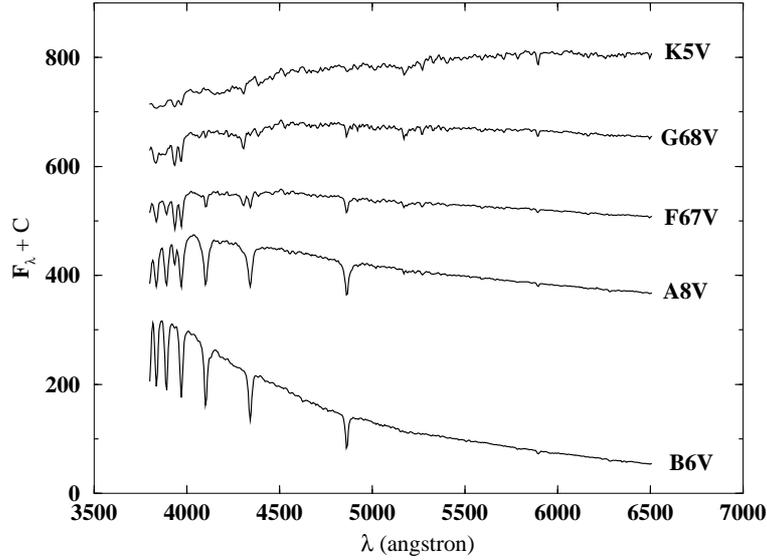


Figura 3.9: Os 5 tipos espectrais que formam a base de estrelas. Os espectros são mostrados entre  $3500 < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ , uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização.

### 3.2.1 Método e aplicação

Para construir a combinação aleatória utilizou-se uma base com 5 espectros de estrelas da biblioteca de Silva e Cornell (1992)[80], buscando cobrir uma ampla faixa em temperatura de estrelas características da MS: B6V, A8V, F67V, G68V e K5V. Na figura 3.9 são mostrados estes 5 espectros estelares que constituem a base. Através de um algoritmo padrão de geração de números aleatórios obtiveram-se 50 conjuntos de 5 números. Cada um dos espectros da base foi associado a um destes 5 números, correspondendo a pesos. A soma dos 5 números é igual a 1. Assim, foi possível obter 50 combinações aleatórias de espectros, através do sistema IRAF. Ou seja, os espectros finais foram gerados pela combinação dos espectros da base de acordo os pesos escolhidos.

As 50 combinações aleatórias de espectros foram comparadas a espectros integrados médios de aglomerados abertos da biblioteca de Piatti et al. (2002)[69]. Foram selecionados, desta amostra, os seguintes valores em idade: 45-75, 100-150, 200-350 e 500 Myr, e 1, 3 - 4 Gyr, mostrados na figura 3.10

A comparação foi realizada considerando a compatibilidade em relação ao contínuo e em relação as linhas. Os espectros estelares da base já estão corrigidos por avermelhamento, assim como os espectros integrados médios de aglomerados aberto de aglomerados (*templates*<sup>2</sup>). Para efeito de comparação foi delimitada a região do espectro entre 3800 e 6500  $\text{\AA}$ , buscando cobrir uma razoável faixa em fluxo e qualidade do espectro. Como os espectros combinados tem passo (intervalo em fluxo) 5  $\text{\AA}$  e os *templates* 2  $\text{\AA}$ , estes últimos foram degradados para passo (intervalo em fluxo) 5  $\text{\AA}$ . As figuras 3.11, 3.12 e 3.13 mostram os 50 espectros que resultaram da combinação aleatória de espectros da base.

<sup>2</sup>*templates* são espectros de comparação, previamente obtidos para objetos bem conhecidos.

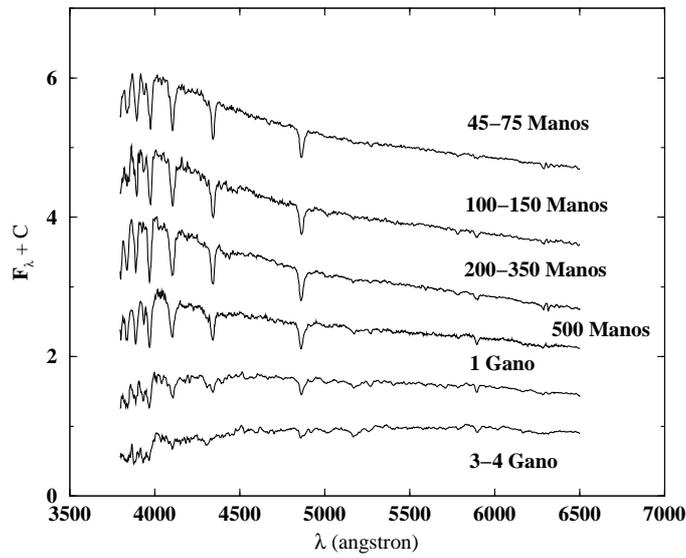


Figura 3.10: Espectros integrados médios de aglomerado aberto, e suas respectivas idades, utilizados como espectros de comparação em relação às combinações aleatórias. Intervalo entre  $3800 < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ . Uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização.

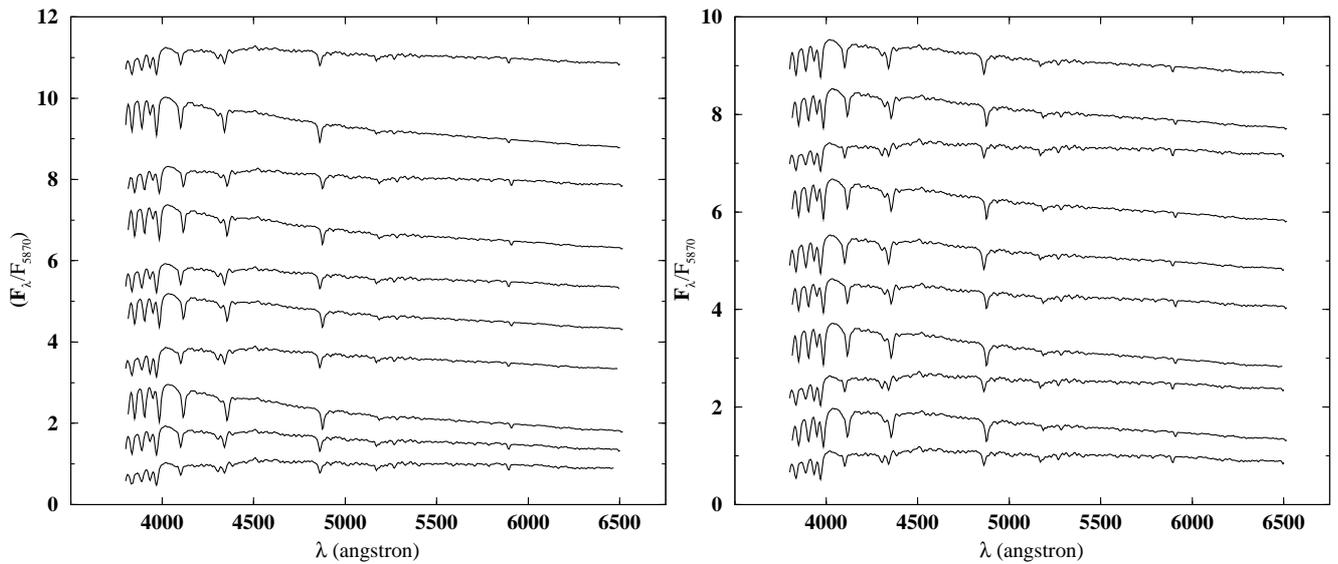


Figura 3.11: Os painéis mostram combinações aleatórias de espectros que são mostradas entre  $3800 < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ . Uma constante arbitrária foi adicionada para melhor visualização.

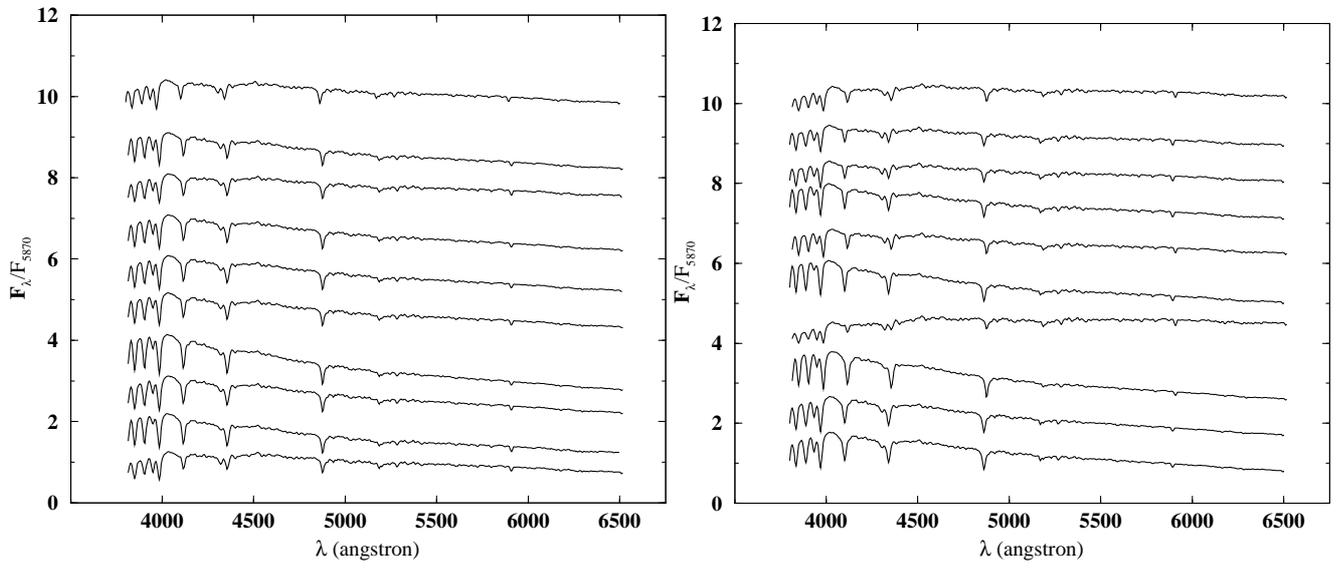


Figura 3.12: Idem à legenda da figura 3.11.

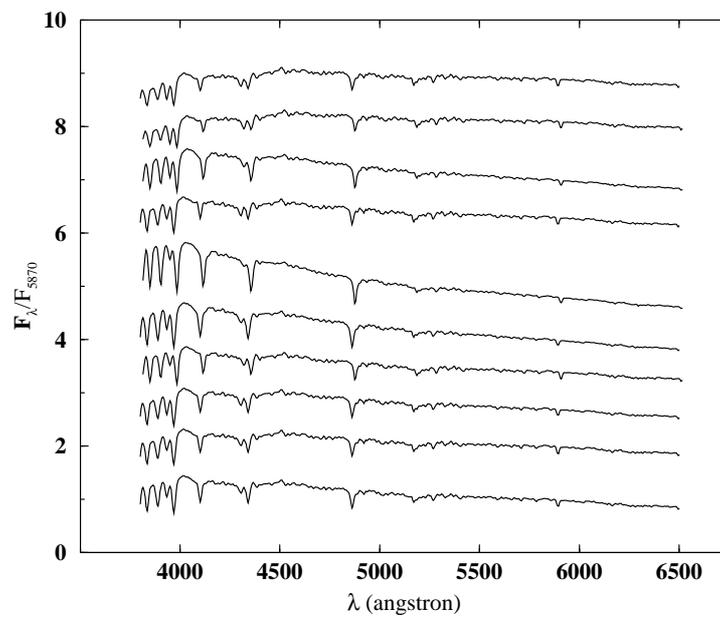


Figura 3.13: Idem à legenda da figura 3.11.

### 3.2.2 Comparando Contínuos

A comparação entre contínuos se deu pela obtenção do desvio padrão do fluxo do espectro combinado em relação ao do *template*.

$$\sigma_{contínuo} = \sqrt{\sum \frac{(x - \bar{x})^2}{n - 1}},$$

onde  $x$  é o valor absoluto da diferença entre os fluxos e  $\bar{x}$  é a média destas diferenças. Sendo assim, quanto menor  $\sigma$  mais semelhantes serão os contínuos.

Foram calculados os desvios de cada espectro combinado em relação aos 6 *templates* de aglomerado aberto, a fim de encontrar o mais compatível. Assim, foram obtidos 300 valores para  $\sigma$ . Na análise dos resultados considerou-se, entre os seis valores de  $\sigma$  para cada espectro combinado, o menor valor. Os valores de  $\sigma$  variam entre 0.027 e 0.084.

A semelhança entre os contínuos, ou sua compatibilidade, é expressa por uma sobreposição dos mesmos. Como tanto os espectros combinados quanto os *templates* estão livres de avermelhamento, ao construirmos um gráfico não se deve proceder nenhum ajuste. Este foi o critério para a seleção dos melhores valores de desvio padrão. Aqui estamos interessados no ajuste de contínuos, independente da reprodução de linhas.

Entre os valores de  $\sigma$  que correspondem a um ajuste de contínuos aceitável é necessário considerarmos como conjuntos distintos os espectros combinados azuis, com maior contribuição das linhas de Balmer, e os vermelhos. Valores até  $\sigma = 0.042$  resultam em compatibilidade para espectros combinados azuis: 7 deles com o espectro médio de 500 Myr, 2 com 200-350 Myr e 1 com 100-150 Myr. Os valores até  $\sigma = 0.037$  resultam em compatibilidade para espectros vermelhos: 5 deles mostram-se compatíveis com contínuo de *template* de 1 Gyr e 1 com 3-4 Gyr.

A figura 3.14 apresenta quatro exemplos; nela são mostrados 2 espectros combinados dentro dos limites acima citados e, 2 *templates* que tiveram valores de  $\sigma$  acima do limite definido. Nos painéis superiores vemos que os contínuos se ajustam, praticamente sem diferenças sistemáticas, e o resíduo (A - B) é aproximadamente plano. Nos painéis inferiores vemos que o contínuo dos espectros combinados começa a se afastar do contínuo do *template* e, para valores de desvio maiores as diferenças sistemáticas passam a ser ainda maiores. O resíduo (A - B) já não é mais plano mostrando diferenças não só nas bordas mas ao longo do espectro.

Na Tabela 3.3 as colunas indicam: (1) 16 espectros combinados e *templates* que apresentaram compatibilidade; (2) idade dos *templates*; (3)  $\sigma$  para os contínuos; (4)  $\sigma$  em relação as larguras equivalentes de linhas e bandas.

É possível perceber pelos resíduos na figura 3.14 que o ajuste de contínuos não indica necessariamente que está ocorrendo o ajuste de linhas ou mesmo a sua reprodução. Isto é esta etapa do estudo nos indica que em certa medida a combinação aleatória de espectros pode reproduzir contínuos de espectros médios, mas não nos dá informação definitiva sobre a reprodução das linhas. Vemos, por exemplo, no painel superior à esquerda ainda na figura 3.14, que o espectro combinado 33 não reproduziu as linhas de Balmer, em detalhe. Ainda na

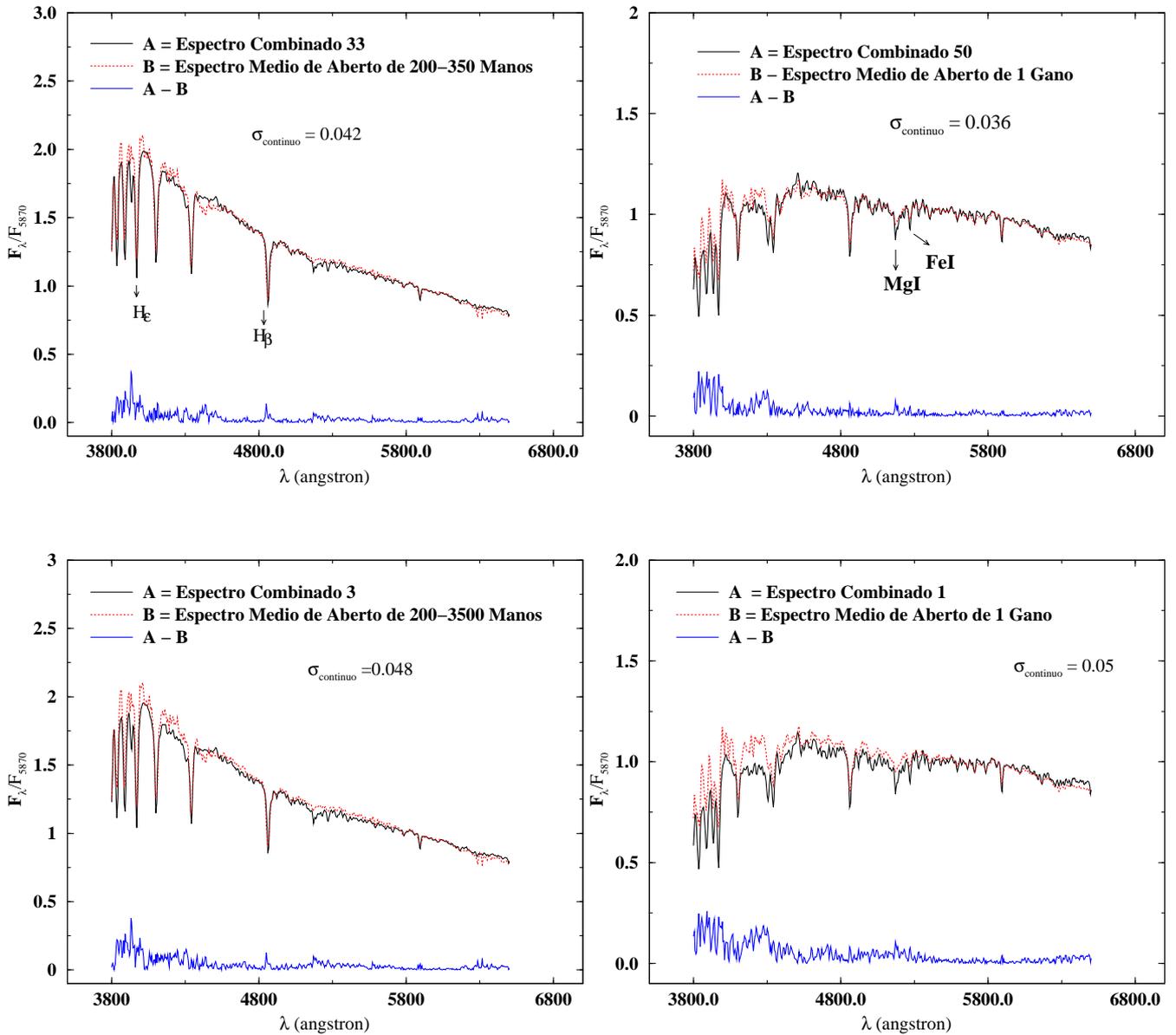


Figura 3.14: Para os quatro painéis: (A): Espectro combinado, (B): Espectro integrado médio de aglomerado aberto. (A -B): Espectro resultante da subtração ponto a ponto em fluxo. Os espectros estão normalizados em 5870 Å. Nos painéis superiores, temos os valores de desvio padrão mínimo ( $\sigma$ ) aceitos para os espectros azuis e vermelhos, respectivamente. Nos painéis inferiores, exemplo de ajustes com desvios superiores ao limite mínimo aceito.

Combinação/Espectro Médio	Idade (Gyr)	$\sigma_{contínuo}$	$\sigma_w$
Combinação 11/Ia	1	0.030	0.18
Combinação 13/Ia	1	0.028	0.16
Combinação 16/Yh	0.5	0.037	0.44
Combinação 18/Yh	0.5	0.027	0.58
Combinação 20/Yh	0.5	0.029	0.54
Combinação 21/Yh	0.5	0.034	0.30
Combinação 25/Ye	0.1 - 0.15	0.042	0.79
Combinação 33/Yg	0.2 - 0.35	0.042	0.47
Combinação 34/Ib	3 - 4	0.031	0.42
Combinação 36/Yh	0.5	0.042	0.39
Combinação 40/Ia	1	0.030	0.11
Combinação 44/Yh	0.5	0.040	0.55
Combinação 46/Yg	0.2 - 0.35	0.035	0.39
Combinação 48/Yh	0.5	0.042	0.30
Combinação 49/Ia	1	0.033	0.16
Combinação 50/Ia	1	0.036	0.16

Tabela 3.3: Espectros combinados que geraram os melhores ajustes.

mesma figura, vemos que no espectro combinado 50 a região do contínuo das linhas de absorção do MgI e FeI é bem reproduzida. Entretanto as larguras equivalentes apresentaram diferenças ao serem medidas (Seção 3.2.3). Já os espectros nos painéis inferiores (contra exemplos) mostram diferenças de contínuo e de linhas.

### 3.2.3 Comparando Linhas

Para complementar o estudo a respeito de combinações aleatórias de espectros procedeu-se a uma análise de larguras equivalentes. O objetivo é apurar em que medida os espectros da tabela 3.3 reproduziram as larguras equivalentes de seus espectros médios compatíveis.

Para tanto escolhemos as linhas e bandas de absorção mais indicadas para medidas de larguras equivalentes, indicadas na coluna 1 na tabela 3.4; na coluna 2 são indicados os limites das janelas espectrais. Foram medidas as larguras equivalentes para os 16 espectros combinados da tabela 3.3, assim como as larguras dos espectros médios, utilizando o programa “SPEED”<sup>3</sup>. Em seguida relacionou-se a diferença de uma dada largura equivalente de cada espectro combinado ( $C(w)_n$ ) com a largura correspondente do espectro médio ( $M(w_n)$ ) compatível, para as 8 larguras medidas, como expresso pela equação:

$$dif_n = |[C(w_n) - M(w_n)]|, \quad n = 1, \dots, 8 \quad (3.4)$$

normalizada em relação à largura equivalente do espectro médio em questão,

$$N_n = \frac{dif_n}{M(w_n)} \quad (3.5)$$

sendo o desvio padrão (coluna 5, tabela 3.3),

<sup>3</sup>Construído por Schmitt, H. R. no Instituto de Física da UFRGS.

Absorção	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
CaII K	3908-3952
CaII H; $H_\epsilon$	3952-3988
$H_\delta$	4082-4124
Banda G	4284-4318
$H_\gamma$	4318-4364
$H_\beta$	4846-4884
MgI	5156-5196
FeI	5244-5314

Tabela 3.4: Janelas espectrais para as bandas e linhas trabalhadas.

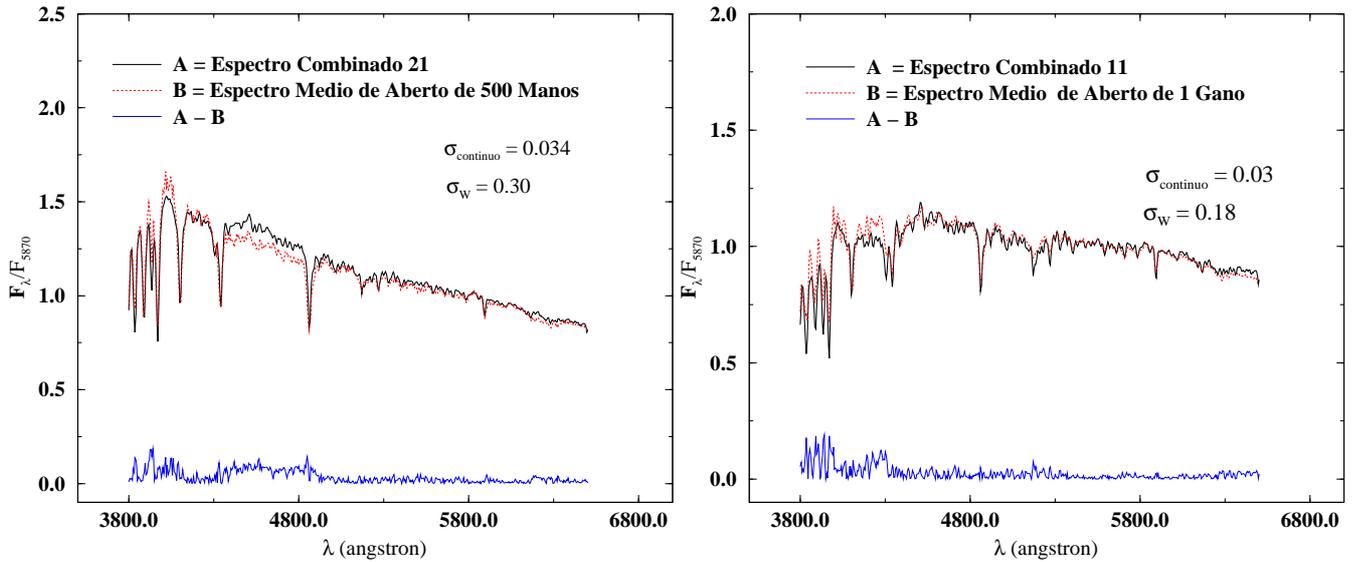


Figura 3.15: Os painéis apresentam dois espectros combinados no limite de nosso critério para ajuste aceitável. Em que (A): Espectro combinado, (B): Espectro integrado médio de aglomerados abertos. (A -B): Espectro resultante da subtração ponto a ponto em fluxo. Os espectros estão normalizados em 5870 Å.

$$\sigma_w = \sqrt{\sum_n \frac{(N_n - \overline{N_n})^2}{(n-1)}}, \quad n = 1, \dots, 8 \quad (3.6)$$

onde  $\overline{N_n}$  corresponde ao valor médio.

Procedendo da mesma forma que na análise dos valores de desvio padrão aceitáveis, em relação ao contínuo, conclui-se que para o caso das linhas os valores de desvio padrão até 0.30 correspondem a linhas razoavelmente reproduzidas, tanto para os espectros azuis quanto para os vermelhos. A figura 3.15 apresenta dois espectros combinados e seus ajustes, que apesar de algumas visíveis diferenças ainda podem ser considerados compatíveis aos espectros médios. Assim dos 50 espectros produzidos aleatoriamente chegamos a 7 deles reproduzindo de forma aceitável contínuos e linhas com suas respectivas larguras equivalentes, sendo 5 compatíveis com espectro médio de 1 Gyr e 2 compatíveis com 500 Myr, o que corresponde a 14 % da amostra total.

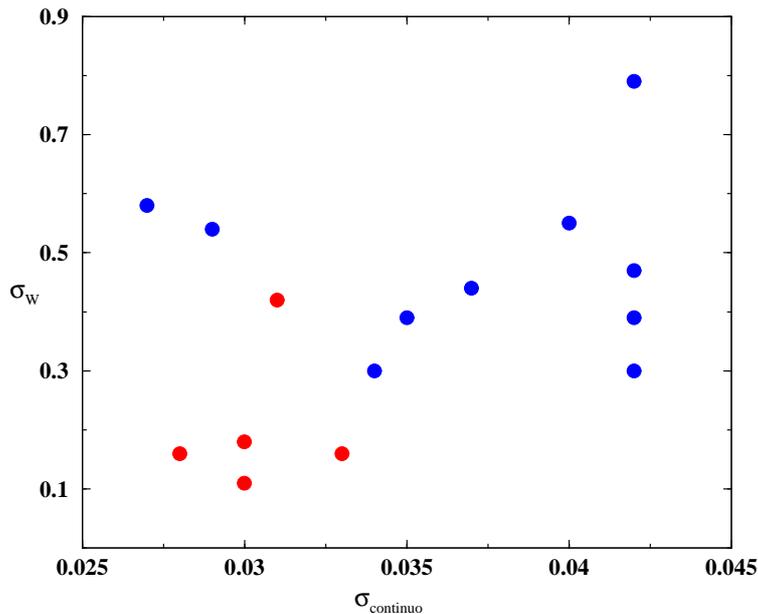


Figura 3.16: Diagrama dos desvios padrão das larguras equivalentes de linhas e bandas em função do desvio padrão dos contínuos para os 16 espectros que apresentam ajustes aceitáveis em relação aos espectros médios de comparação, sugerindo a não correlação entre ambos os desvios. Os pontos azuis correspondem aos valores para os espectros médios com idades entre 0.1 e 0.5 Gyrs. Os pontos vermelhos para idades de 1 a 3 Gyr.

### 3.2.4 Conclusões

O problema colocado nesta seção foi se seria possível distinguir entre sistemas físicos e flutuações de campo através da luz integrada dos mesmos. A abordagem feita foi a de responder a outra questão: conjuntos de estrelas que resultam ser flutuações de campo podem reproduzir o espectro integrado de aglomerados abertos?

Ao criarem-se espectros combinados aleatoriamente a partir de uma base de estrelas verifica-se que a reprodução de contínuos e a reprodução de linhas e larguras equivalentes são desacopladas. Isto porque, ao analisarmos nossos resultados temos que dos 50 espectros combinados, 16 apresentaram um ajuste razoável de contínuo. Desses 16, 7 também resultaram em compatibilidade de larguras equivalentes. Disso resulta que 14% do total de espectros mostrou compatibilidade de contínuos e larguras equivalentes simultaneamente em relação aos espectros médios utilizados. Entretanto, ao construirmos um gráfico dos desvios padrão das larguras equivalentes em função dos desvios dos contínuos (figura 3.16), o mesmo sugere que não há correlação entre resíduos de contínuos e de larguras equivalentes das linha e bandas.

O estudo aqui desenvolvido constitui-se em uma abordagem inicial. A presente análise sugere que espectros de candidatos a remanescentes de aglomerados abertos, provenientes de espectroscopia de baixa resolução (Capítulo 4), devem ser analisados considerando esta possibilidade de 14% dos espectros combinados aleatoriamente simularem espectros reais. Os parâmetros físicos, então deduzidos, serão complementares aos outros métodos.

## Capítulo 4

# Espectroscopia

Utilizamos espectroscopia integrada ou de estrelas individuais ou de estrelas mais brilhantes de alguns dos candidatos a remanescentes, visando obter parâmetros físicos complementares aos obtidos pela fotometria (Capítulo 5). Os dados espectroscópicos, no ótico, foram obtidos em turnos de observação que compreendem trabalho em colaboração com o Observatório Astronômico de Córdoba, sendo realizados no telescópio de 2.15 m do Complejo Astronômico El Leoncito (CASLEO/Argentina).

A Seção 2.1.3 fornece os detalhes técnicos dos turnos espectroscópicos. Em todas as observações foi utilizada uma fenda longa correspondendo a  $4.7''$ , que permitiu uma amostra do fundo do céu. A fenda tem uma largura de  $4.5 \text{ \AA}$ , resultando em uma resolução de  $\sim 17 \text{ \AA}$ , medida por meio da largura a meia altura (FWHM) de linhas de comparação. O *seeing* durante as noites foi de tipicamente  $2.0 \text{ \AA}$  e os espectros resultantes cobrem de  $3600$  a  $6900 \text{ \AA}$ , com uma dispersão média na região observada de  $\sim 138 \text{ \AA/mm}$  ( $3.3 \text{ \AA/pix}$ ). As reduções foram realizadas no Observatório Astronômico de Córdoba e no Instituto de Física da UFRGS por Andrea Ahumada e/ou Daniela Pavani, utilizando-se o pacote IRAF, seguindo os procedimentos padrões.

A tabela 4.1 informa os objetos cujos dados já foram reduzidos, com dados gerais dos turnos de observação. Por coluna temos: (1) nome; (2) turno em que foi feita a observação; (3) quem fez a observação; (4) forma de aquisição do espectro; (5) tempo de exposição; (6) tratamento para obtenção do espectro final.

Na coluna 4 da tabela 4.1 está detalhada a forma de aquisição do espectro. Para alguns objetos observaram-se as estrelas brilhantes individualmente. Para outros foi mantida a fenda fixa sobre 2-3 estrelas brilhantes. Em alguns casos foi obtido o espectro integrado da região central do objeto, ou de todo ele fazendo-se uma varredura. Alguns objetos foram divididos em regiões e a fenda localizada sobre cada uma delas ao longo de uma mesma exposição, esta aquisição é referida como “integrada em partes”. Para os espectros integrados foi realizada, quando necessário, a média ponderada das noites e/ou diferentes turnos de acordo com o sinal-ruído.

A luz integrada dos remanescentes pode ser semelhante à de aglomerados abertos caso um número significativo de estrelas mais massivas e luminosas ainda permaneça no objeto, isto porque a erosão sistemática da função de massa pode levar ao domínio da luz integrada por poucas estrelas mais luminosas, estas são dominan-

Nome	Turno	Observadores	Forma de Aquisição	$t_{exposio}$	Tratamento Final
	mês/ano			s	
NGC6481	outubro/02	A.A./C.P.	integrado (estrelas centrais)	900	soma dos 2 turnos em 1 espectro
	maio/03	A.A./C.P./D.P.	integrado (3 partes)	2400	
NGC6863	maio/03	A.A./C.P./D.P.	integrado (estrelas centrais)	2400	soma das 2 noites em 1 espectro
	maio/03	A.A./C.P./D.P.	integrado (3 partes)	24000	
Ruprecht 3	novembro/01	A.A./D.P.	integrado	2100	soma das exposições 1 espectro p/ cada estrela 1 espectros p/ estrela
	novembro/01	A.A./D.P.	integrado (3 estrelas)	600	
	novembro/01	A.A./D.P.	fixo (1 estrela)	300	
ESO429SC2	novembro/01	A.A./D.P.	integrado	1800	soma das exposições
Ruprecht 31	novembro/01	A.A./D.P.	integrado (3 estrelas)	1500	soma das exposições
Ruprecht 156	novembro/01	A.A./D.P.	integrado: total e 3 partes	2400 /1800	soma das exposições
ESO211SC8	novembro/01	A.A./D.P.	integrado: 3 partes e 3 estrelas	1800/1800	soma dos 2 turnos em 1 espectro
	maio/03	A.A./C.P./D.P.	integrado	3600	
Objeto 1	maio/03	A.A./D.P.	integrado: 3 partes, 3 estrelas	2700/900	soma das exposições
ESO132SC14	maio/02	A.A./J.S.	integrado	1200	soma das exposições
ESO383SC10	maio/02	A.A./J.S.	integrado	2400	soma das exposições
ESO389**5	maio/02	A.A./J.S.	integrado	2400	soma das exposições
Lynga 8	maio/03	A.A./D.P.	integrado (5 partes)	3600	soma das exposições

Tabela 4.1: Observações dos 12 objetos estudados. Nomenclatura: A.A.: Andrea Ahumada; C.P.: Celeste Parisi D.P.: Daniela Pavani; J.S.: Jules Soares.

tes na luz integrada de abertos (Santos et al. 1990)[73]. De acordo com as previsões teóricas os remanescentes de aglomerados abertos muito povoados poderiam ser dominados por estrelas de tipo espectral *late-type* e os remanescentes de abertos pouco povoados, por estrelas *early-type* (de La Fuente Marcos 1998)[28]. Isto pelas escalas de tempo distintas para a dissolução desses abertos com massas diferentes.

Assim, a obtenção de espectros para os candidatos tem por objetivo verificar se: (i) os espectros obtidos são comparáveis aos espectros de aglomerados abertos; (ii) é possível identificar distintos tipos espectrais. Em caso afirmativo, obtêm-se estimativas de idades e avermelhamentos.

## 4.1 Método para análise dos espectros

Um método de análise foi construído para a abordagem dos espectros finais obtidos. Esse possibilitou diferenciar os objetos de acordo com as características dos mesmos e a forma como foram obtidos espectros. Assim os objetos puderam ser separados em três grupos:

(1) Espectros integrados que envolveram essencialmente todas os prováveis membros dos objetos compactos: NGC6481, NGC6863, Objeto 1, Lynga 8 e Ruprecht 3;

(2) Espectros integrados que envolveram as estrelas mais brilhantes dos objetos compactos: Ruprecht 31, ESO211SC8, ESO132SC14. ESO389\*\*5;

(3) espectros integrados das estrelas mais brilhantes de objetos esparsos: ESO429SC2, ESO383SC10.

Ruprecht 156 cujas estrelas englobadas nas exposições basicamente definem o objeto, não pode ser incluído no grupo (1), como será adiante detalhado.

Inicialmente foram obtidas para todos os objetos medidas de larguras equivalentes (W) de  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$  e

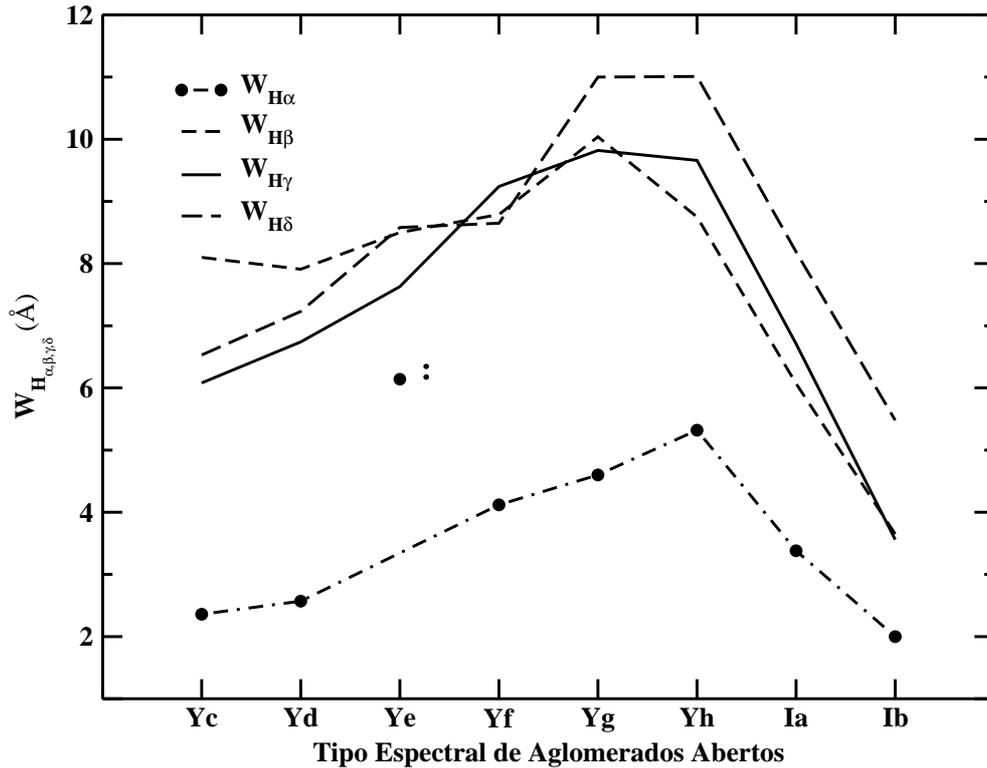


Figura 4.1: Diagrama das larguras equivalentes medidas nos *templates* de aglomerados abertos de Piatti et al. (2002)[69] em função dos tipos espectrais de diferentes idades. (:) Indica um ponto com incerteza importante, o qual foi desconsiderado.

$H_{\delta}$  dos espectros observados. Em seguida, os objetos tiveram as larguras equivalentes medidas comparadas de acordo com o grupo ao qual pertencem. Tendo-se as larguras equivalentes e comparando-se os espectros dos objetos com os *templates* mais indicados, obteve-se uma estimativa de idades e avermelhamento. Foram considerados como limite superior de avermelhamento os valores dados por Schlegel et al. (1998)[77] para a direção na Galáxia correspondente para cada objeto. O processo de obtenção das medidas de larguras equivalentes e comparação com *templates* foi realizado lançando-se mão do programa SPEED.

#### 4.1.1 Larguras equivalentes de aglomerados abertos

Os objetos do grupo (1) tiveram as larguras equivalentes medidas e comparadas as larguras equivalentes de espectros de aglomerados abertos, por meio do programa SPEED. Estes *templates* pertencem à amostra de Bica & Alloin (1986)[11], que relaciona as larguras equivalentes com diferentes idades. Outra fonte de *templates* foi de Piatti et al. (2002)[69] com espectros de aglomerados abertos Galácticos para diferentes grupos de idades, cujas larguras foram igualmente medidas e podem ser vistas na figura 4.1.

O *template* Ib de Piatti et al. (2002)[69] que corresponde à faixa em idades de 3 a 4 Gyr forneceu o melhor ajuste para o espectro integrado de NGC6863 (ajuste realizado usando-se o SPEED). A figura 4.2 mostra o *template* correspondente a esta idade e o espectro do objeto já corrigido por avermelhamento, assim como as linhas espectrais e bandas moleculares características do objeto. A faixa de idades de 3 a 4 Gyr também

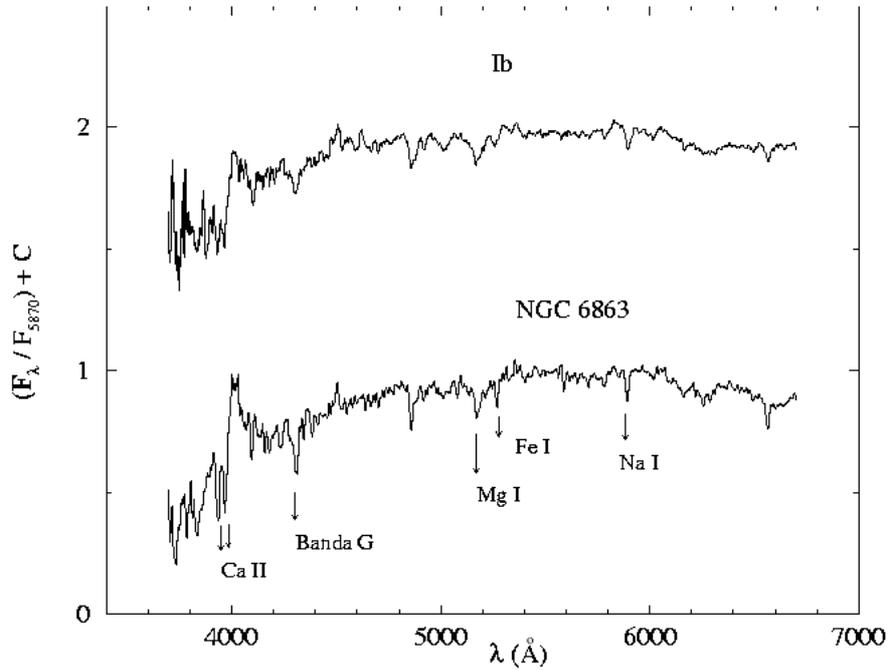


Figura 4.2: Espectro integrado de NGC6863 já corrigido por avermelhamento (tabela 4.4) comparado com o *template* de aglomerado aberto de 3 - 4 Gyr. Estão indicadas as linhas e bandas características de objeto. O espectro está em unidades de  $F_\lambda$  e normalizado em  $\lambda = 5870 \text{ \AA}$ . Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros.

correspondeu ao melhor ajuste para NGC6481. E o *template* Ia (1 Gyr) foi o que melhor ajustou o Objeto 1. Os dois espectros integrados observados são mostrados na figura 4.3.

Lynga 8 apresentou seu espectro observado compatível com a faixa em idades de 3-4 Gyr porém com presença da banda de TiO em  $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ . Esta banda tem pouca contribuição no *template* de Piatti et al. (2002)[69] para a faixa em idades em questão. Entre os espectros que constituem o *template* estão do aglomerado aberto NGC6253, de 4 Gyr. Lynga 8 foi então comparado a este espectro mostrando semelhança. Concluiu-se que uma ou poucas estrelas gigantes frias podem causar esse efeito. A comparação de Lynga 8 com o *template* de 3 a 4 Gyr e com o espectro de NGC6253 sugere a idade de 3 Gyr. Na figura 4.3 são mostrados o espectro de NGC6253, o espectro integrado de Lynga 8 já corrigido por avermelhamento e o espectro observado.

Foram obtidos para Ruprecht 3 espectros individuais das estrelas 1, 2, 3 e 4 (Pavani et al. 2003)[68]. Os espectros individuais são mostrados nas figuras 4.5 e 4.6. Empregaram-se *templates* estelares da biblioteca de Sliva & Cornell (1992)[80] para determinação de tipos espectrais e avermelhamentos (valor médio  $E(B - V) = 0.05 \pm 0.04$ ). A figura 4.6 mostra a comparação do espectro da estrela 1 corrigido por avermelhamento com o *template* G8K0II que proporcionou o melhor ajuste. A resolução espectral alcançada permitiu a determinação de tipos espectrais, mas não é adequada para determinação de classes de luminosidade. Pode-se inferir que os tipos espectrais encontrados são de gigantes na faixa de G2 a K5. Os resultados em detalhe podem ser consultados na Tabela 1 de Pavani et al. (2002) [68].

O espectro integrado de Ruprecht 3 assemelha-se a um dos *templates* de aglomerado globular de Bica

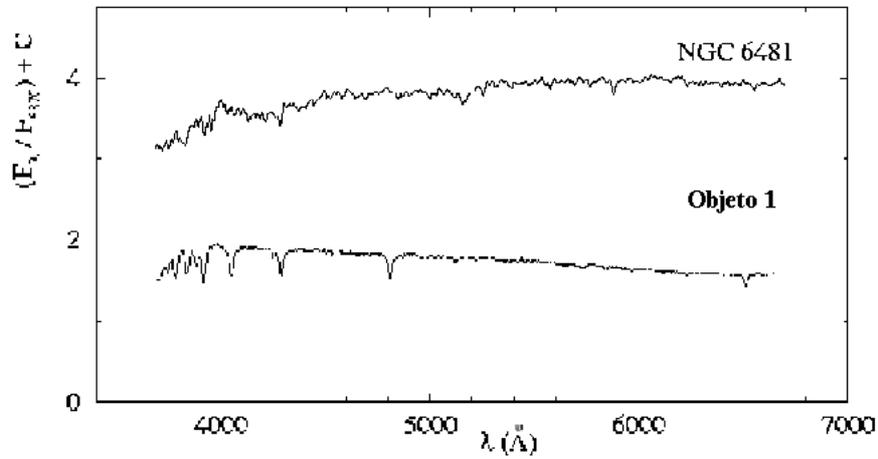


Figura 4.3: Espectros observados, sem correção por avermelhamento e normalizados a  $\lambda = 5870 \text{ \AA}$ . Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.2.

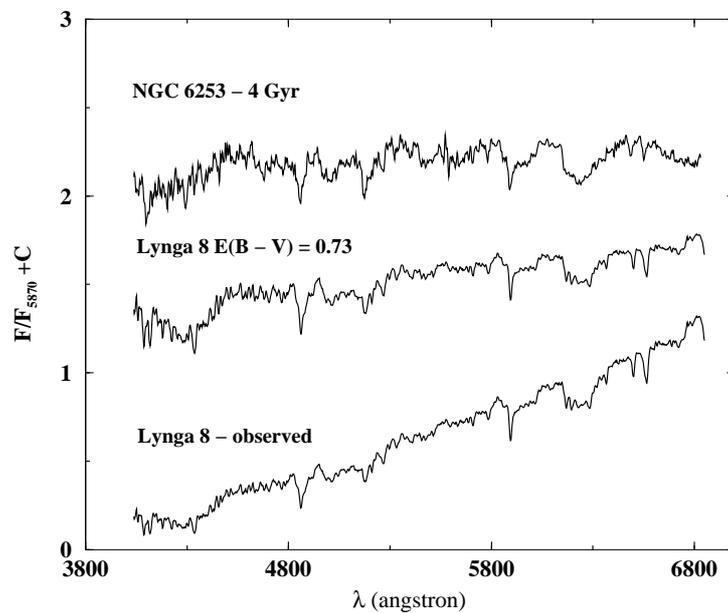


Figura 4.4: Espectro integrado de Lynga 8 comparado com um dos espectros de aglomerado aberto (NGC6253) que compõe o *template* de 3-4 Gyr de Piatti et al. (2002)[69]. Esses espectros caracterizam-se por uma banda TiO  $\lambda 6300 \text{ \AA}$  forte. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.2.

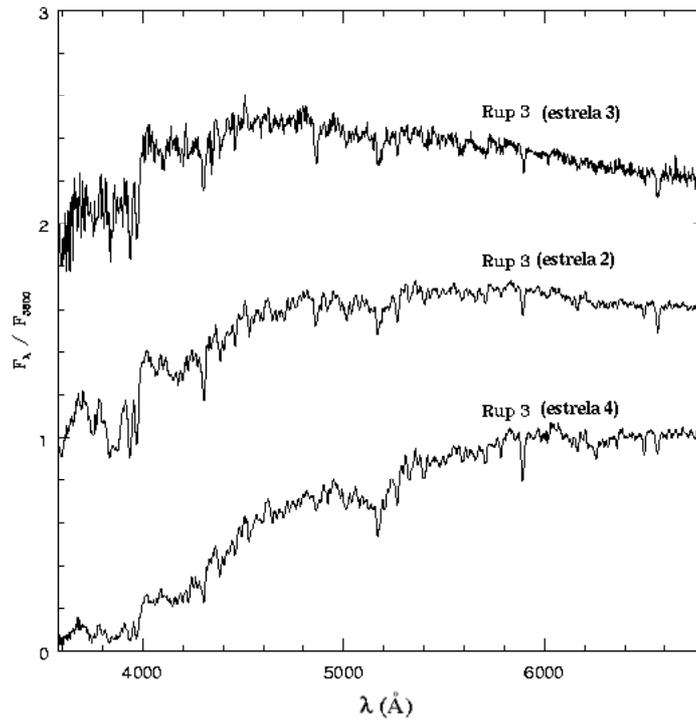


Figura 4.5: Espectros observados das estrelas 2, 3 e 4 de Ruprecht 3. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros. Mesmas unidades que a figura 4.3.

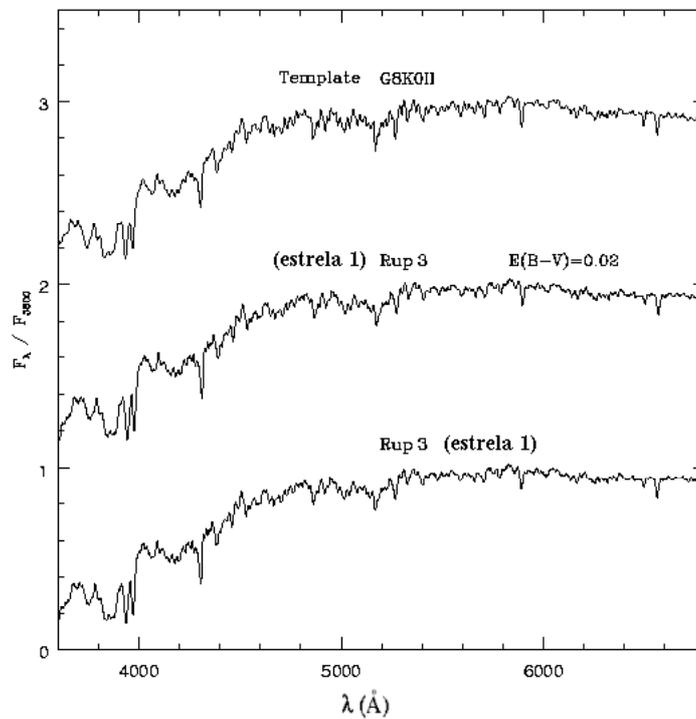


Figura 4.6: Comparação do espectro observado e já corrigido por avermelhamento da estrela 1 de Ruprecht 3 com o *template* de estrela que melhor se ajustou aos mesmos. Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros, exceto para o correspondente a estrela 4. Mesmas unidades que a figura 4.3.

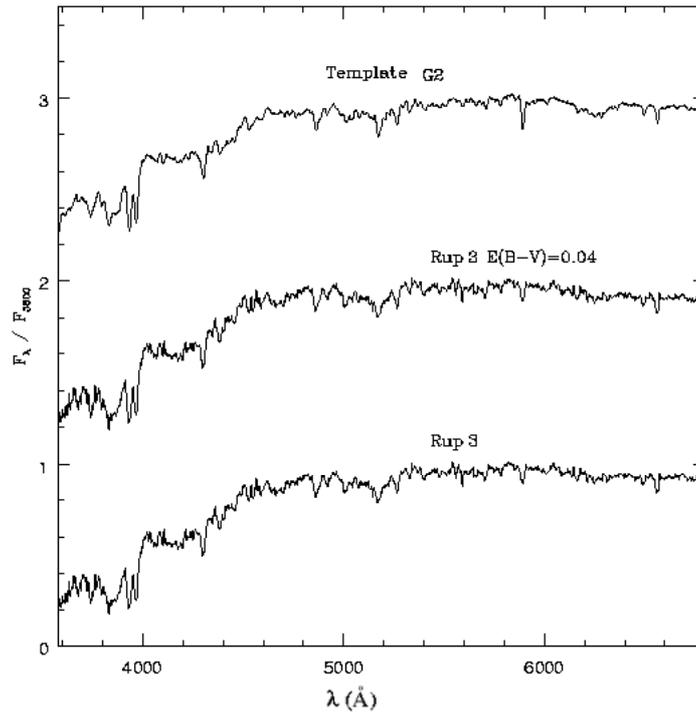


Figura 4.7: Espectro integrado observado e corrigido por avermelhamento de Ruprecht 3 comparado com o *template* de aglomerado Globular ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,5$ ). Foram adicionadas constantes arbitrárias para melhor visualização dos espectros, exceto para o espectro observado de Ruprecht 3. Mesmas unidades que na figura 4.3.

(1986)[11]. Tal *template* corresponde à aglomerados globulares relativamente ricos em metais (G2,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,5$ ). Na figura 4.7 é mostrado o melhor resultado da comparação entre o objeto e o *template* é encontrado ao corrigirmos o espectro observado por  $E(B - V) = 0,04$ . Adotamos este valor de avermelhamento para o objeto, o qual estão em concordância com o obtido das estrelas gigantes individualmente.

Embora não possamos descartar Ruprecht 3 como um aglomerado globular remanescente, a semelhança do espectro integrado com o de um globular provavelmente reflete efeitos estocásticos devido à dominância de algumas estrelas brilhantes na luz integrada.

#### 4.1.2 Larguras equivalentes de espectros estelares

No caso dos objetos dos grupos (2) e (3), para os quais os espectros obtidos estavam dominados por algumas estrelas mais brilhantes, comparamos suas larguras equivalentes com as larguras dos espectros estelares da biblioteca de Silva & Cornell (1992)[80], que são mostradas na figura 4.8. Nosso objetivo é testar se estas estrelas poderiam pertencer ao TO de um remanescente.

A correlação dos tipos espectrais com a idade de aglomerados abertos com mesmo TO foi obtida de Mermilliod (1981)[61], e/ou inferida a partir do TO das isócronas de Padova (Girardi et al. 2002)[42]. As tabelas 4.2 e 4.3 mostram a correspondência entre tipo espectral no TO e idades. Na primeira tabela estão reproduzidos

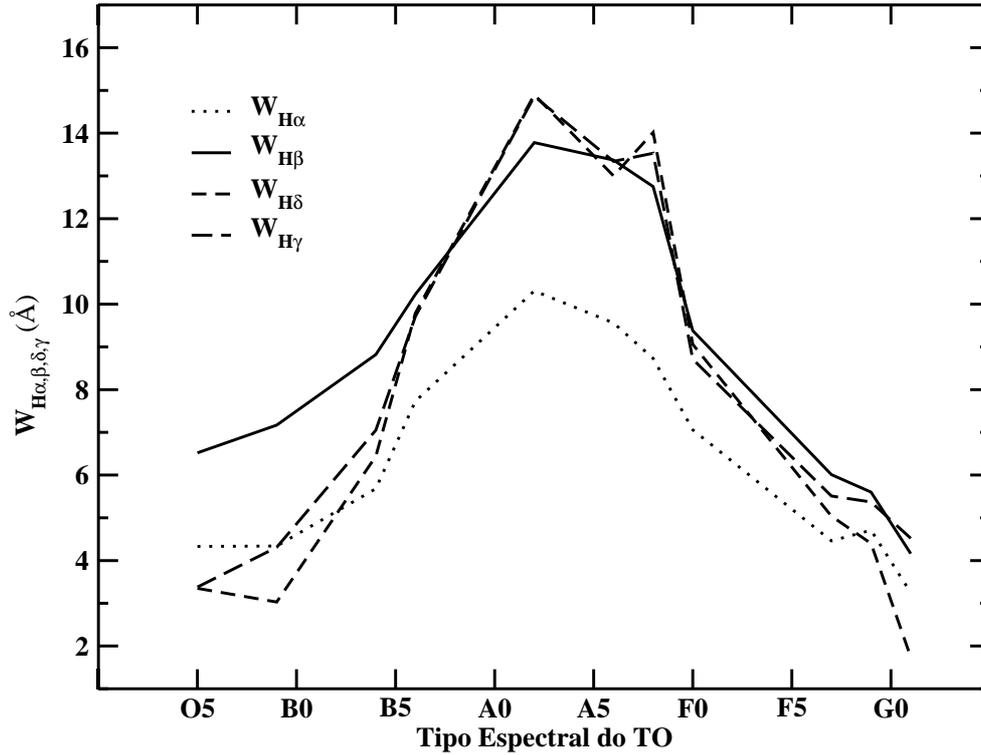


Figura 4.8: Diagrama das larguras equivalentes medidas dos *templates* da biblioteca estelar de Silva & Cornell (1992)[80] em função dos tipos espectrais do *TO*.

dados disponíveis na Tabela 7 de Mermilliod (1981)[61], onde o tipo espectral para o *TO* é baseado na classificação MK. A segunda tabela é um complemento para idades mais velhas, construída usando-se a tabela 3.10 de Binney J. & Merrifield M. (1998) [14] que fornece  $M_V$ ,  $(B - V)$  e tipo espectral da cor do *TO*, para estabelecer a correspondência entre a cor do *TO* das isócronas de Padova de metalicidade solar (Girardi et al. 2002)[42] e o tipo espectral.

Alguns espectros integrados observados são dominados por tão poucas estrelas que comparações com espectros de *templates* de estrelas são mais adequadas do que comparações com *templates* de espectros integrados de aglomerados abertos.

Para ESO132SC14 o melhor ajuste foi obtido com o *template* de tipo espectral estelar A8V da biblioteca

<i>Tipo Espectral</i> <sub>TO</sub>	Idade
MK	Myr
<i>B2</i>	22.24
<i>B3</i>	36.3
<i>B6</i>	77.6
<i>B8.5</i>	107
<i>B8.5 – B9</i>	195
<i>B9</i>	224

Tabela 4.2: Tipo espectral do *turn-off* e as correspondentes idades. As colunas apresentam valores extraídos da Tabela 7 de Mermilliod (1981)[61].

<i>Tipo Espectral</i> <sub>TO</sub>	$(B - V)_{TO(Padova)}$	Isócrona
A0	0,06	500 Manos
A5	0,17	700 Manos
F0	0,28	1 Gyr
F5	0,45	2 Gyr
G0	0,53 - 0,57	3 - 4 Gyr

Tabela 4.3: Idades correspondentes a cada tipo espectral do *TO*. Valores inferidos com base na tabela 3.10 de Binney J. & Merrifield M. (1998) [14] e as isócronas de Padova (Girardi et al. 2002)[42].

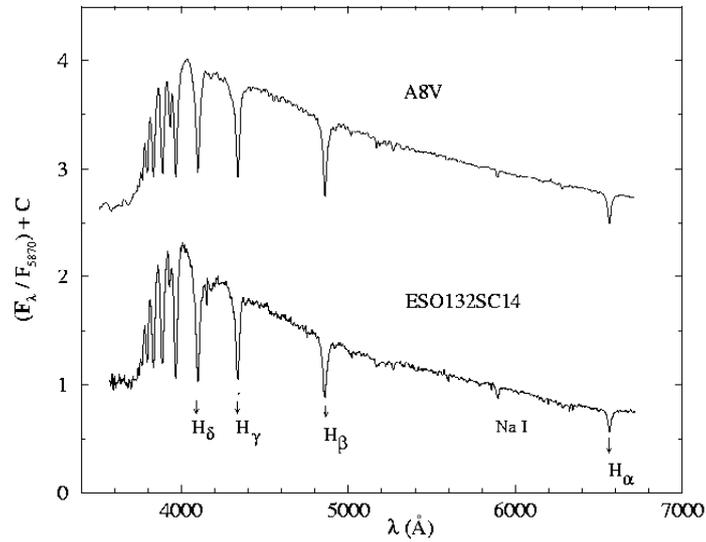


Figura 4.9: Espectro integrado da região central de ESO132 SC14 já corrigido por avermelhamento (tabela 4.4) comparado com o template de estrela. Algumas linhas espectrais estão identificadas. Os espectros estão em unidades de  $F_\lambda$  e normalizados em  $\lambda = 5870 \text{ \AA}$ . Foram adicionadas constantes arbitrárias, sendo que o do objeto tem  $C=0$ .

de Silva & Cornell (1992)[80] sugerindo uma idade de 850 Myr. A figura 4.9 mostra o *template* correspondente a esta idade e o espectro de ESO132SC14 já corrigido por avermelhamento. Vemos a ocorrência de linhas de Balmer proeminentes indicando estrelas *early-type*.

As linhas de Balmer também podem ser vistas nos espectros observados para a região central de Ruprecht 31, como é mostrado no painel superior da figura 4.10. Ainda no mesmo painel temos o espectro de ESO389\*\*5 já mostrando linhas de estrelas mais frias (por exemplo, CaII  $\lambda 3933 \text{ \AA}$ ). O espectro de ESO211SC8 chama a atenção por estar bastante avermelhado (espectro bastante inclinado). As idades e avermelhamentos sugeridos pelos ajustes por *templates* de tipo espectral podem ser consultados na tabela 4.4.

No painel inferior da figura 4.10 são mostrados os espectros integrados observados das estrelas mais brilhantes dos objetos esparsos do grupo (2): ESO429SC2 e ESO383SC10. ESO429SC2 é dominado por estrelas *early-type*. Já ESO383SC10 possui CaII  $\lambda 3933 \text{ \AA}$ , a exemplo do que ocorre no espectro de ESO389\*\*5. Os melhores ajustes para estes objetos foram os tipos espectrais estelares B34V, para o primeiro e F89 para o segundo, sugerindo pelos TO de idades de 40 Myr e 3 - 4 Gyr, respectivamente.

### 4.1.3 Ruprecht 156

A figura 4.11 mostra o espectro integrado observado e linhas características de Ruprecht 156. O objeto possui um diâmetro visual  $< 1'$ , embora o perfil de densidade radial de estrelas tenha resultado em  $r_{lim} = 4 \pm 0.5'$ . A observação englobou essencialmente os prováveis membros do candidato a remanescente. Entretanto as larguras equivalentes medidas não foram ajustadas por nenhum dos *templates* de aglomerados de Piatti et al. (2002)[69]. Foi ajustado pelo *template* de tipo espectral estelar A57V, sugerindo uma idade de 850 Myr.

## 4.2 Resultados finais

Os resultados de avermelhamento e idade são dados na tabela 4.4 para os 12 objetos da amostra. As colunas indicam: (1) nomes dos objetos; (2) avermelhamento na direção da Galáxia via emissão de poeira (Schlegel et al. 1998)[77]; (3) avermelhamento obtido a partir do ajuste de espectros e (4) idades obtidas.

Os avermelhamentos obtidos são sistematicamente menores que os indicados pela emissão de poeira, sugerindo que os objetos possuem importantes colunas de poeira na sua direção, predominantemente atrás. Para quatro objetos o avermelhamento é pequeno, 5 objetos têm  $E(B-V) \approx 0,30$  e, finalmente Lynga 8 e ESO211SC8 são muito avermelhados. Baixos avermelhamentos a baixas latitudes Galácticas sugerem proximidade ao Sol.

Os estudos estatísticos do Capítulo 3 apontam para a possibilidade de que combinações aleatórias de poucas estrelas podem reproduzir espectros integrados de aglomerados abertos. Isto indica que resultados provenientes de espectroscopia de baixa resolução devem ser considerados complementares no estudo de candidatos a aglomerados abertos, não devendo ser utilizados como conclusivos na afirmação dos objetos como sistemas físicos.

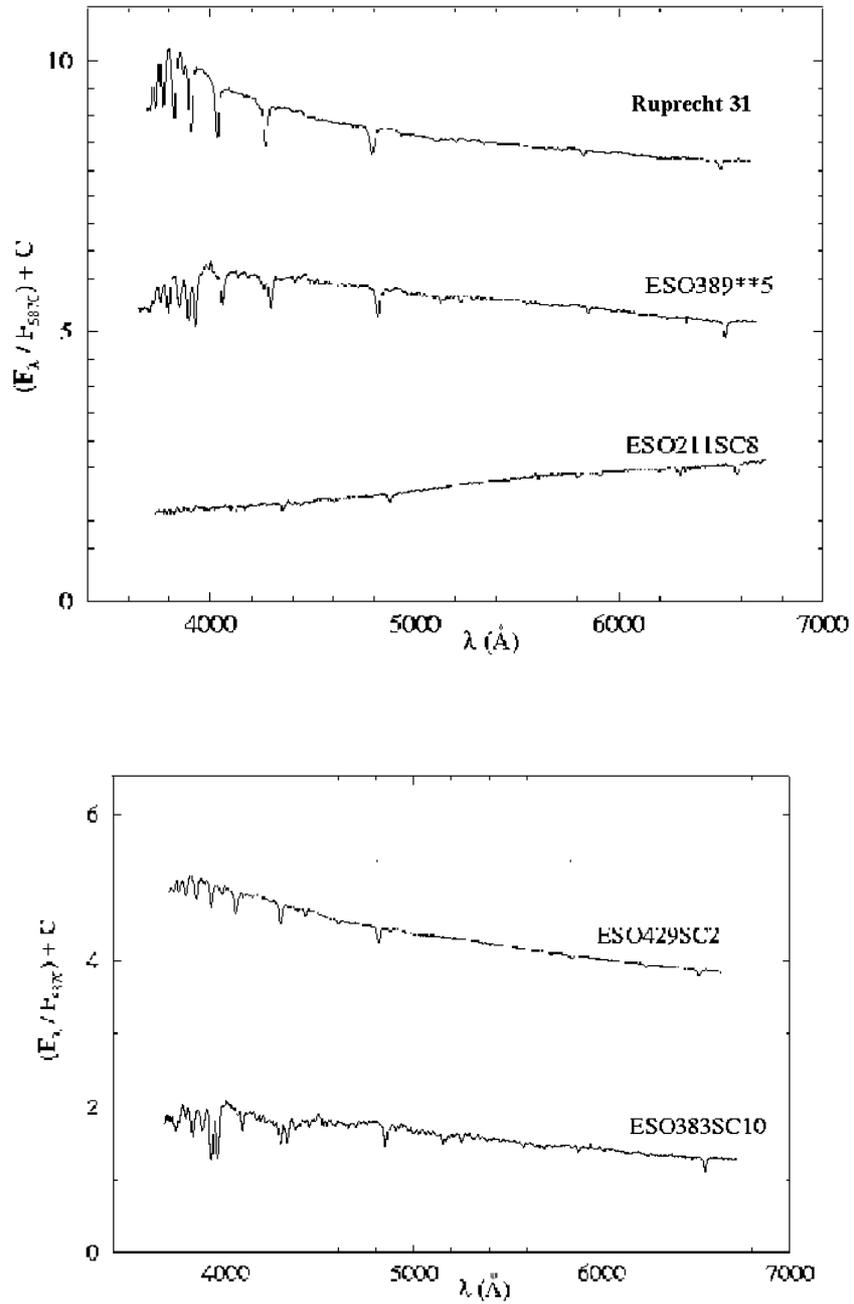


Figura 4.10: Painel Superior: Espectros integrados observados dos objetos compactos do grupo (2). Painel Inferior: Espectros integrados observados das estrelas mais brilhantes dos objetos esparsos do grupo (3). Foram adicionadas constantes arbitrárias. Mesmas unidades que a figura 4.9.

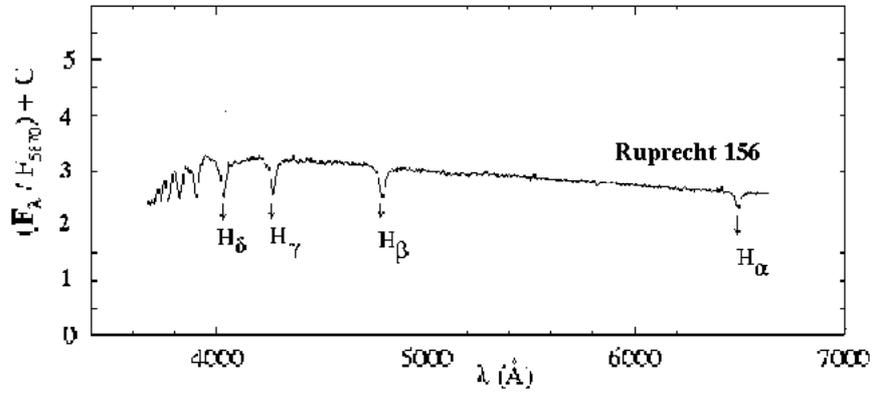


Figura 4.11: Espectro integrado observado de Ruprecht 156. Mesmas unidades que a figura 4.9.

Nome	$E(B - V)_{FIR}$	$E(B - V)$	Idade Gyr
NGC6481	0.22	0.12	3-4
NGC6863	0.30	0.28	3-4
Ruprecht 3	0.097	0.04	-
ESO429SC2	0.62	0.37	0,04
Ruprecht 31	0.76	0.35	0,07
Ruprecht156	0.76	0.30	0,85
ESO211SC8	3.17	1.30	0,02
OBJETO 1	5.35	0.01	1,00
ESO132SC14	5.66	0.35	0, 85
ESO383SC10	0.05	0.00	3-4
ESO389**5	0.35	0.00	3-4
Lynga 8	27.35	0.73	3-4

Tabela 4.4: Idades e avermelhamentos para objetos estudados.

Como no presente estudo estamos utilizando vários métodos complementares, buscando justamente minimizar as incertezas, os resultados espectroscópicos deste capítulo assumem importante papel. Isto porque a análise dos espectros fornece uma medida independente de idades, avermelhamentos que ser comparados com os obtidos da análise do *CMD*.

## Capítulo 5

# Análise de Diagramas Cor-Magnitude

Neste capítulo analisaremos os CMD's construídos para os 23 objetos sob estudo, o aglomerado aberto NGC 3680 e seus respectivos campos de comparação. Veremos que os diagramas se constituíram no principal método de análise dos candidatos a remanescentes, o que possibilitou separar os objetos em grupos distintos. No primeiro grupo, encontram-se aqueles cujas estrelas distribuem-se de acordo com as seqüências evolutivas esperadas em um CMD, permitindo assim o ajuste de curvas de idade e a obtenção de avermelhamentos e distâncias ao Sol. No segundo grupo, estão aqueles cuja isócrona ajustou um número de estrelas considerado, em geral, insuficiente para fornecer parâmetros com razoável confiança. No terceiro grupo, por fim, encontram-se os objetos que não permitiram o ajuste por isócronas.

Passemos, pois, a explicitação de como foram traçados os CMD's e obtidos os parâmetros de interesse para a análise da amostra.

### 5.1 Obtenção de parâmetros via CMD's

Foram construímos CMD's  $J \times (J - H)$  sendo empregadas isócronas de Padova (Girardi et al. 2002)[42] de metalicidade solar ( $z = 0.019$ ). Foram testadas metalicidades supersolar ( $z = 0.03$ ) e subsolar ( $z = 0.008$ ) porém, os melhores ajustes foram para metalicidade solar. Por meio das isócronas, foi possível inferir valores para o módulo de distância aparente e para o avermelhamento. Para a obtenção do módulo, buscou-se um ajuste das isócronas ao TO do objeto por meio de deslocamentos em magnitude. Após determinada a curva de idade que melhor se ajustava ao CMD, determinou-se o avermelhamento. Este último foi obtido a partir de deslocamentos em cor, fazendo coincidir o TO e a região da MS da isócrona às medidas das estrelas no CMD. Nos diagramas traçados, disponíveis na Seção 5.2, estão visíveis as isócronas do melhor ajuste e as mesmas deslocadas de 0.75 mag. Esse deslocamento pretende mostrar a região esperada para estrelas binárias não resolvidas (Santiago et al. 1996, Elson et al. 1998)[75, 36]. Vale lembrar aqui que se considera um sistema binário com tal efeito aquele em que ambos componentes têm mesma magnitude  $m$  e o mesmo índice de cor.

Se o sistema é não-resolvido, o índice de cor será o mesmo, mas a magnitude observada será acrescida de  $\Delta m = -0.75$ , isto é, quase uma magnitude mais brilhante.

Como vínculos para a obtenção de idades e avermelhamentos, foram levados em conta os resultados espectroscópicos (Seção 4). No caso dos objetos com tais resultados disponíveis, foram consideradas igualmente as informações obtidas em Schlegel et al. (1998)[77] para avermelhamento na direção dos objetos via emissão de poeira. Estas últimas serviram de vínculo para os objetos que não tiveram espectros obtidos.

Como os CMD's foram traçados no infravermelho e os vínculos de avermelhamento estão disponíveis em  $E(B - V)$ , foi necessário obter uma relação entre o avermelhamento ótico (B,V) e o infravermelho (J, H)

$$\frac{E(J - H)}{E(B - V)} \quad (5.1)$$

Para o ótico, considerando-se as bandas B e V, através da razão de extinção total-seletiva  $R_V$ , podemos obter a correção por absorção interestelar  $A_V$ .

$$R_V = \frac{A_V}{E(B - V)} \quad (5.2)$$

ao adotarmos  $R_V = 3.1$  (Cardelli et al. 1989)[18], tendo então  $A_V = 3.1 \times E(B - V)$ .

Da mesma forma, a correção por absorção interestelar na banda J é dada por

$$A_J = R_J \times E(J - H) \quad (5.3)$$

Como não dispomos do valor de  $R_J$ , sua obtenção se dá a partir da relação fornecida por Mathis (1990)[60]

$$\frac{A_H}{A_J} = 0.624 \quad (5.4)$$

Trabalhando a equação 5.3

$$A_J = R_J \times (A_J - A_H) \quad (5.5)$$

$$1 = R_J \times \left(1 - \frac{A_H}{A_J}\right)$$

$$R_J = 2.55 \quad (5.6)$$

De Schlegel et al. (1998)[77], vem a relação

$$\frac{A_J}{A_V} = 0.276 \quad (5.7)$$

que pode ser escrita da seguinte forma

$$\frac{R_J \times E(J - H)}{R_V \times E(B - V)} = 0.276$$

, resultando na relação desejada, qual seja,

$$E(J - H) = E(B - V) \times 0.33 \quad (5.8)$$

De posse da relação acima descrita, pode-se então converter os valores de avermelhamento ótico para o infravermelho.

A equação é necessária para a obtenção do módulo de relação absoluto. Para tanto, subtraímos do módulo de distância aparente ( $m - M$ ), obtido do deslocamento em magnitude da isócrona no CMD, a correção por absorção interestelar

$$(m - M)_o = (m - M)_J - A_J \quad (5.9)$$

,

e a partir do módulo de relação absoluto obtemos a relação do objeto ao Sol

$$d_{\odot} = 10^{\frac{[(m - M)_o + 5]}{5}} \quad (5.10)$$

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos CMD's para os objetos da amostra.

## 5.2 Resultados

Assim como nos capítulos anteriores, também aqui será utilizado como objeto de comparação o aglomerado aberto de idade intermediária NGC3680. Alguns dos objetos estudados constam no *New Catalog of Optically Visible Open Clusters and Candidates* (Dias et al. 2002)[30], que reúne dados cinemáticos e parâmetros para os objetos. Parte desses parâmetros é obtido do WEBDA<sup>1</sup>. Como a maioria dos objetos da amostra não foi estudado em detalhe, em geral, não estão disponibilizados dados completos para os mesmos nesse catálogo.

A figura 5.1 apresenta para NGC3680 dois painéis com distintos raios de extração: raio de núcleo,  $r_n = 2.3' \pm 0.4'$ , e raio envolvendo a região central,  $r = 7.5'$ . Em adição, são mostradas as barras de incerteza fotométrica e os ajustes de isócronas. Em ambos CMD's, vemos a MS do aglomerado bem definida, assim como a região do TO e a presença de gigantes. Para  $r = 7.5'$ , ocorre um maior número de estrelas em cada uma dessas regiões, porém percebemos a maior contaminação por estrelas de campo.

Na Seção 2.3, foi mostrado que NGC3680 apresenta uma distribuição radial de estrelas uniforme com um núcleo e um halo bem definido. O CMD do painel esquerdo (figura 5.1) mostra que, para o raio de núcleo,

<sup>1</sup>Banco de dados da internet que reúne informações sobre os aglomerados abertos da Galáxia e das Nuvens de Magalhães, desenvolvido por Jean-Claude Mermilliod e mantido por Ernst Paunzen - <http://www.univie.ac.at/webda/>.

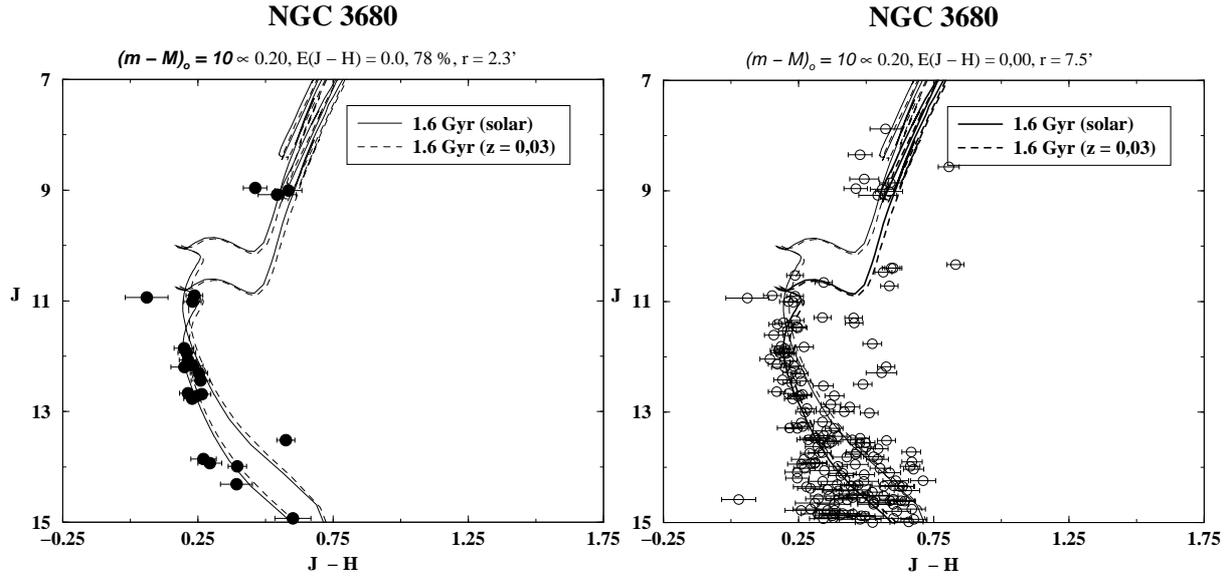


Figura 5.1: Diagramas cor-magnitude para NGC3680. Painel Esquerdo: extração de fotometria 2MASS correspondendo ao raio de núcleo ( $r_n = 2.3' \pm 0.4'$ ). Painel Direito: extração correspondente à região central ( $r = 7.5'$ ). São mostrados, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas.

a MS do aglomerado não está totalmente preenchida, ocorrendo inclusive uma lacuna de  $\sim 1$  mag; porém ela apresenta estrelas na região do TO e também logo abaixo, além de gigantes. Já para o raio que engloba o núcleo e a região central, a MS apresenta-se bem preenchida, mesmo sendo visível a contaminação por estrelas de campo. Funções de luminosidade para diferentes raios, disponíveis em Bonatto et al. (2004)[16], confirmam a ocorrência de depleção de estrelas da baixa MS para a região central. Além disto, apontam para a ocorrência de segregação de massa no aglomerado, indicando que este se encontra em um estágio dinamicamente evoluído.

Como vínculo, para determinarmos se havia um bom ajuste da isócrona, foi computado o número de estrelas que a tocam, considerando as barras de incertezas em cor. Dividindo o número de estrelas ajustadas pelo número total de estrelas no CMD, obtêm-se o índice de ajuste  $I_a$ . O objeto que obteve  $I_a$  igual ou superior a 60% foi considerado um bom candidato a remanescente. No painel esquerdo da figura 5.1, podemos ver que o índice de NGC3680 para seu raio de núcleo é 78 %.

Para os 23 objetos da amostra, além dos vínculos para ajuste de isócronas já descritos, foram identificadas nos mapas XDSS as estrelas mais brilhantes e localizadas no CMD. Tais estrelas guiaram, então, o ajuste das isócronas, partindo-se da hipótese dessas representarem estrelas do TO ou gigantes. Conforme o  $I_a$  os objetos foram divididos em três grupos:  $I_a \geq 60\%$ ,  $I_a < 60\%$  e os objetos em que não foi possível o ajuste de uma isócrona.

A seguir serão apresentados os objetos de acordo com essa classificação. Cada objeto foi comparado com dois campos próximos (ao sul e ao norte), estando estes a uma relação de  $2r_{lim}$  das coordenadas centrais do objeto. Não foi aplicado nenhum tratamento nos diagramas dos objetos e campos, exceto para NGC1901, como será descrito adiante.

### 5.2.1 Candidatos a Remanescentes com $I_a \geq 60\%$

#### ***NGC6481***

A figura 5.2 apresenta o objeto e dois campos próximos. NGC6481 é compacto e seu  $r_{lim}$  envolve poucas estrelas. Os resultados espectroscópicos indicaram uma faixa em idade que se mostrou adequada para o CMD traçado. O avermelhamento espectroscópico serviu como limite inferior e o fornecido por Schlegel et al. (1998)[77], como superior. O diagrama para o objeto apresenta um excelente ajuste de isócrona ( $I_a = 83\%$ ) onde podemos destacar a semelhança com o CMD para o núcleo de NGC3680 (figura 5.1): a baixa MS erodida e a presença de estrelas na região do TO e gigantes. O objeto é caracterizado no mapa DSS pela presença de 5 estrelas agrupadas ao centro, essas encontram-se na região delimitada pelas isócronas. O módulo de distância absoluto fornece  $d_{\odot} = 1312 \pm 65 pc$ , onde a incerteza é a do ajuste

A extração para os campos apresenta poucas estrelas. O campo ao norte tem  $I_a = 100\%$ , porém as 4 estrelas distribuem-se esparsamente no CMD, com lacunas de 1 a 4 mag. entre si. Já no campo ao sul, o ajuste de isócronas para o objeto não coincide com a distribuição das estrelas.

#### ***NGC6994***

O objeto foi classificado como compacto. O perfil radial apontou a existência de um provável halo, porém o CMD para NGC6994, na figura 5.3, não inclui essa região. Apesar de apresentar um alto índice ( $I_a = 80\%$ ), o objeto falha nos demais itens analisados, quais sejam: a alta MS está quase totalmente desabitada e as estrelas que caracterizam o objeto no mapa DSS distribuem-se em lacunas de 1 a 3 mag. Do ajuste de isócronas mostrado na figura resultou um módulo de distância absoluto que fornece  $d_{\odot} = 1202 \pm 108 pc$ . No que diz respeito aos campos, as estrelas não são ajustadas pela isócrona definida para o objeto.

NGC6994 já foi estudado anteriormente sendo apontado como um remanescente, por Bassino et al (2000)[7, 6], no entanto, segundo Carraro (2000)[19] e Ordenkirchen & Soubiran (2002)[65] trata-se de uma flutuação de estrelas de campo.

#### ***NGC6863***

O objeto é delimitado por um  $r_{lim}$  contendo poucas estrelas, porém apresenta  $I_a$  alto (77%). Os resultados espectroscópicos indicaram a faixa de idades que se mostrou adequada ao CMD (figura 5.4). As estrelas que caracterizam NGC6863 no mapa DSS encontram-se na região delimitada pelas isócronas, a exceção de uma. O módulo de relação absoluto forneceu  $d_{\odot} = 1393 \pm 63 pc$ . Os CMD's para os campos contam com um número menor de estrelas que o objeto, e apesar de seus  $I_a$  estarem dentro de 60%, as estrelas não se distribuem homogeneamente ao longo das isócronas que definem os parâmetros do objeto.

#### ***NGC1663***

Objeto classificado como esparso cujo raio de extração inclui os três primeiros anéis do perfil radial de estrelas (Seção 2.3), contando com um  $I_a$  alto (80%). O CMD de NGC1663 (figura 5.5) está povoado em todas as regiões representadas pela isócrona (MS, TO, gigantes). As estrelas que o caracterizam no mapa DSS estão,

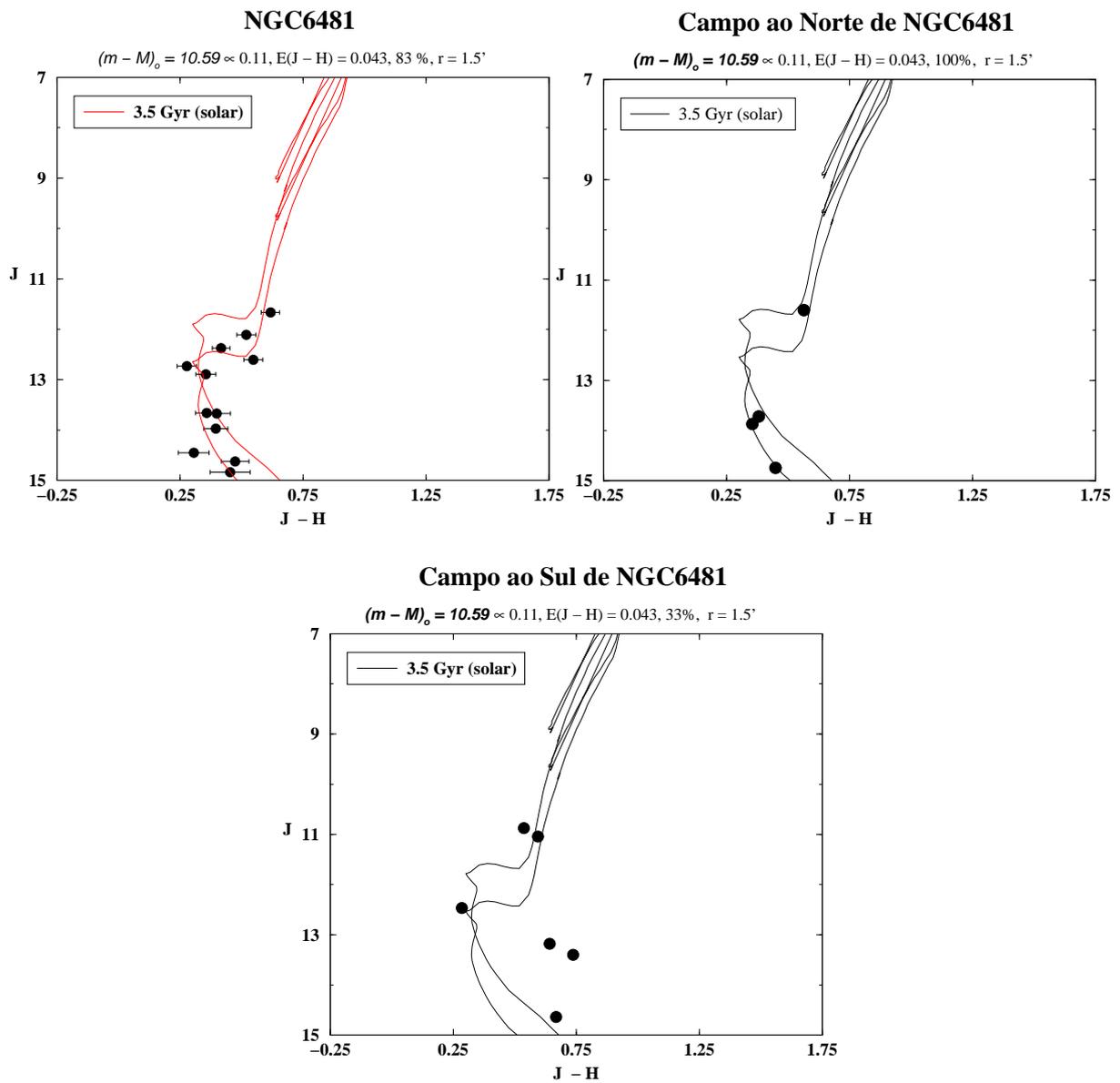


Figura 5.2: Diagrama cor-magnitude para NGC6481 e dois campos próximos, conforme legendas nos painéis. São mostradas os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campo de comparação está sobreposto o ajuste obtido para o objeto.

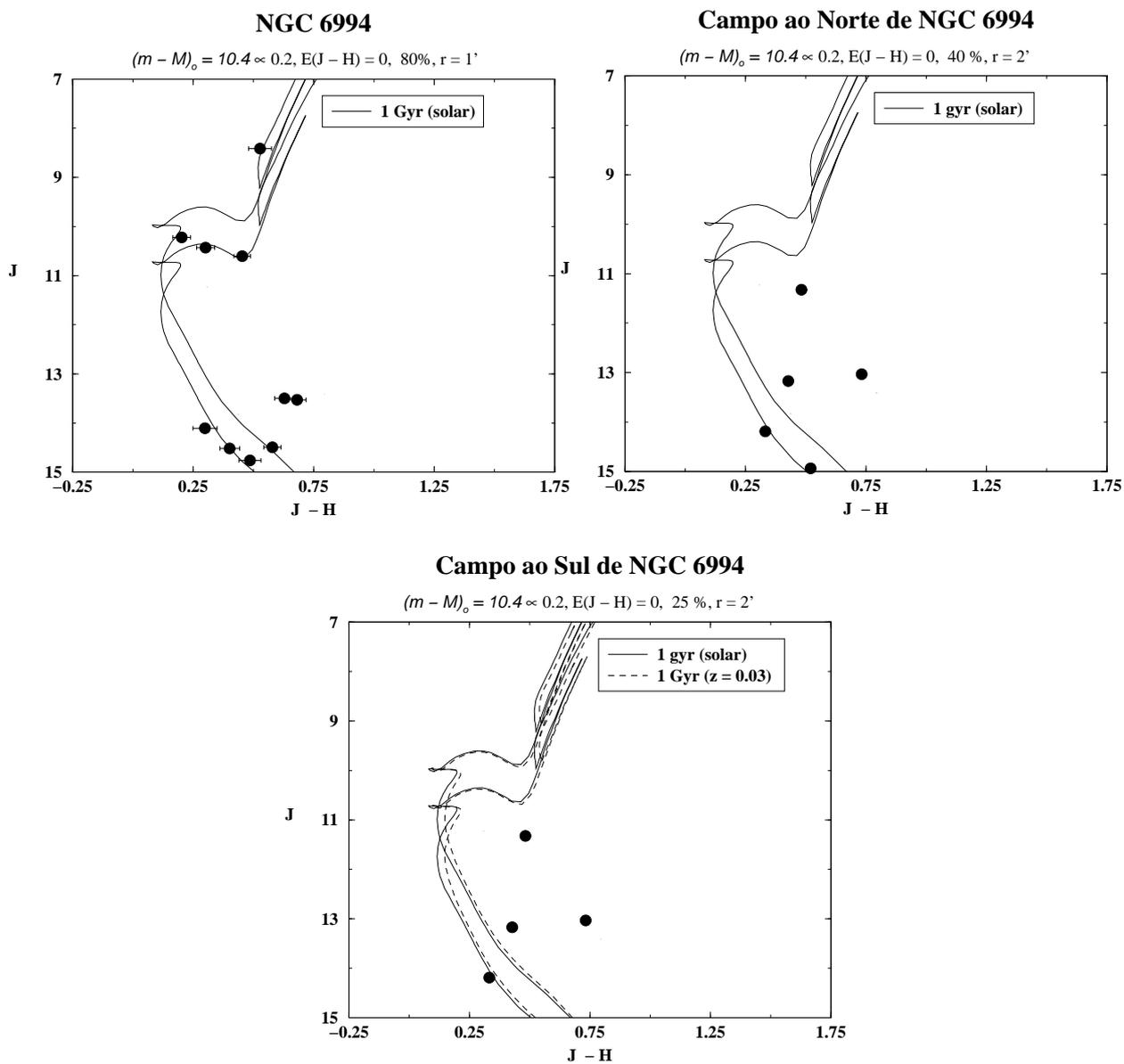


Figura 5.3: Diagrama cor-magnitude para NGC6994 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

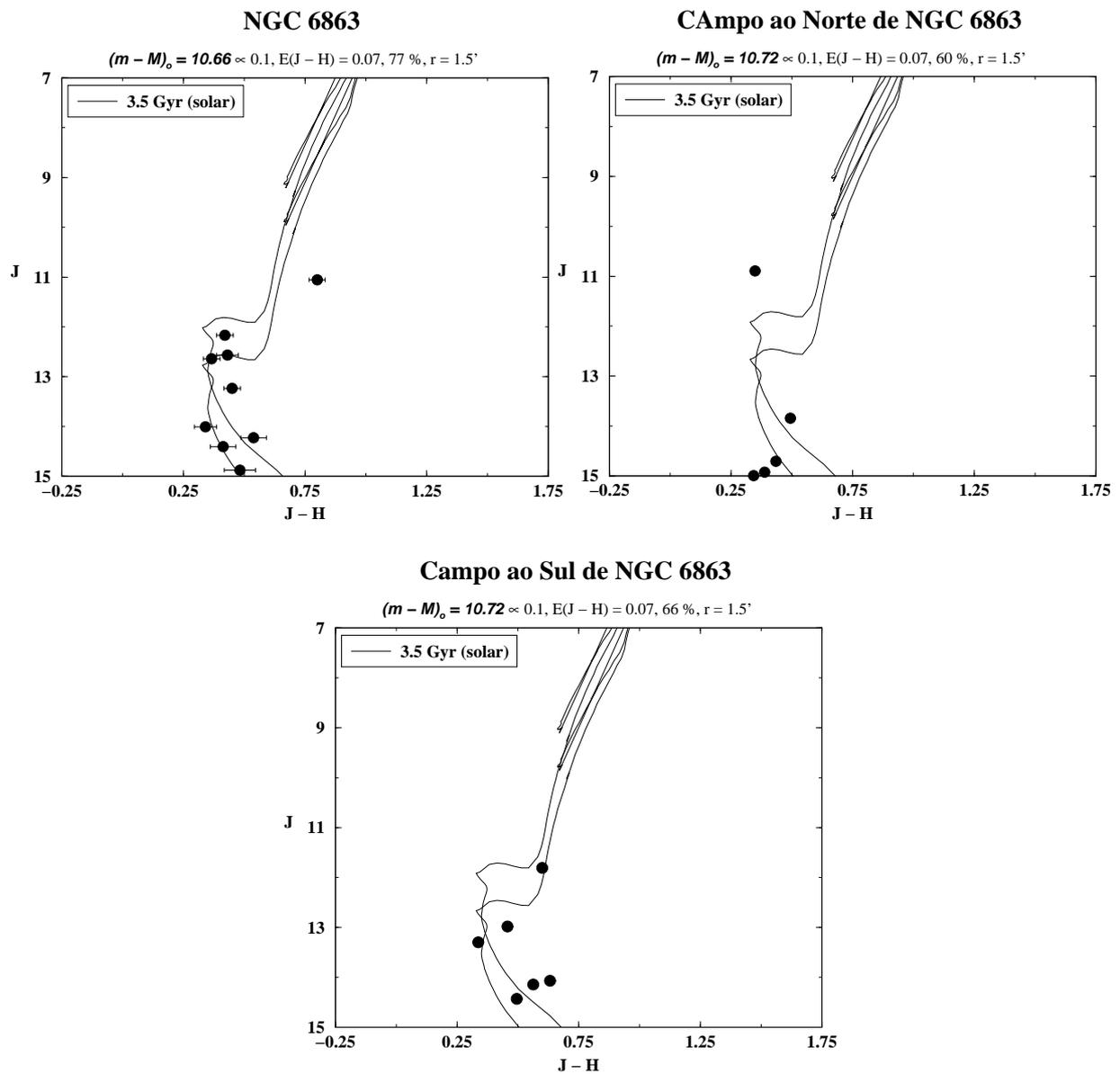


Figura 5.4: Diagramas cor-magnitude: NGC6863 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

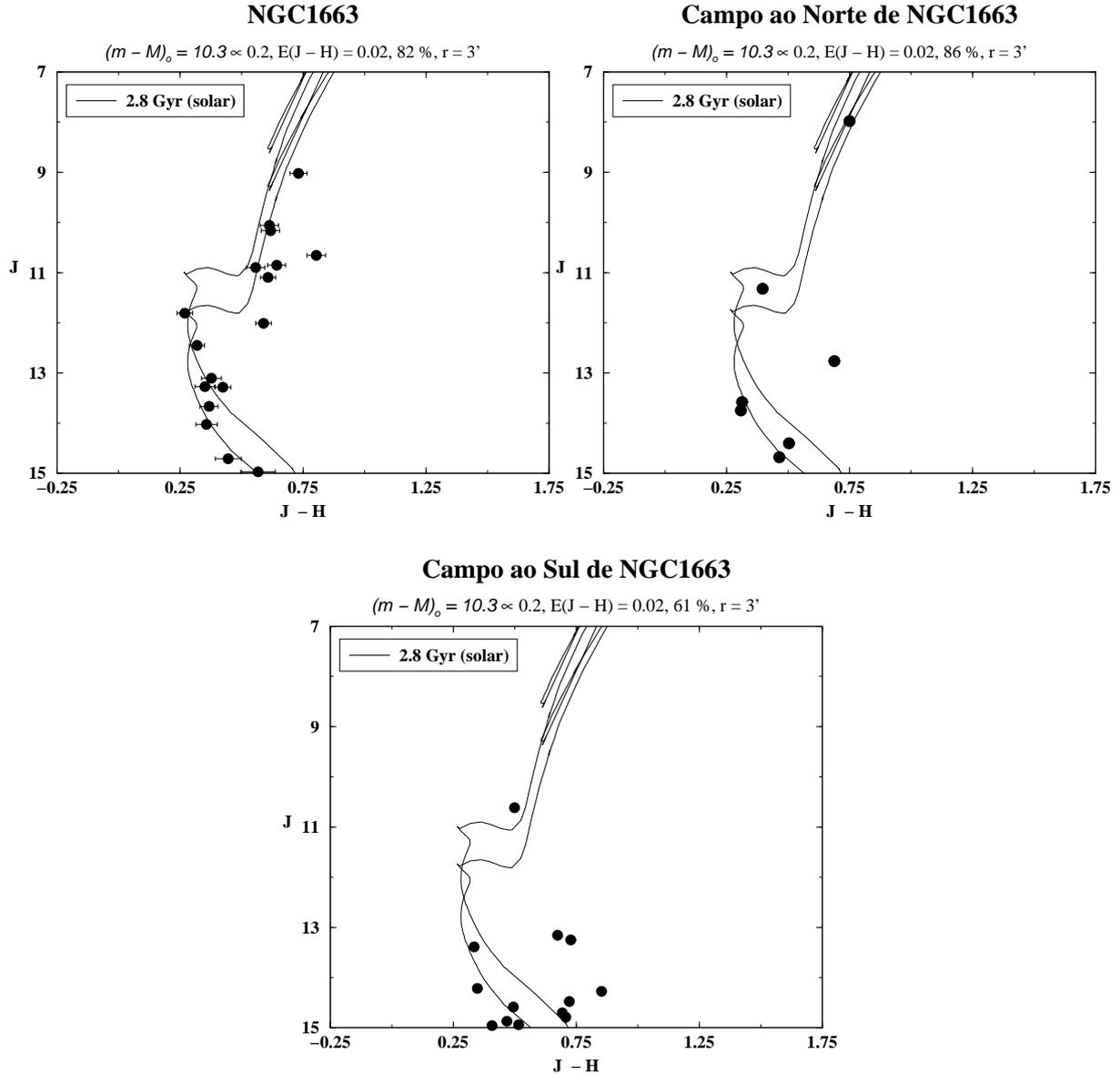


Figura 5.5: Diagramas cor-magnitude para NGC1663 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

em sua maioria, dentro da região delimitada pelas isócronas. O objeto foi previamente estudado por Baume et al. (2003)[7], que concluiu tratar-se de um remanescente. Para o módulo de distância absoluto obtido no presente estudo, temos  $d_{\odot} = 1148 \pm 107$  pc. Os campos apresentam um número menor de estrelas que não são ajustadas pelas isócronas que, por sua vez, definem os parâmetros do objeto.

### ***ESO425SC6***

A figura 5.7 apresenta o esparso ESO425SC6 e seus campos. Com um  $I_a = 66\%$ , mostra um bom ajuste com grande presença de prováveis binárias. O raio de extração corresponde à região acima da contribuição de campo no perfil radial (Seção 2.3). As estrelas que o caracterizam no mapa DSS encontram-se, em sua maioria, dentro da região delimitada pelas isócronas. O módulo de distância absoluto obtido forneceu  $d_{\odot} = 1148 \pm 50$  pc. Não se dispõe de espectro para o objeto. Os campos apresentam-se pouco povoados, e as estrelas não

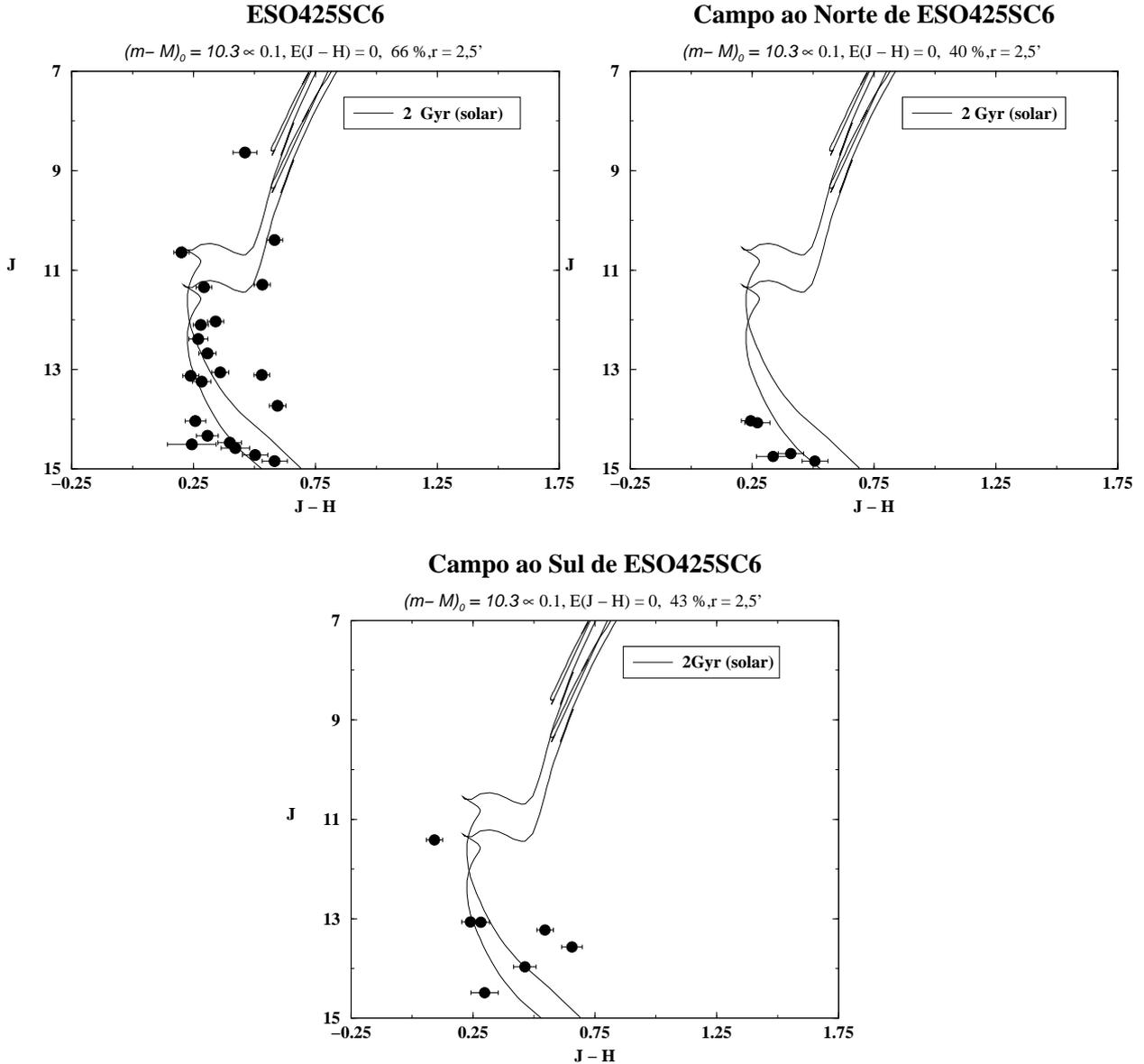


Figura 5.6: Diagramas cor-magnitude para ESO425SC6 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

acompanham as isócronas do objeto. Mantém a mesma característica dos anterior: baixa MS erodida.

### *ESO425SC15*

Classificado como esparsos é caracterizado no mapa DSS por 4 estrelas brilhantes que se destacam das demais. Destas, 3 estão na região definida pelas isócronas ou muito próximas (figura 5.7). O CMD do objeto mostra uma lacuna de 1 mag entre as estrelas próximas ao TO e a média MS mostra semelhança com o diagrama para o núcleo de NGC3680. Seu índice alcança  $I_a = 61\%$  para um raio de extração próximo ao  $r_{lim} = 3.5 \pm 0.5'$ , o diagrama fornece  $d_{\odot} = 1042 \pm 47$  pc. Os campos são menos povoados e não apresentam estrelas no TO ou acima. Não se dispõe de espectro para o objeto.

### *Ruprecht 3*

Classificado como compacto, Ruprecht 3 teve seus primeiros resultados publicados em Pavani et al. (2003)[68]

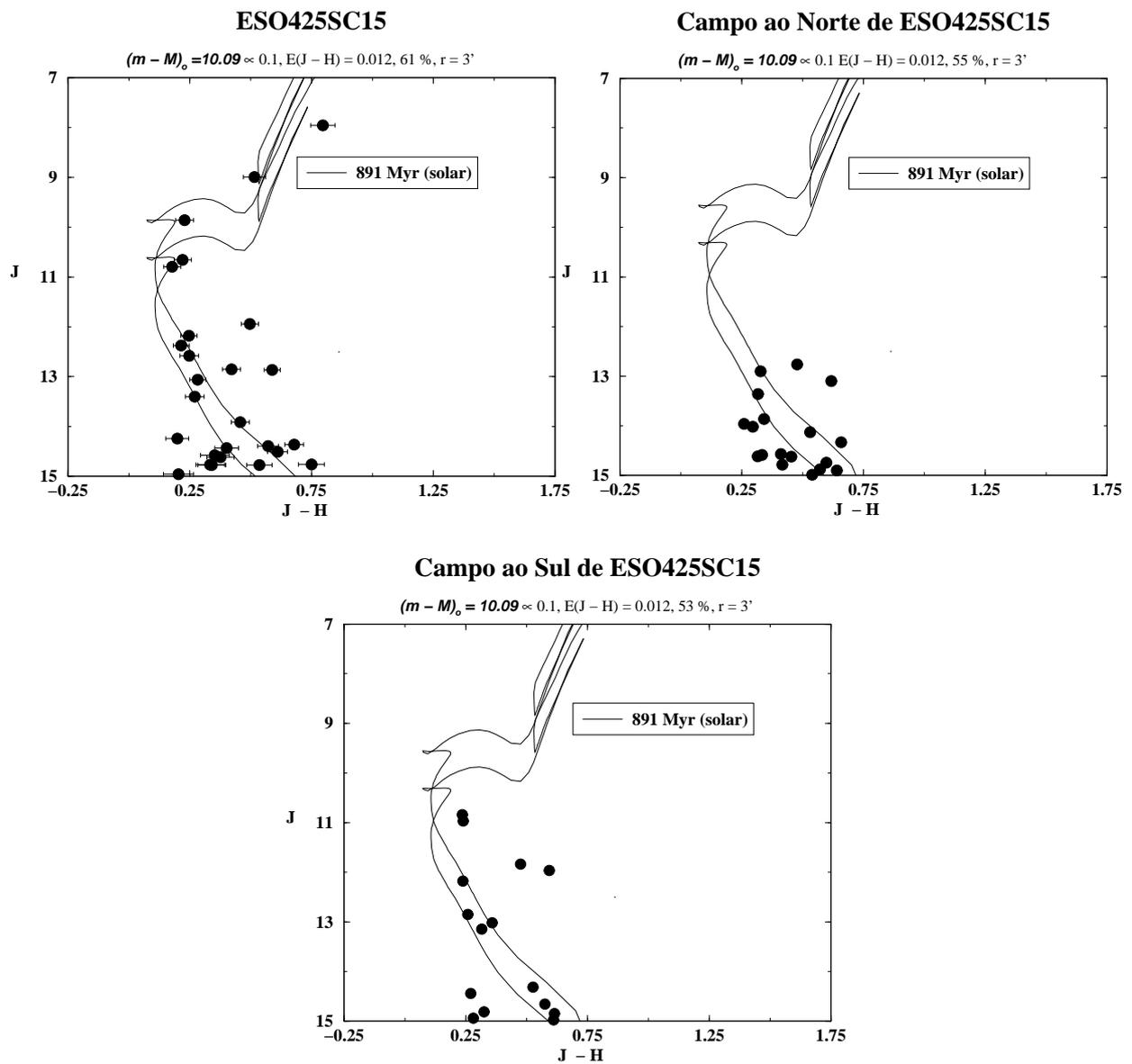


Figura 5.7: Diagramas cor-magnitude para ESO425SC15 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

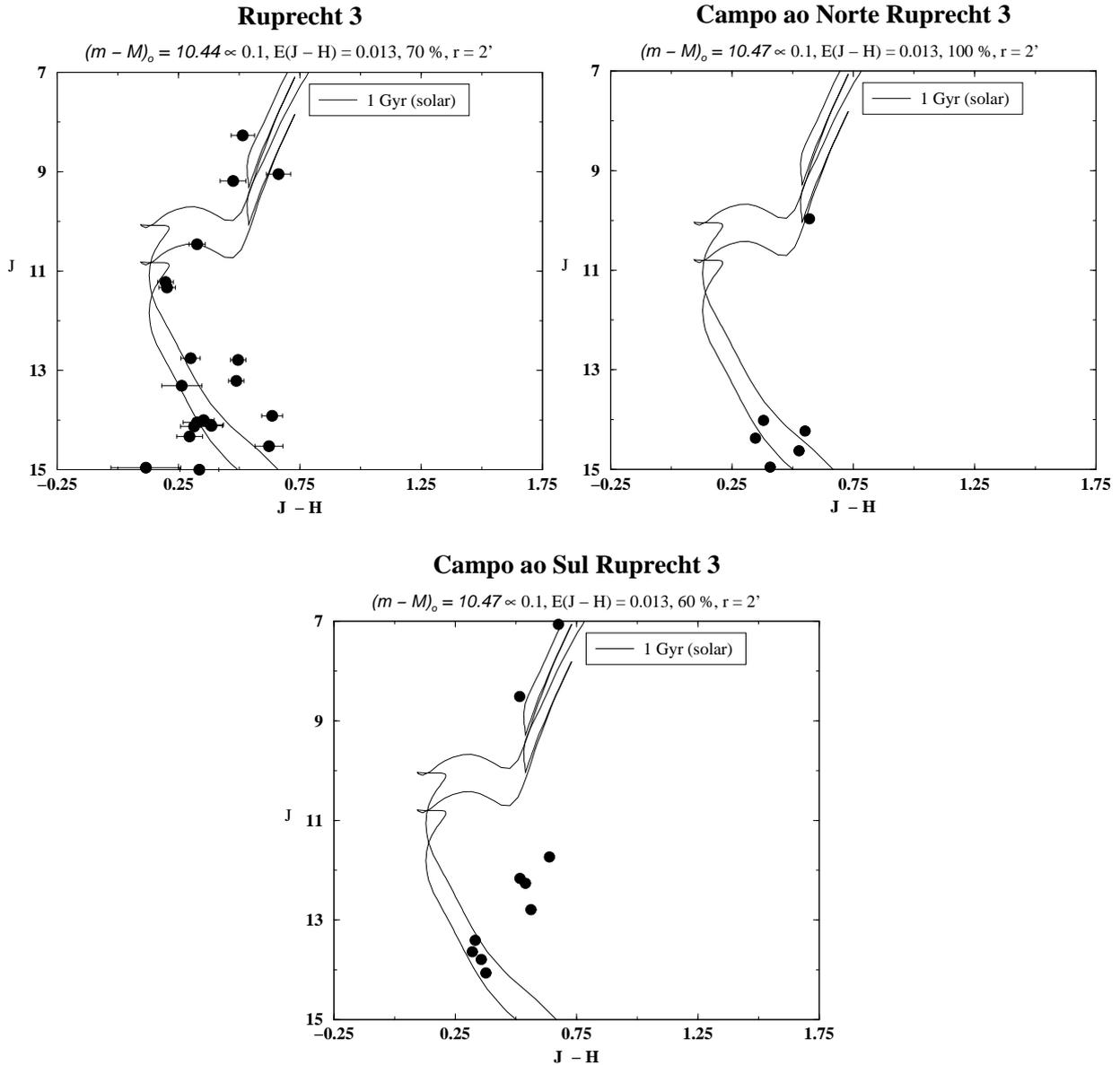


Figura 5.8: Diagramas cor-magnitude para Ruprecht 3 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

, tendo aqui seus parâmetros levemente alterados, resultando em  $d_{\odot} = 1241 \pm 57$  pc. O diagrama para o objeto, figura 5.8, apresenta o dobro de estrelas com fotometria disponível para a mesma faixa de magnitudes e raio de extração utilizados no artigo. O objeto apresenta  $I_a = 70\%$ , onde as estrelas brilhantes que o caracterizam no mapa DSS serviram de vínculo para o ajuste das isócronas. Dispõe-se de espectro integrado e de 4 estrelas do objeto. O espectro de Ruprecht 3 mostrou-se semelhante ao de aglomerado globular, porém provavelmente reflete efeitos estocásticos devido à algumas estrelas brilhantes dominantes. O objeto apresenta ainda uma distribuição de estrelas semelhante à de NGC3680 (figura 5.1). Os campos têm reduzido número de estrelas e uma distribuição totalmente diferente daquela do objeto.

### ***ESO426SC26***

Objeto classificado como esparsa tendo um índice  $I_a = 68\%$ . É bem povoado e conta com uma distribuição

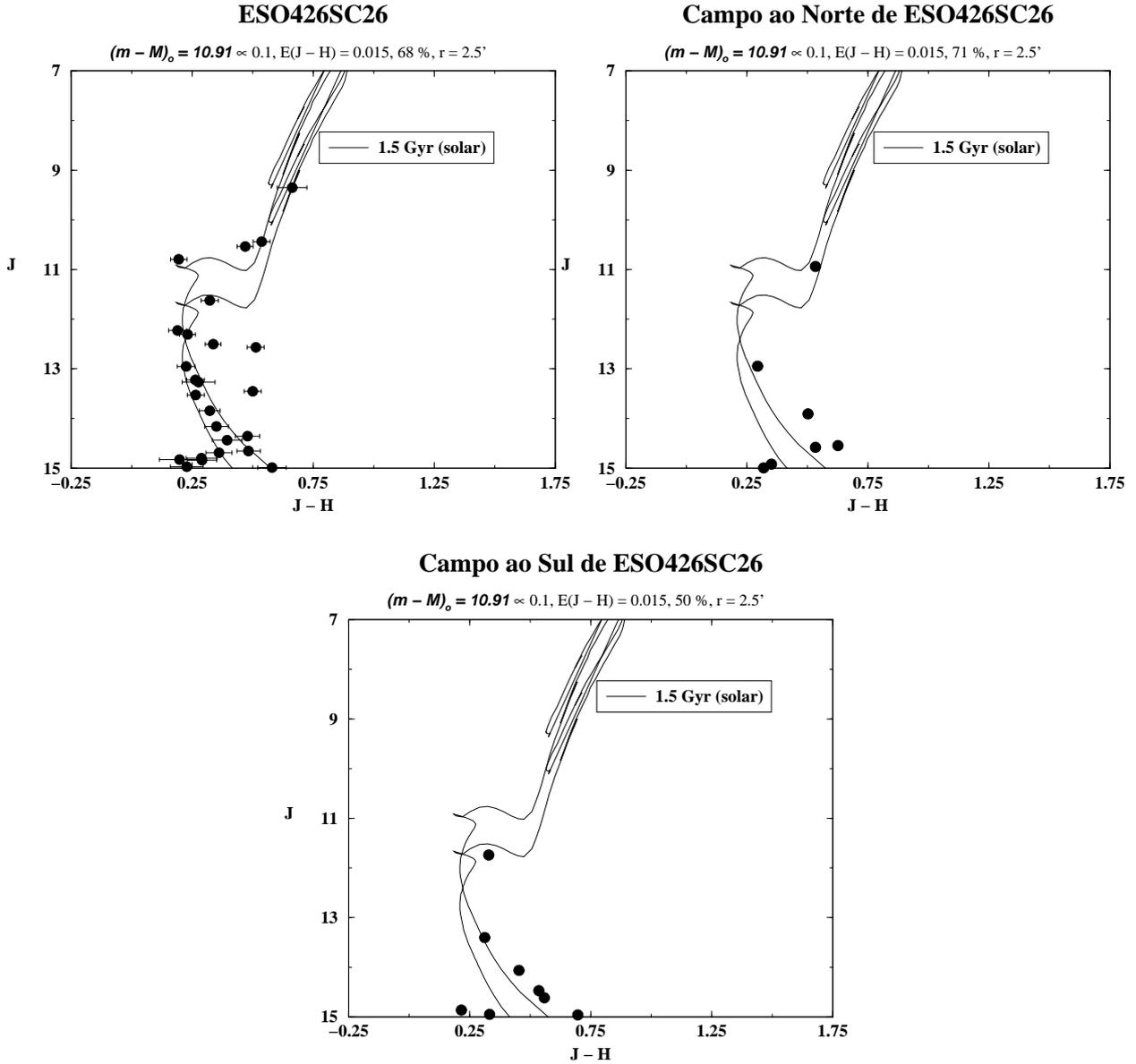


Figura 5.9: Diagramas cor-magnitude para ESO426SC26 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

homogênea de estrelas no CMD (figura 5.9, painel à esquerda), fornecendo  $d_{\odot} = 1529 \pm 70$  pc. A MS está bem preenchida, e mostra a presença de gigantes, diferenciando-se dos campos próximos que apresentam um reduzido número de estrelas. As estrelas que o caracterizam no mapa XDSS encontram-se em sua maioria na região definida pelas isócronas.

### ***ESO429SC2***

Objeto esparsa para o qual os resultados espectroscópicos são consistentes com o CMD (figura 5.10, painel à esquerda). As estrelas delineiam bem a alta MS, apesar de três estrelas brilhantes localizarem-se fora da região delimitada pelas isócronas. As estrelas que caracterizam o centro de ESO429SC2, no mapa XDSS, distribuem-se ao longo das isócronas. O objeto tem o índice  $I_{\alpha} = 60\%$ , e  $d_{\odot} = 1905 \pm 175$  pc. Os campos não possuem estrelas brilhantes na alta MS.

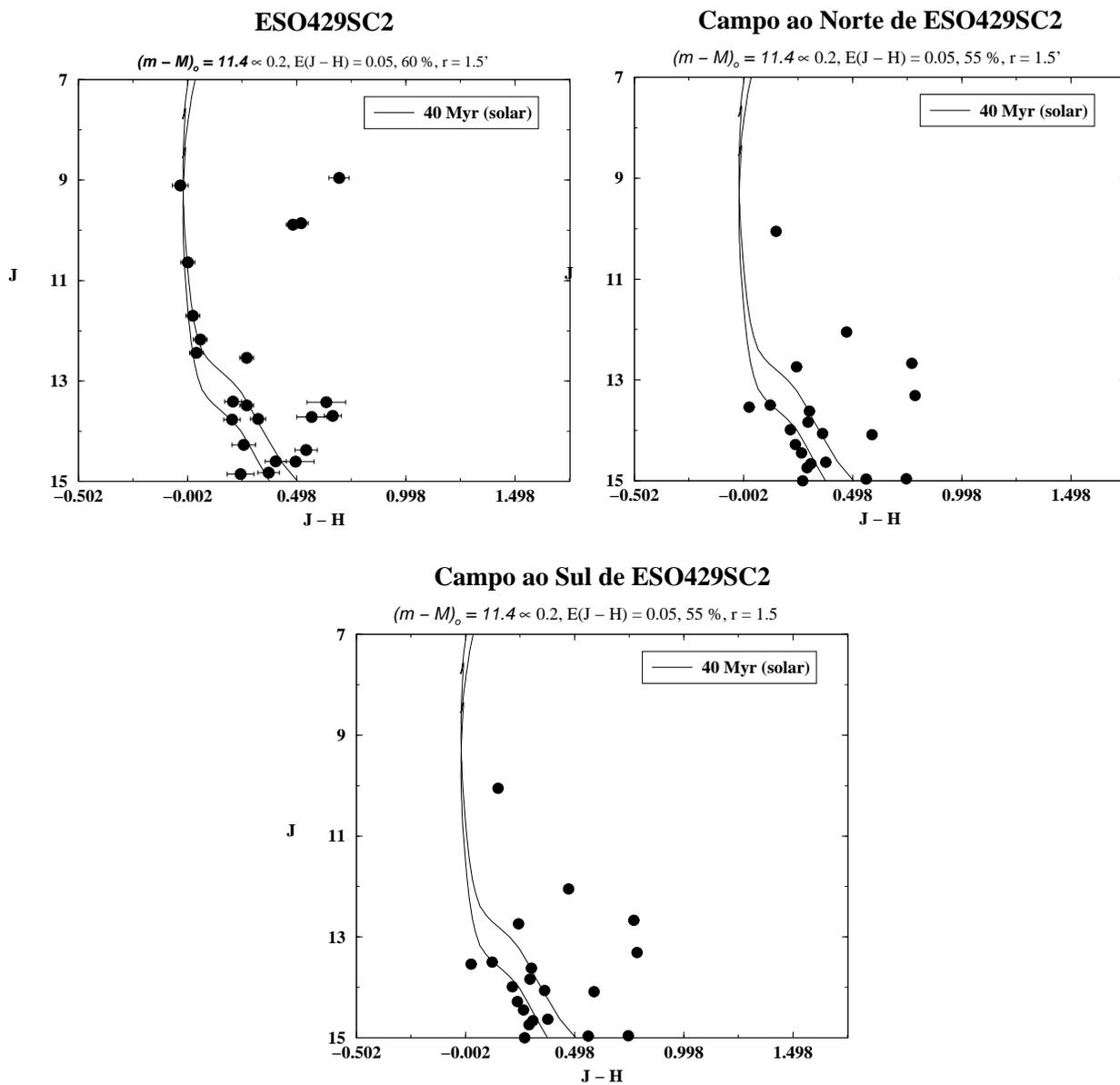


Figura 5.10: Diagramas cor-magnitude para ESO429SC2 e dois campos próximos. Idem à legenda da figura 5.2.

### ***Ruprecht 31***

O objeto compacto Ruprecht 31 apresenta estrelas distribuídas uniformemente ao longo da MS e conta com estrelas na região de gigantes (figura 5.11, painel à esquerda), que resultaram em  $d_{\odot} = 964 \pm 88$  pc. Mostra a presença de estrelas notavelmente de campo (localizadas a  $\sim 0.75$  em cor) que o levam a ter  $I_a = 63\%$ . A distribuição de estrelas para a extração dos campos difere da distribuição do objeto, destacando-se a ausência de estrelas brilhantes na região delimitada pelas isócronas para a alta MS e gigantes. Os resultados espectroscópicos resultaram em uma idade mais jovem (70 Myr), o espectro foi obtido para as 3 estrelas mais brilhantes e pode estar dominado por uma delas.

### ***NGC1252***

A exemplo do acontecido com Ruprecht 3, NGC1252 foi estudado anteriormente (Pavani et al. 2001)[67] e tem aqui um número maior de estrelas com fotometria disponível pelo uso do 2MASS. Tal fato levou a uma pequena alteração nos parâmetros previamente obtidos, e forneceu  $d_{\odot} = 831 \pm 38$ . Na figura 5.12, no CMD para o objeto, vemos a presença de estrelas na região do TO e alta MS, e falta de estrelas de estrelas na baixa MS, como a configuração esperada para remanescentes. O índice para NGC1252 é  $I_a = 65\%$ . O campo ao norte apresenta um índice maior, entretanto, suas estrelas são débeis não se distribuindo ao longo da MS. As estrelas mais brilhantes que foram desconsideradas no ajuste da isócrona por já terem sido definidas como não membros no citado artigo, levando em conta informações cinemáticas.

### ***NGC1901***

Objeto previamente estudado em (Pavani et al. 2001)[67]. Nos CMD's para NGC1901 e campos próximos (figura 5.13), está assinalada a região com contaminação por estrelas da LMC. Para verificarmos tal contaminação na direção do objeto extraímos regiões de igual área na direção de três objetos. NGC1928, um aglomerado globular no centro da barra da LMC; NGC2055, uma associação no extremo leste próxima de 30 Dor dominada por população jovem; e, NGC2004 com população de supergigantes vermelhas. Os CMD's não apresentam a baixa MS pois é nesta região que a contaminação é mais forte tendo sido, por isto, filtrada. O objeto apresenta a MS bem povoada, diferentemente do campos próximos. O índice é  $I_a = 67\%$  e a distância ao Sol  $d_{\odot} = 1180 \pm 108$  pc. As estrelas que o caracterizam no mapa XDSS foram ajustadas pelas isócronas. Não dispõem-se de espectros para NGC1901.

### ***IC1023***

O objeto apresenta um índice  $I_a = 62\%$  com presença de estrelas na região do TO e MS. O raio de extração foi escolhido de forma a incluir as estrelas que caracterizam o objeto no mapa XDSS. Entre as brilhantes, a maioria encontra-se na região delimitada pelo ajuste de isócronas, que fornece  $d_{\odot} = 1241 \pm 52$  pc. Não dispõem-se de espectros. Já os campos apresentam poucas estrelas nesta região, o que não ocorre para a região da baixa MS.

### ***ESO383SC10***

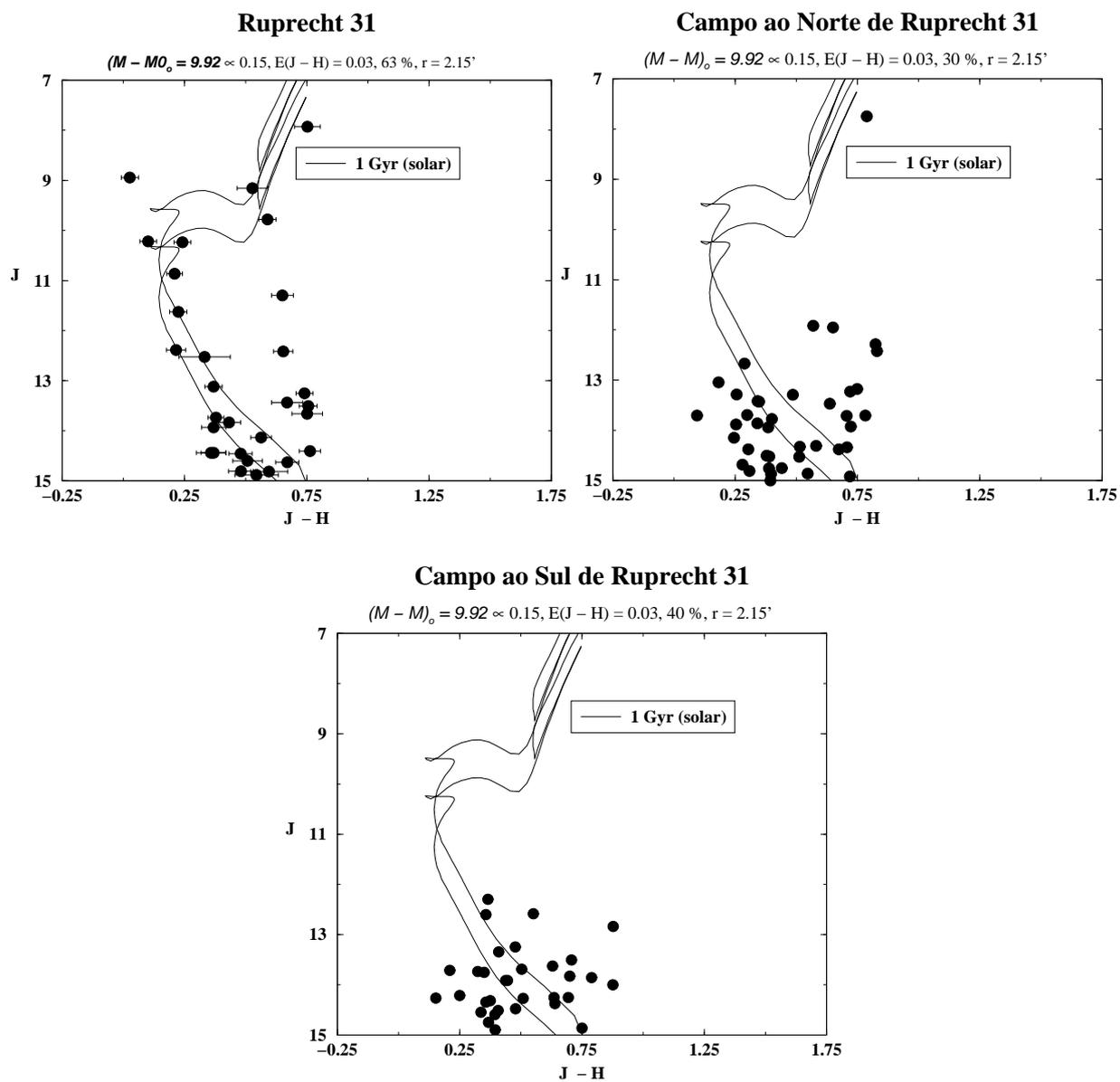


Figura 5.11: Diagramas cor-magnitude para Ruprecht 31 e campos próximos, conforme legendas nos painéis. Idem à legenda da figura 5.2.

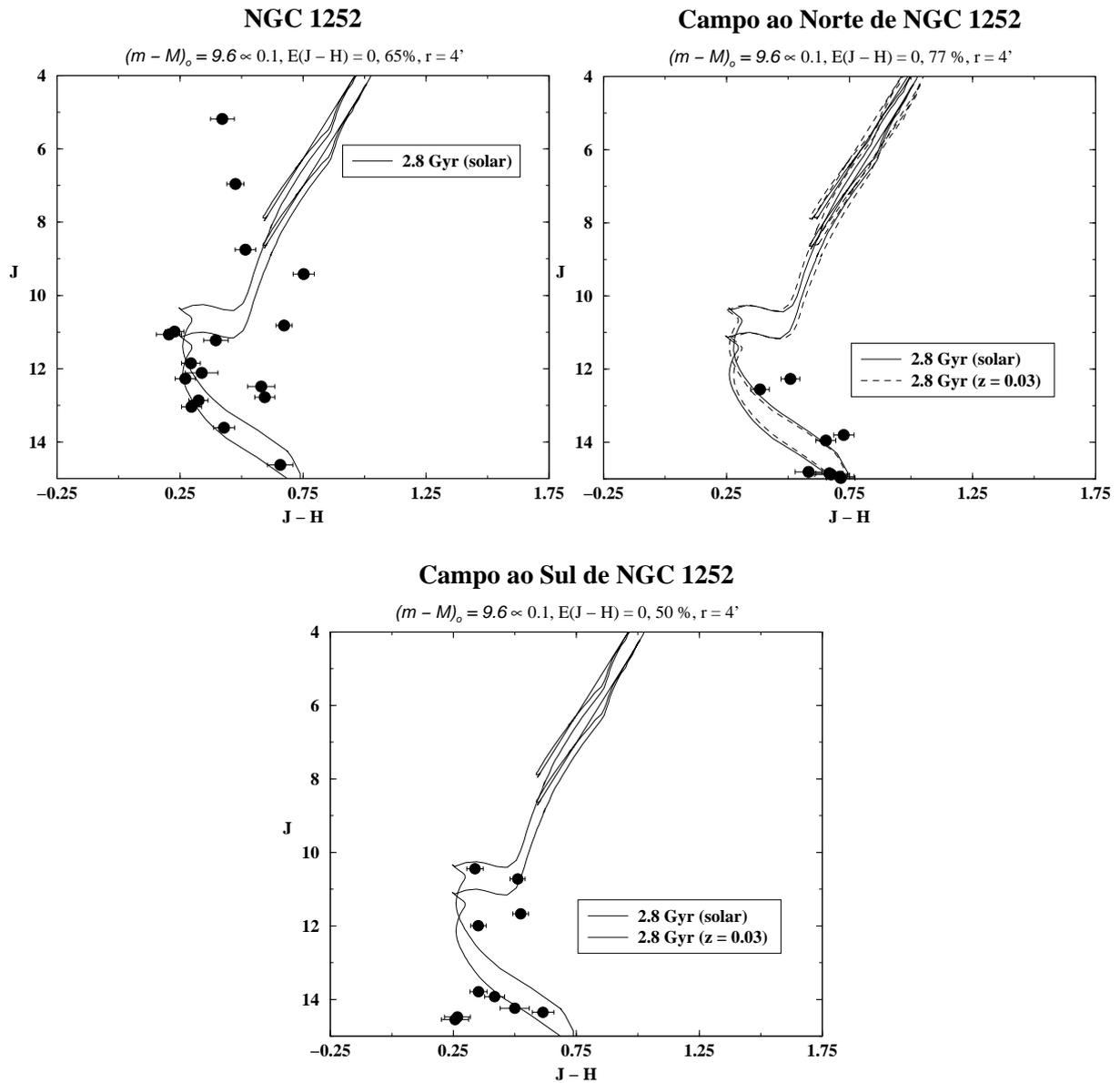


Figura 5.12: Diagramas cor-magnitude para NGC1252 e campos próximos. São mostradas, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campos de comparação é sobreposto o ajuste obtido para o objeto.

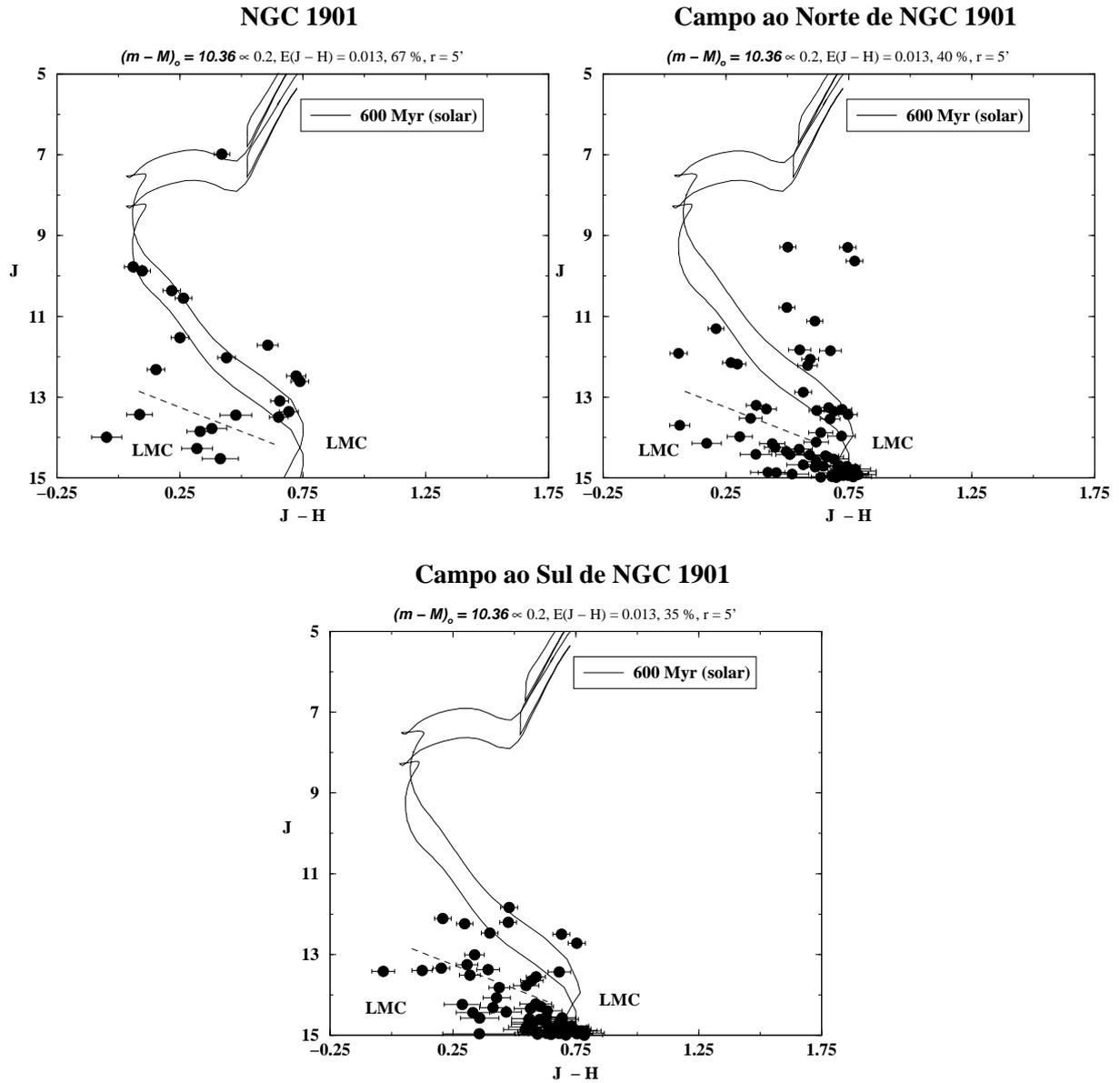


Figura 5.13: Diagramas cor-magnitude para NGC1901 e campos próximos. É mostrada a região contaminada por estrelas da Grande Nuvem de Magalhães (LMC). Idem à legenda da figura 5.12.

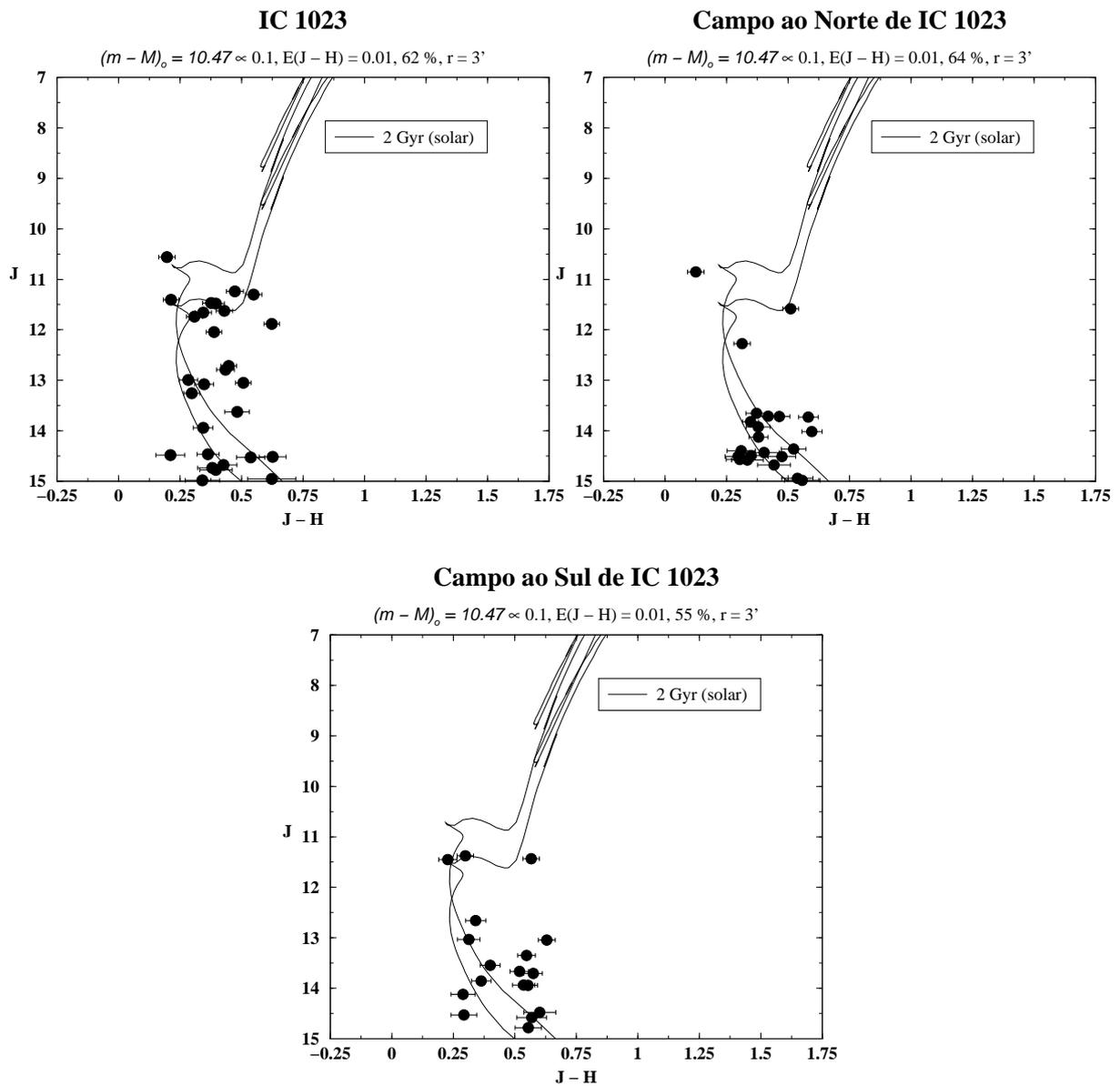


Figura 5.14: Diagramas cor-magnitude para IC1023 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12.

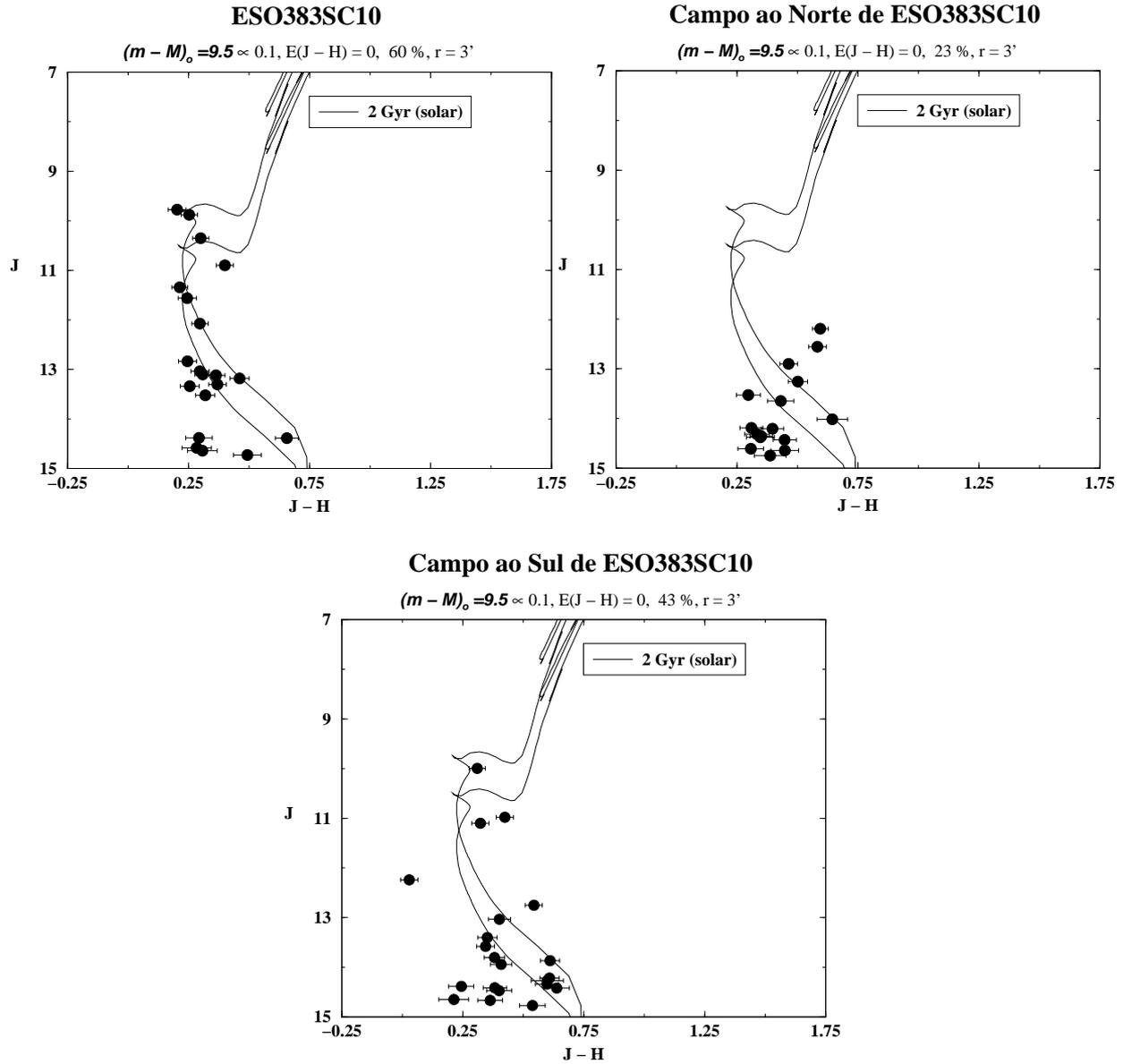


Figura 5.15: Diagramas cor-magnitude para ESO383SC10 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12.

O objeto dispõe de resultados espectroscópicos que se confirmaram no ajuste do CMD (figura 5.15). Apresenta  $I_a = 60\%$ , sendo este superior ao dos campos. Os campos não apresentam a mesma distribuição de estrelas que ESO383SC10. O objeto tem as estrelas brilhantes que o caracterizam no mapa XDSS distribuídas ao longo da região delimitada pelas isócronas, e apresenta-se com a baixa MS erodida, o ajuste resultou em  $d_{\odot} = 794 \pm 36$  pc.

### *Lynga8*

Lynga 8 é compacto, com poucas estrelas, a distribuição das mesmas não mostra semelhança com a dos campos. Os dados espectroscópicos indicaram uma idade um pouco mais velha (3-4 Gyr). Seu índice é alto  $I_a = 75\%$ , ao contrário dos campos. Do ajuste de isócronas resultou  $d_{\odot} = 1202^{+243}_{-105}$  pc. Os campos são caracterizados por uma maior dispersão de estrelas no diagrama.

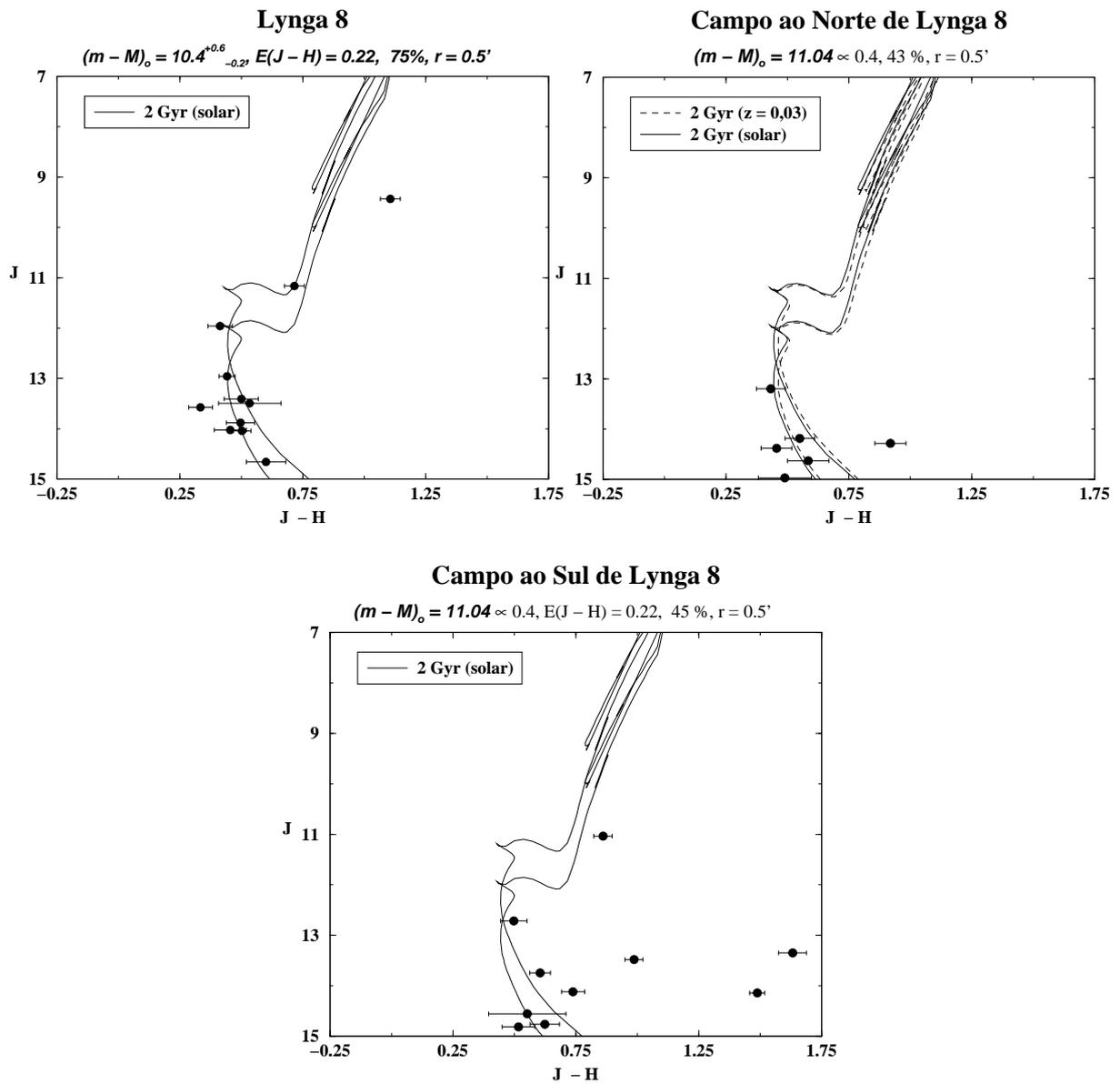


Figura 5.16: Diagramas cor-magnitude para Lynga 8 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.12.

## 5.2.2 Candidatos a Remanescentes com $I_a < 60\%$

### ***NGC2645***

NGC2645 apresentou um perfil radial de estrelas (Seção 2.3) semelhante ao esperado para um aglomerado aberto. Seu diagrama (figura 5.17) apresenta estrelas distribuídas ao longo da região delimitada pelas isócronas, entretanto, possui um razoável número de estrelas débeis que o levam a ter um  $I_a < 60\%$ . As maior parte das estrelas que o caracterizam no mapa XDSS encontram-se na região das isócronas, e o ajuste forneceu  $d_{\odot} = 1241 \pm 51$  pc. Além disso, a distribuição de estrelas do objeto difere da apresentada pelos campos. Assim, mesmo tendo  $I_a = 55\%$  NGC2645 ainda pode ser considerado como um candidato a remanescente de aglomerado aberto. Note que a baixa latitude Galáctica do objeto indica importante contaminação pelo disco. Não dispõe-se de espectros para o objeto.

### ***Waterloo 6***

Objeto classificado como compacto cujo perfil radial de estrelas (Seção 2.3) difere levemente da contribuição do fundo do céu. Ao analisarmos o seu diagrama e dos campos próximos (figura 5.18), vemos que as distribuições diferem. Porém, o melhor ajuste possível, que fornece  $d_{\odot} = 1492$  pc, não consegue englobar as estrelas que o caracterizam no mapa XDSS (Seção 2.2), uma vez que as mesmas encontram-se espalhadas no diagrama. Desse modo, Waterloo 6, com os dados disponíveis no momento, não pode ser considerado como remanescente de aglomerado aberto, apresentando características de uma flutuação de estrelas do campo. Não dispõe-se de espectros do objeto.

### ***ESO211SC8***

Objeto classificado como compacto localizado a baixa latitude ( $b = -0.43^{\circ}$ ), seu perfil apontou alto contraste do pico central em relação à contribuição do fundo do céu (para  $J > 13$ ). O espectro obtido para ESO211SC8 indicou uma faixa em idades em torno de 20 Myr, com grande avermelhamento. As isócronas reproduzem esta faixa no CMD para o objeto (figura 5.19 painel à esquerda), entretanto, somente duas estrelas servem de vínculo para a alta MS e quatro para a baixa MS indicando  $d_{\odot} = 1492$  pc. Tal configuração no CMD levou a  $I_a = 28\%$ . Os campos não apresentam estrelas na alta MS delimitada pelas isócronas, mas objeto e campos assemelham-se para magnitudes mais débeis.

### ***ESO570SC12***

Objeto esparsos cujo perfil radial de estrelas (Seção 2.3) apresentou-se semelhante ao perfil dos compactos. A presença de estrelas azuis débeis implicou em  $I_a = 58\%$ , entretanto, suas estrelas preenchem bem a região delimitada pelas isócronas no CMD (painel à esquerda na figura 5.21). Os campos mostram uma distribuição mais esparsa sem a presença de estrelas brilhantes. Por isto o objeto deve ser analisado com base nos movimentos próprios, não sendo desconsiderado como candidato a remanescente de aglomerado aberto. O ajuste de isócronas levou a  $d_{\odot} = 682 \pm 32$  pc. Objeto sem espectro disponível.

### ***Objeto 1***

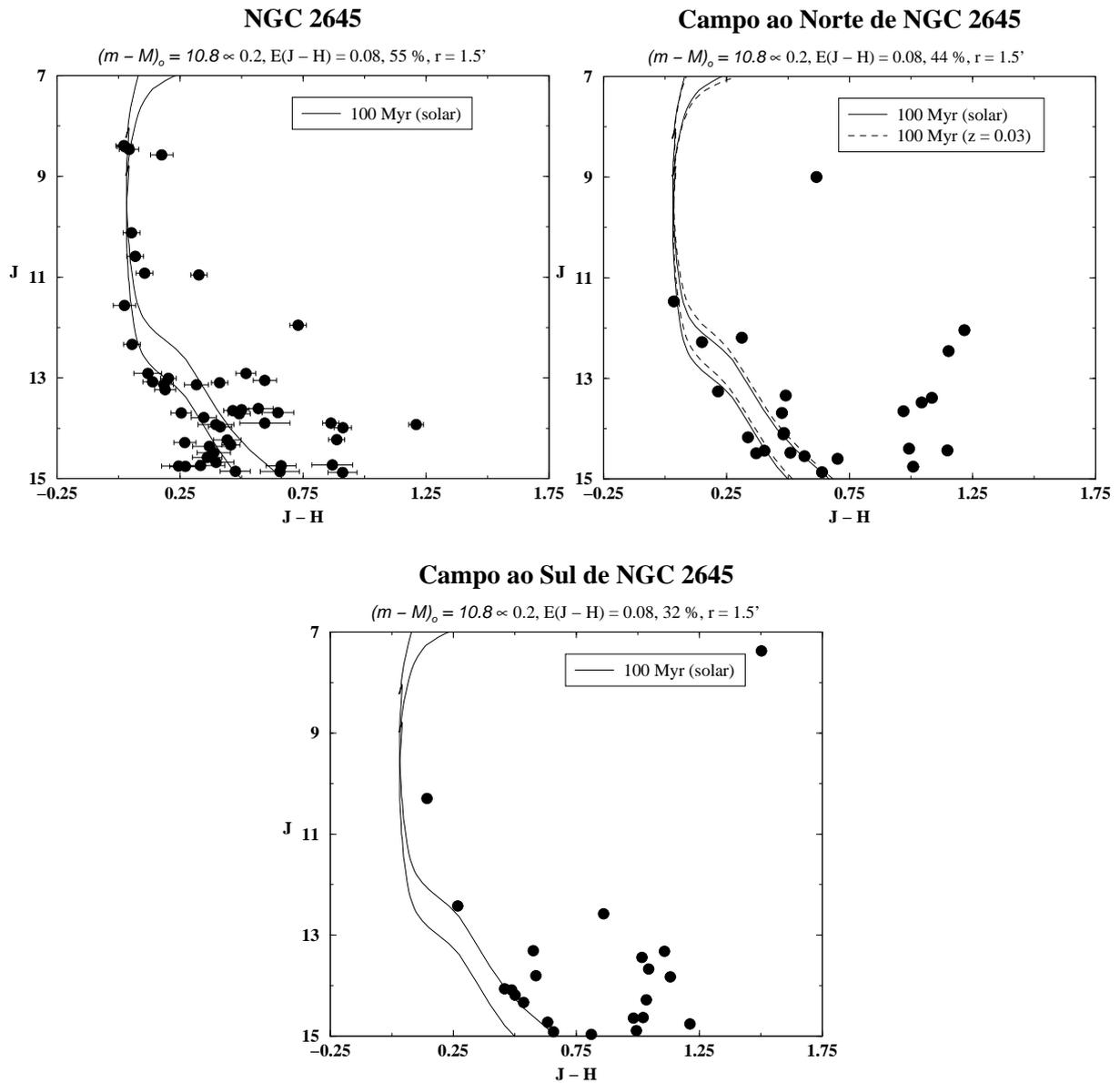


Figura 5.17: Diagramas cor-magnitude para NGC2645 e campos próximos. São mostradas, conforme legenda nos painéis, os parâmetros obtidos a partir de isócronas de Padova com metalicidade solar e a seqüência de binárias não resolvidas. Nos painéis para os campos de comparação é sobreposto o ajuste obtido para o objeto.

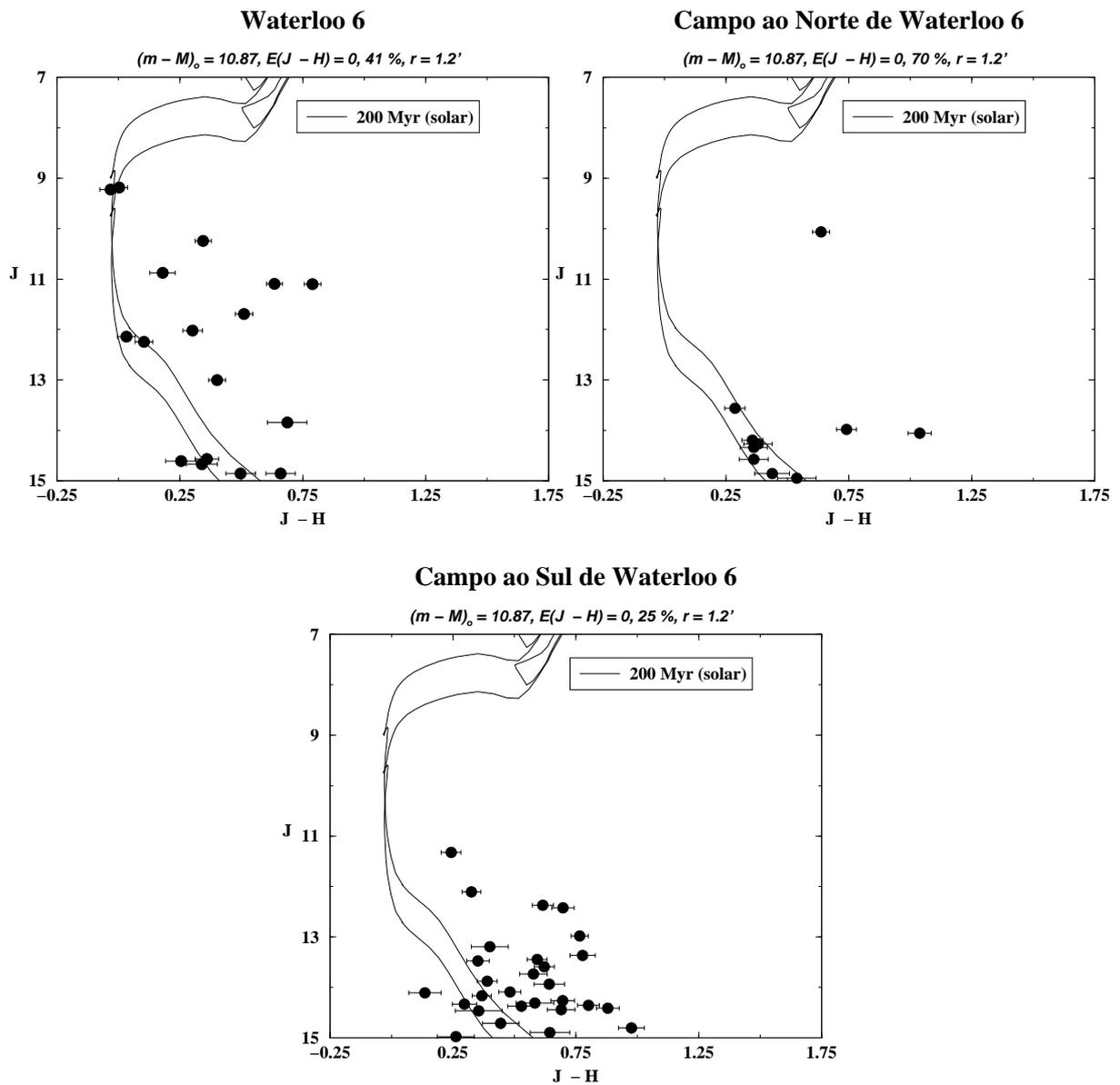


Figura 5.18: Diagramas cor-magnitude para Waterloo 6 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17.

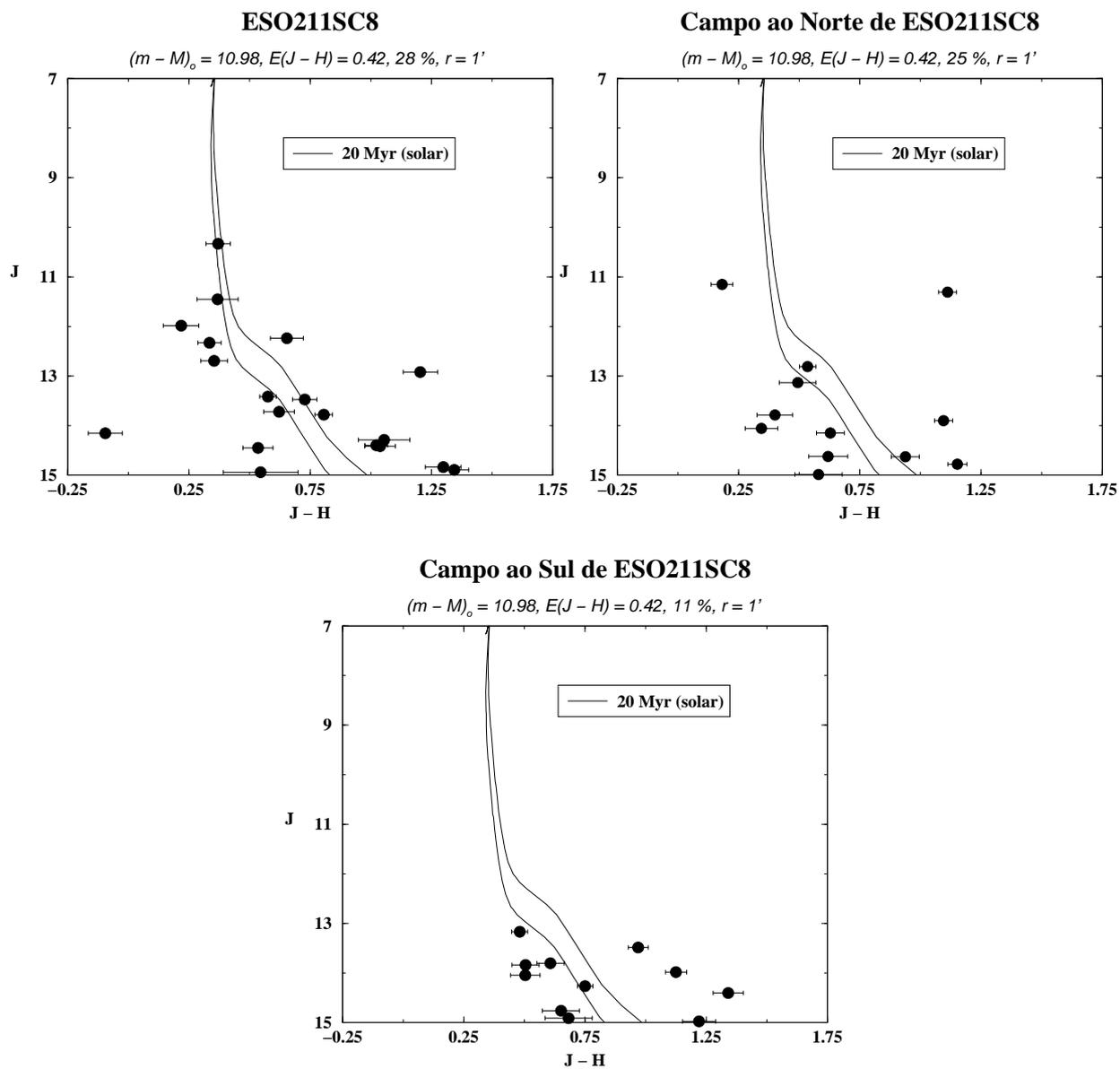


Figura 5.19: Diagramas cor-magnitude de ESO211C8 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17.

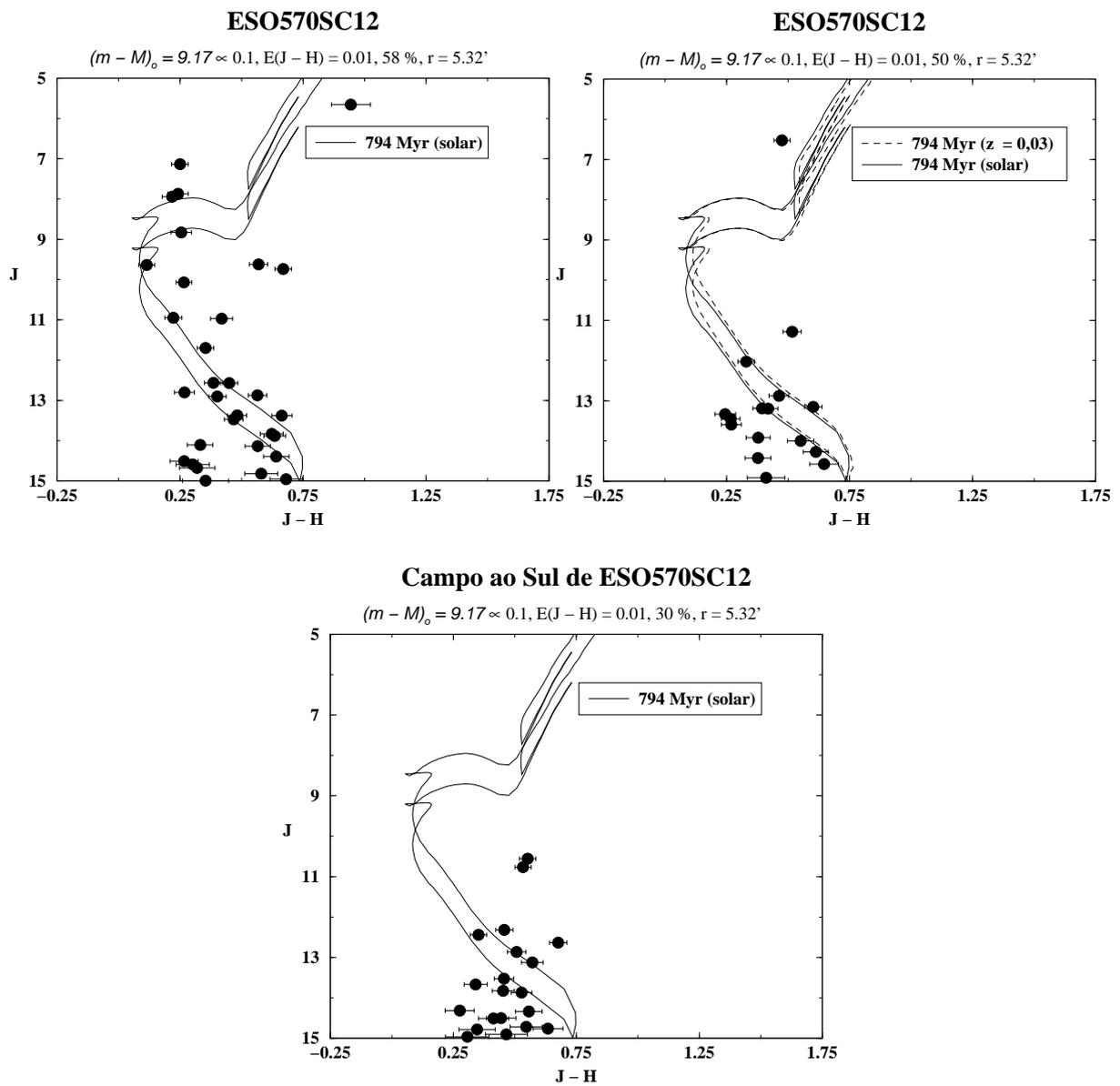


Figura 5.20: Diagramas cor-magnitude de ESO570SC12 e campos próximos. Idem à legenda da figura 5.17.

Objeto classificado como compacto cujo perfil radial de estrelas apresentou um pico para a região central, quando consideradas estrelas mais brilhantes que magnitude 13. No diagrama (figura 5.21 painel à esquerda) são justamente tais estrelas que ajustam as isócronas, cuja faixa em idades foi fornecida por resultados espectroscópicos. Essas estrelas também que destacam-se no mapa XDSS (Seção 2.2). Em contrapartida estrelas débeis encontram-se espalhadas no diagrama e com grandes barras de erro, levando a  $I_a = 50\%$ . Ao compararmos objeto e campos vemos que os últimos apresentam maior número de estrelas em  $J > 13$ . O módulo de distância obtido das isócronas fornece  $d_{\odot} = 2177 \pm 200$  pc. Sabemos que perdemos informações de objetos a grandes distâncias uma vez que a MS confunde-se com o campo. Sendo assim, a análise de movimentos próprios para o Objeto 1 deve ser realizada, podendo vir a definir melhor as propriedades do mesmo.

### 5.2.3 Candidatos a Remanescentes cujo ajuste de isócrona não foi possível

#### *Ruprecht 156*

Objeto classificado como compacto cujo perfil radial de estrelas mostrou-se semelhante ao de esparsos. Entretanto, vemos pela imagem no mapa XDSS (Seção 2.2) que trata-se de uma concentração extremamente compacta com um diâmetro de  $< 1'$ . Os diagramas para objeto e campos (figura 5.22) não são semelhantes. As informações disponíveis para Ruprecht 156 não permitem caracterizá-lo como candidato a remanescente, tampouco é seguro afirmar de tratar-se de uma flutuação de estrelas do campo. É um objeto interessante para ser estudado por meio de telescópios mais potentes e com maior resolução.

#### *ESO132SC14*

Objeto compacto localizado a baixa latitude ( $b = 0.20^{\circ}$ ) com diâmetro  $< 1'$ . Seu perfil radial de estrelas apresentou um pico central destacando-se da contribuição do fundo do céu considerando as estrelas com  $J < 13$ . Os dados espectroscópicos resultaram em uma faixa de idades em torno de 850 Myr. Porém as estrelas que o caracterizam no mapa XDSS (Seção 2.2) encontram-se espalhadas no CMD (figura 5.23) não permitindo um ajuste de isócronas. Os campos apresentam razoável semelhança com o objeto, especialmente o campo ao norte. Assim sendo, ESO132SC14 parece apresentar-se como uma flutuação de estrelas de campo.

#### *ESO383\*\*5*

Objeto classificado como compacto que destaca-se no mapa XDSS (Seção 2.2) pela presença de 5 estrelas brilhantes ao centro e cujo espectro integrado sugeriu uma faixa em idades de 3-4 Gyr. No CMD (figura 5.24, painel à esquerda) estas estrelas encontram-se espalhadas não permitindo um ajuste de isócronas. Os resultados parecem indicar ESO389\*\*5 como uma flutuação de estrelas de campo. Note-se, porém, conforme a discussão na Seção 5.3 binárias podem ocupar domínios em cor e magnitude bastante extensas (figura 5.25). O objeto mereceria estudos mais detalhados com velocidades radiais e busca de binárias.

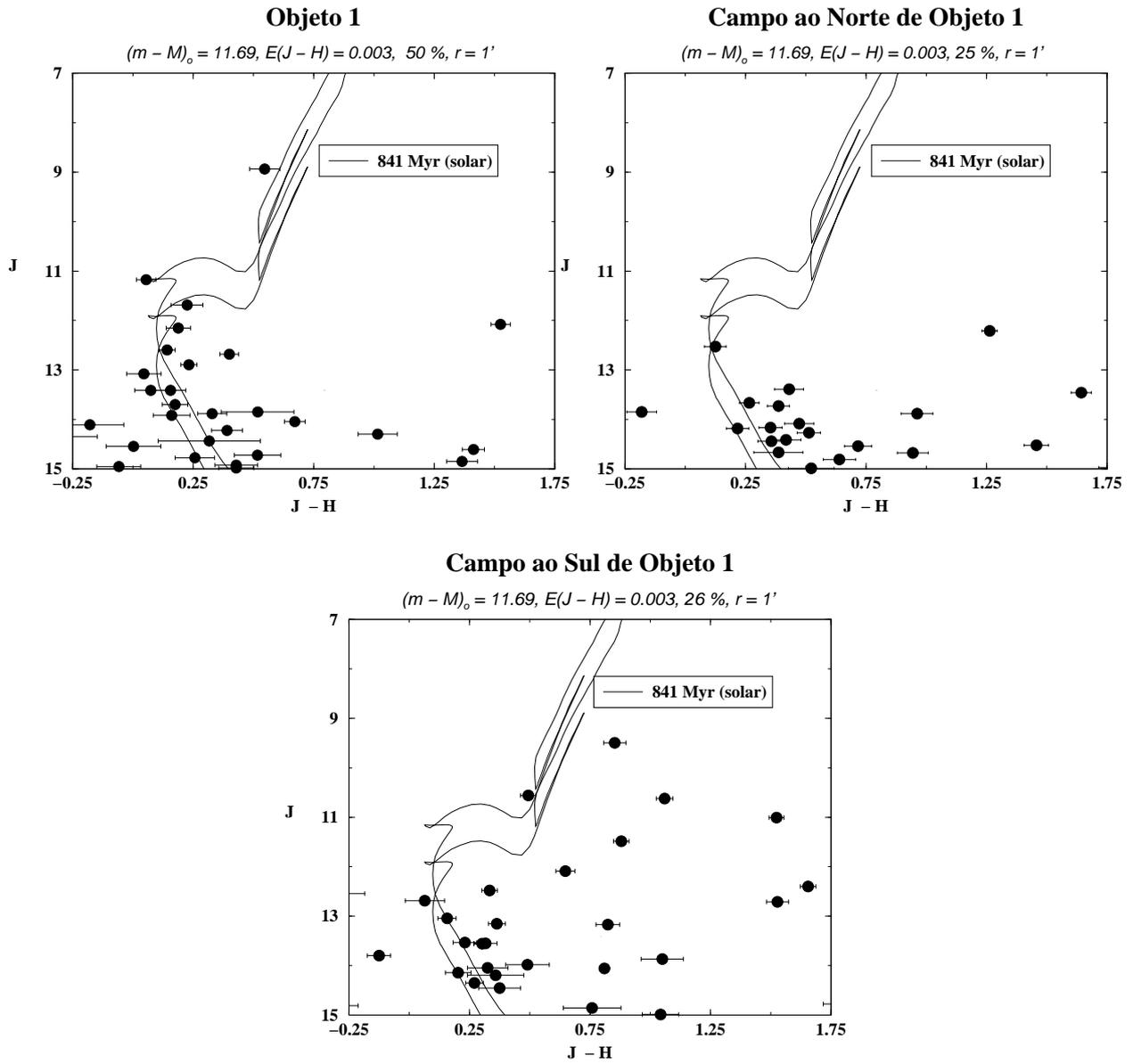


Figura 5.21: Diagramas cor-magnitude de Objeto 1 e campos próximos. Mesma legenda da figura anterior. Idem à legenda da figura 5.17.

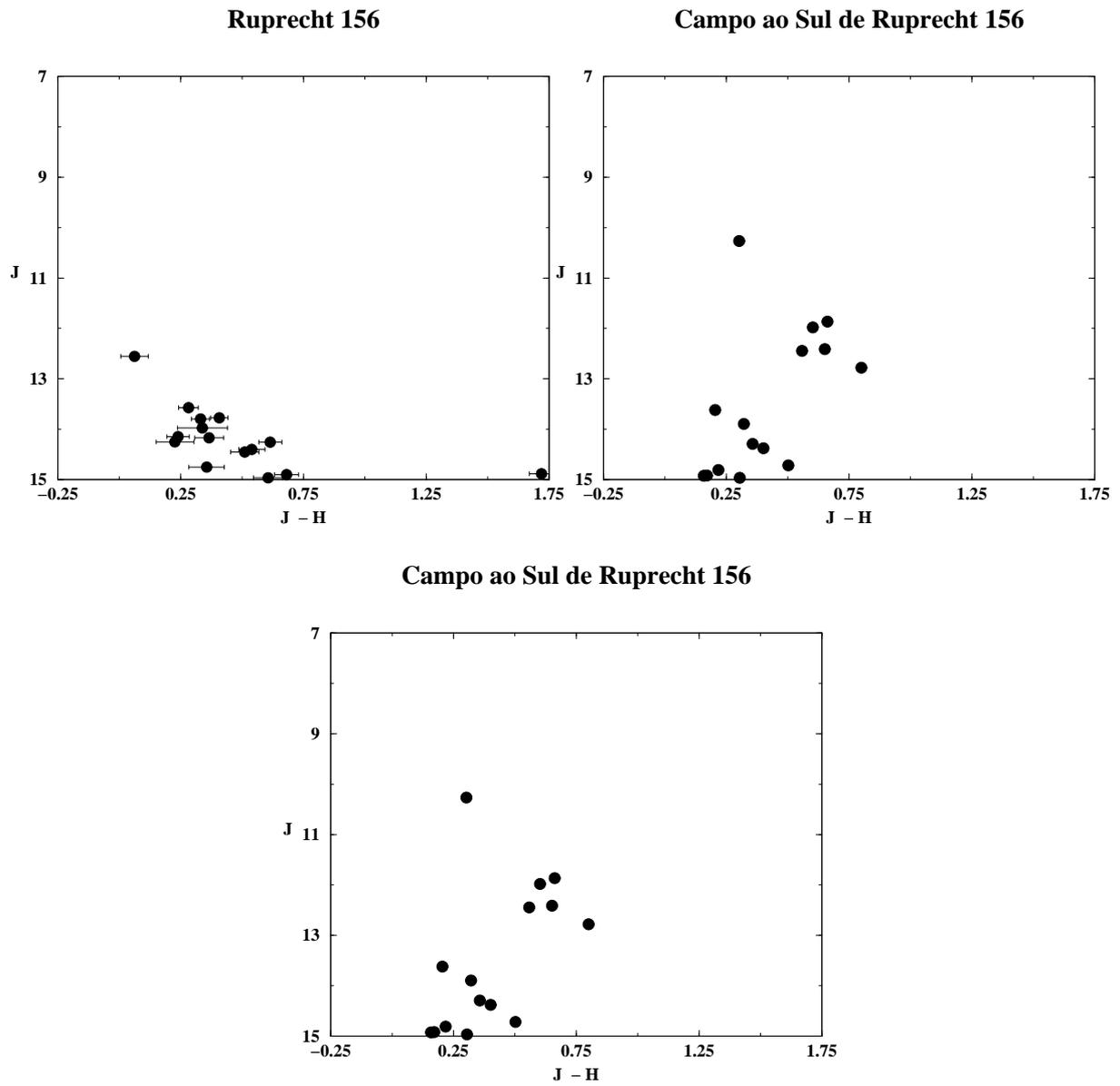


Figura 5.22: Diagramas cor-magnitude de Ruprecht 156 e dois campos próximos ao sul e ao norte, conforme legenda nos painéis.

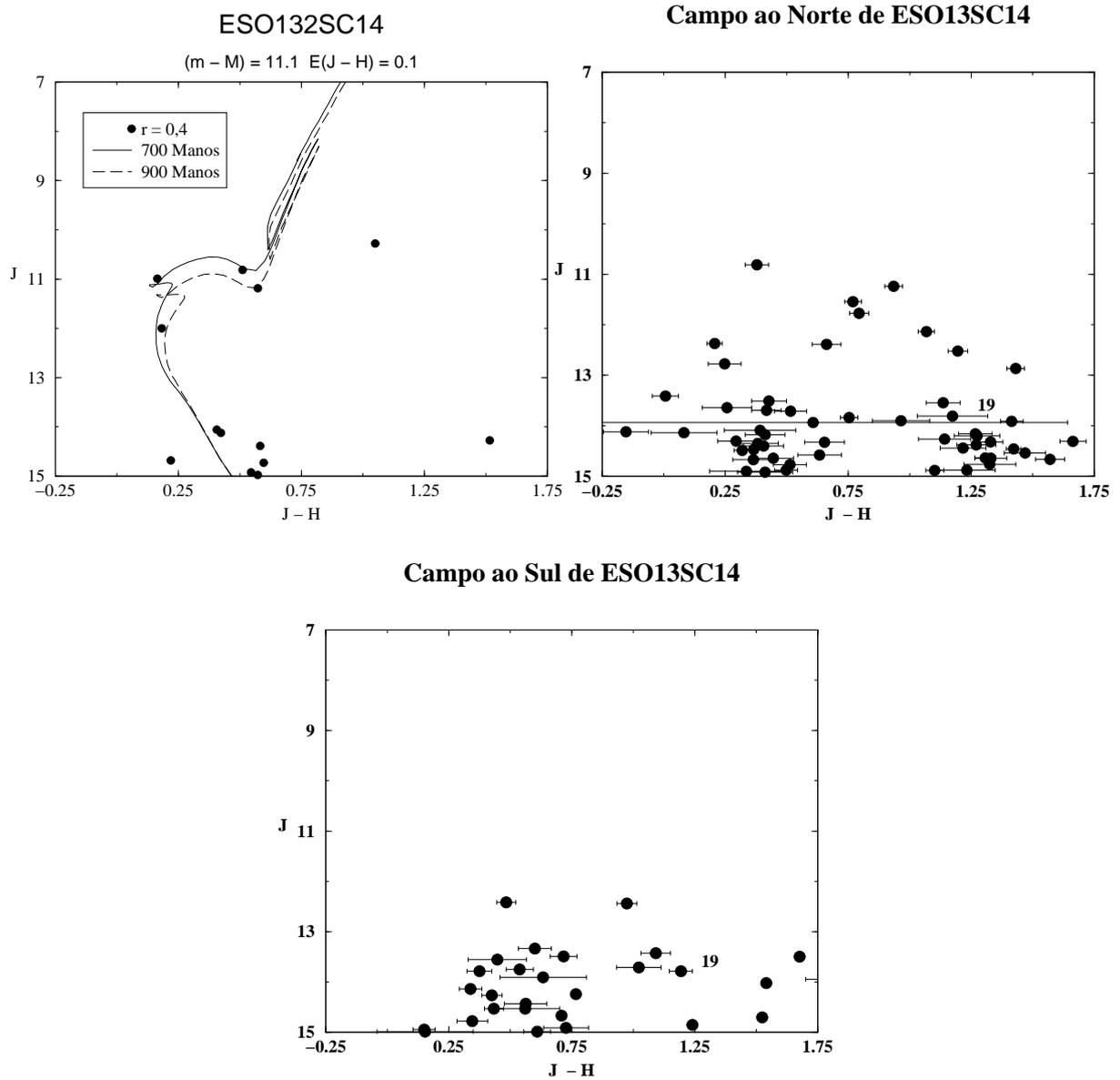


Figura 5.23: Diagramas cor-magnitude de ESO132SC14 e dois campos próximos. No painel do objeto são mostradas isócronas de Padova e a seqüência de binárias, assim como os parâmetros obtidos do ajuste.

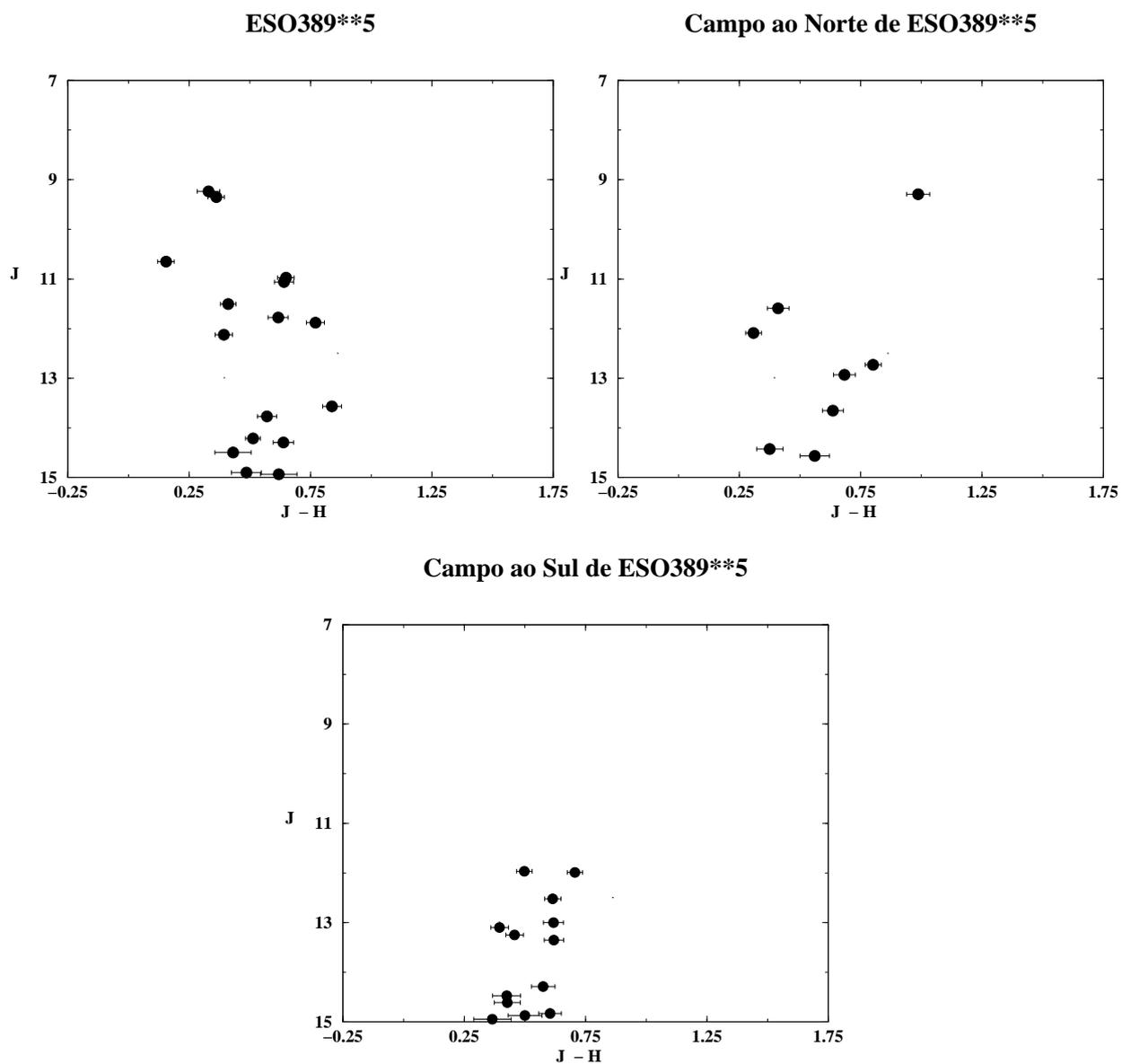


Figura 5.24: Diagramas cor-magnitude de ESO389\*\*5 e dois campos próximos ao norte ao sul.

### 5.3 Emissão de Raio-X por binárias de contato

Fazemos aqui um breve comentário a respeito de binárias de contato, e seu efeito no CMD.

Segundo Belloni & Verbunt (1996)[10], no passado, a pesquisa sobre o fluxo de Raio-X e sua influência sobre parâmetros estelares de aglomerados abertos estavam essencialmente restritas aos jovens. Isso porque a emissão de Raio-X decai com a idade para estrelas sem companheira. Entretanto, binárias de contato (aquelas que em trocam massa) apresentam um alto nível de atividade em Raio-X, e foram detectadas em aglomerados abertos velhos conhecidos como IC4651, NGC752, M67 e NGC188, todos com idades entre 2 e 7 Gyr e dados obtidos do ROSAT PSPC.

A figura 5.25 corresponde a figura 1 do mencionado artigo. Nela vemos a comparação de luminosidades Raio-X em função da localização no CMD  $M_v \times (B - V)$ . Os círculos abertos correspondem a binárias cromosféricamente ativas do campo (dados ROSAT), os círculos fechados correspondem a fontes Raio-X em NGC752 identificadas como membros do aglomerado, e finalmente, os círculos marcados com + indicam fontes brilhantes em Raio-X em M67. A linha sólida representa a seqüência principal de idade zero. Vemos que para os aglomerados em questão parte das binárias de contato, que incluem-se entre as não resolvidas, localizam-se em regiões no CMD não esperadas.

Nos ajustes de isócronas apresentados neste capítulo, optamos por uma interpretação conservadora no CMD, qual seja, consideramos binárias não resolvidas somente na região delimitada por isócrona deslocada de 0.75 magnitudes em relação ao ajuste final. Entretanto, este estudo sugere que no caso da ocorrência de binárias de contato seria possível encontrarmos tais sistemas ocupando *loci* mais distantes em relação à mencionada região. Um possível caso a explorar em mais detalhe seria o espalhamento de estrelas no CMD de ESO389\*\*5 (figura 5.24).

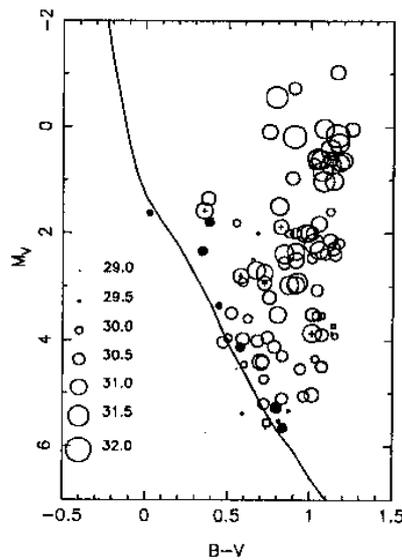


Figura 5.25: Luminosidades Raio-X em função da localização no CMD para fontes Raio-X identificadas como pertencentes aos aglomerados abertos NGC752 e M67 e ao campo Galáctico <sup>3</sup>.

## 5.4 Conclusões

A utilização de CMD's no presente estudo revelou-se um método fundamental. Na busca por caracterizar remanescentes de aglomerados abertos, diferenciar prováveis sistemas físicos de flutuações de campo é essencial. Nesse sentido, a utilização do índice de ajuste ( $I_a$ ) visou fornecer uma ferramenta objetiva na análise da distribuição de estrelas no diagrama. Quanto à contaminação por estrelas de campo, os diagramas forneceram uma comparação visual entre objeto e campos próximos. Esta permitiu, com base na fotometria disponível até o presente momento, a realização de uma primeira diferenciação entre aqueles objetos em que um estudo mais aprofundado mostra-se promissor

Desse modo, dos 23 objetos da amostra, 17 foram mantidos como candidatos a remanescentes de aglomerado aberto a serem mais explorados em movimentos próprios. Destes, 14 alcançaram  $I_a \geq 60\%$ , sendo eles: NGC6481, NGC6863, NGC1663, ESO425SC6, ESO425SC15, Ruprecht 3, ESO426SC26, ESO429SC2, Ruprecht 31, NGC1252, NGC1901, IC1023, ESO383SC10 e Lynga 8. Cabe salientar ainda que três destes, mesmo tendo alcançado  $I_a < 60\%$ , mostram-se interessantes para um estudo mais aprofundado, quais sejam: NGC2645, Objeto 1, ESO570SC12. Por fim, os objetos Ruprecht 156, Waterloo 6, ESO311SC8, ESO132SC14 e ESO389\*\*5 se configuraram ou como prováveis flutuações de estrelas de campo ou não apresentaram dados suficientes para uma análise conclusiva.

No Capítulo 5, será apresentado o estudo desses 17 objetos através de seus movimentos próprios. NGC6964 alcançou  $I_a \geq 60\%$ , embora tendo uma distribuição de estrelas no CMD não homogênea. Por tratar-se de um objeto amplamente discutido na literatura recente, será também incluído neste estudo.

## Capítulo 6

# Movimentos Próprios

A caracterização de remanescentes a aglomerados abertos passa pela discussão da natureza física dos candidatos, e o estudo de movimentos próprios constitui-se em importante ferramenta de análise. Como remanescentes devem corresponder aos estágios avançados da evolução dinâmica de aglomerados abertos, é necessário considerarmos alguns efeitos que devem influenciar a distribuição de movimentos próprios destes últimos.

Diversos estudos presentes na literatura têm destacado a importância das estrelas binárias na evolução dinâmica de aglomerados abertos. A combinação dos efeitos de alta densidade estelar com baixa dispersão de velocidades pode fazer com que a energia de ligação de binárias seja compatível, ou mesmo exceda, a energia do aglomerado como um todo (Hut 1996)[47]. Aglomerados abertos são conhecidos por conterem significativa fração de conteúdo estelar na forma de sistemas múltiplos, particularmente binárias. Ao longo da evolução dinâmica a tendência é que a fração de tais sistemas cresça e que estes se concentrem na região central, mudando a distribuição espacial inicial de estrelas do aglomerado. Assim, mudanças nas propriedades dos sistemas múltiplos e, em especial das binárias, ao longo da evolução estelar normal irá afetar a evolução dinâmica do aglomerado (De la Fuente Marcos 1998, Terlevich 1987, Takahashi & Potegies Zwart 2000)[28, 85, 84] .

Do ponto de vista observacional, os principais efeitos esperados como consequência de uma significativa fração de binárias não resolvidas nas partes centrais de aglomerados abertos são (Bica & Bonatto 2005)[13]: (i) a produção de grandes desvios na distribuição de movimentos próprios correspondentes a estrelas sem companheira de aglomerados, como resultado as velocidades podem ser bem maiores em função dos movimentos de binárias; (ii) na função da massa o número de estrelas de baixa massa pode ser subestimado em relação às estrelas de alta massa; e (iii) o alargamento da MS em direção à a posições mais vermelhas no CMD (discussão presente na seção 5.2). No presente capítulo, com relação aos objetos da amostra selecionados no Capítulo 5, trataremos do exposto no item (i).

## 6.1 Distribuição do módulo de movimentos próprios

Para sermos consistentes com a análise dos CMD's foram extraídos dados UCAC2 (Seção 2.1.2) de movimento próprio para os objetos de acordo com a área usada na extração de fotometria 2MASS. Como o catálogo UCAC2 fornece fotometria 2MASS foi possível verificar que a correspondência entre os dois é essencialmente completa para  $J \leq 14.5$ . Visando maximizar o contraste objeto/campo foi aplicado um filtro em cor nos diagramas. Através dele foi possível selecionar, nos campos de comparação, movimentos próprios para estrelas correspondentes à mesma região do CMD em que as estrelas do objeto estão distribuídas. Ou seja, a distribuição de estrelas do objeto serviu para delimitar a região de interesse no campo, não sendo descartada nenhuma estrela do objeto.

O método utilizado será o de comparar, por meio de histogramas, a distribuição do módulo de movimentos próprios das estrelas na direção do objeto com a distribuição para as estrelas de campo. Sendo o módulo dado por

$$MP(\text{módulo}) = \sqrt{(\mu_{\alpha} \cos \delta)^2 + \mu_{\delta}^2}. \quad (6.1)$$

O módulo de movimento próprio corresponde à velocidade projetada ( $v_p$ ) no plano do céu.

Os campos de comparação correspondem a anéis externos de grande área centrados nas coordenadas de cada objeto e escalonados pelo ângulo sólido do mesmo. Desta forma é obtida para o campo uma excelente estatística.

Os histogramas para o aglomerado aberto NGC 3680 podem ser vistos na figura 6.1. Em ambos painéis é visível a existência de um pico na distribuição de movimentos próprios do objeto, o qual corresponde à componente de estrelas sem companheira (Bica & Bonatto 2005)[13]. Tanto a direção do aglomerado quanto a do campo de comparação apresentam estrelas com grandes valores de movimento próprio, que podem ser relacionados com movimentos de binárias.

É importante salientar que na distribuição de movimentos próprios de todos os objetos estão incluídas as estrelas ajustadas pelas isócronas, assim como aquelas que não seguem o ajuste.

Os candidatos a remanescente mostrados nas figuras 6.2 a 6.4 são caracterizados por apresentarem um pico em sua distribuição que não supera 15 (msa/ano). As vezes apresentam um segundo pico menos pronunciado para valores maiores em movimentos próprios, mas a estatística é limitada. Podemos considerar que as distribuições são similares à de NGC3680, mesmo os objetos apresentando um número menor de estrelas.

Bica & Bonatto (2005) [13] fazem um estudo no qual mostram que medidas de movimentos próprios podem ser indicadores de binaridade em aglomerados abertos. Na figura 5 desse artigo (correspondendo ao painel à direita na figura 6.14) é mostrada a velocidade projetada no plano do céu em km/s para as estrelas de M67 na região do núcleo e fora dela. Segundo os autores o pico de baixas velocidades representa os movimentos randômicos de estrelas sem companheira, sobreposto ao movimento sistemático do aglomerado. O pico para altas velocidades poder ser produzido pelo sistema de binárias não resolvidas.

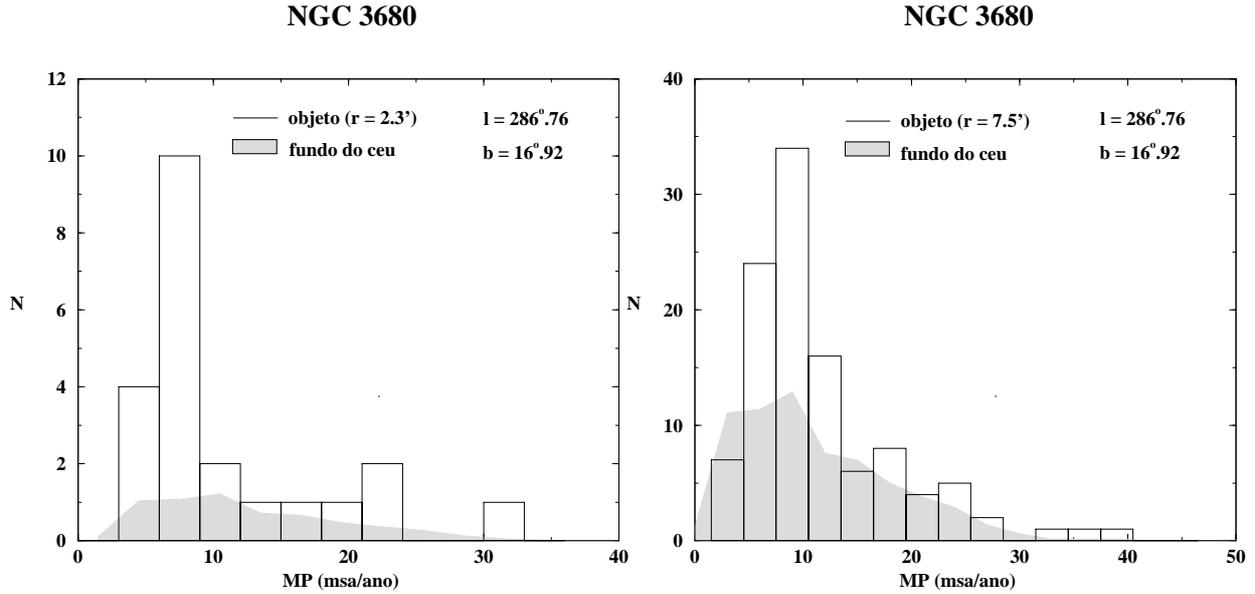


Figura 6.1: É mostrada a distribuição de movimentos próprios de NGC3680, através de histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio. Painel à esquerda: distribuição interna ao  $r_n = 2.3 \pm 0.4'$ . Painel à direita: distribuição interna à região central ( $r = 7.5'$ ). Em ambos painéis os máximos correspondem à distribuição de movimentos próprios das estrelas sem companheira e os valores maiores de movimento próprio sugerem a presença de estrelas binárias. São mostradas latitude e longitude Galácticas.

Ao compararmos este resultado com os histogramas para NGC1663, ESO425SC6, ESO425SC15, ESO426SC26, ESO429SC2, Ruprecht 31, NGC 2645, NGC 1252 e NGC1901 podemos dizer que os mesmos sugerem a existência de uma componente de estrelas sem companheiras. Já a presença de estrelas com valores maiores de movimento próprio, em maior ou menor número, de acordo com o objeto, sugere a presença de binárias não resolvidas. ESO570SC12, com  $I_a < 60\%$  (Seção 5.2.2) inclui-se neste grupo apresentando a mesma característica.

Para os candidatos a remanescentes mostrados nas figuras 6.5 e 6.6 a distribuição de movimentos próprios tem outra característica. NGC6863 apresenta o número de estrelas com valores baixos de movimentos próprios igual ao número com valores maiores. Os demais (NGC6481, Ruprecht 3, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8) apresentam um número maior de estrelas com valores acima de 10 msa/ano.

Os objetos com o menor número de estrelas com movimentos próprios disponíveis são Lynga 8, NGC6481 e N6863. Ruprecht 3 e NGC6863 não estão completos, em relação ao CMD, para  $J \leq 15$ . Porém todos os 6 mostram um bom ajuste de estrelas no CMD ( $I_a \geq 60\%$ ). Neste conjunto, com exceção do Objeto 1, os objetos atingem idades entre 2 Gyr e 3.5 Gyr.

Este resultado pode estar indicando que boa parte, se não a maioria, das estrelas sem companheira já se dispersaram no campo Galáctico, indicando assim, um avançado estágio evolutivo.

NGC6994, na figura 6.7 painel à esquerda, apresenta uma contagem de estrelas superior ao campo para a mesma faixa de movimentos próprios, porém sua distribuição de movimentos próprios é semelhante à do campo. O CMD para o objeto não apresenta estrelas na alta MS em um intervalo de 3 mag entre a região do TO e a baixa MS. Podemos encontrar na literatura as discussões que têm sido feitas a respeito deste objeto. Carraro (2000)[19]

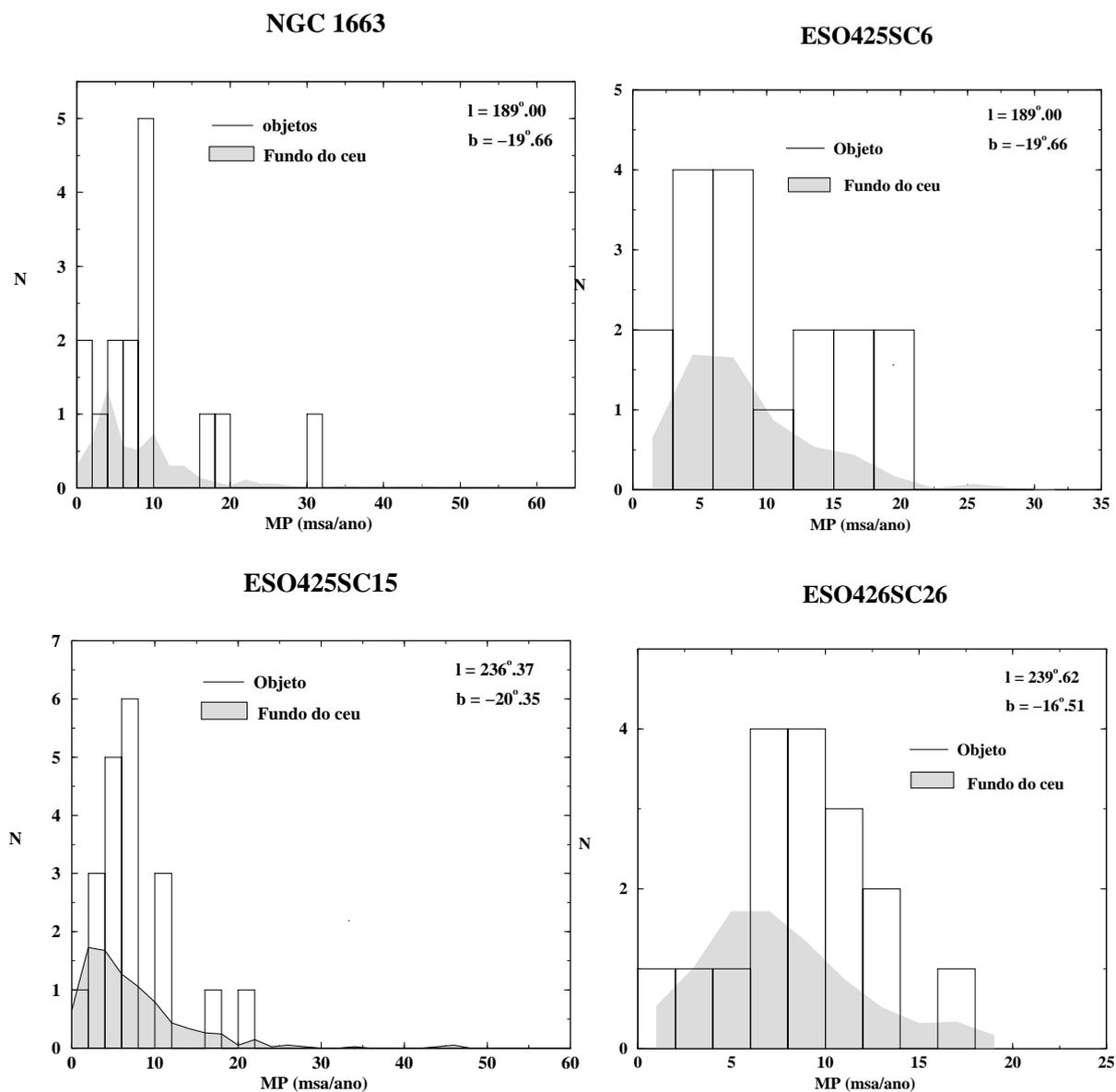


Figura 6.2: Os histogramas indicam o número de estrelas por intervalo de movimento próprio. São mostrados os objetos (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. A distribuição de movimentos próprios sugere uma componente de estrelas sem companheira e a presença de prováveis binárias. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.

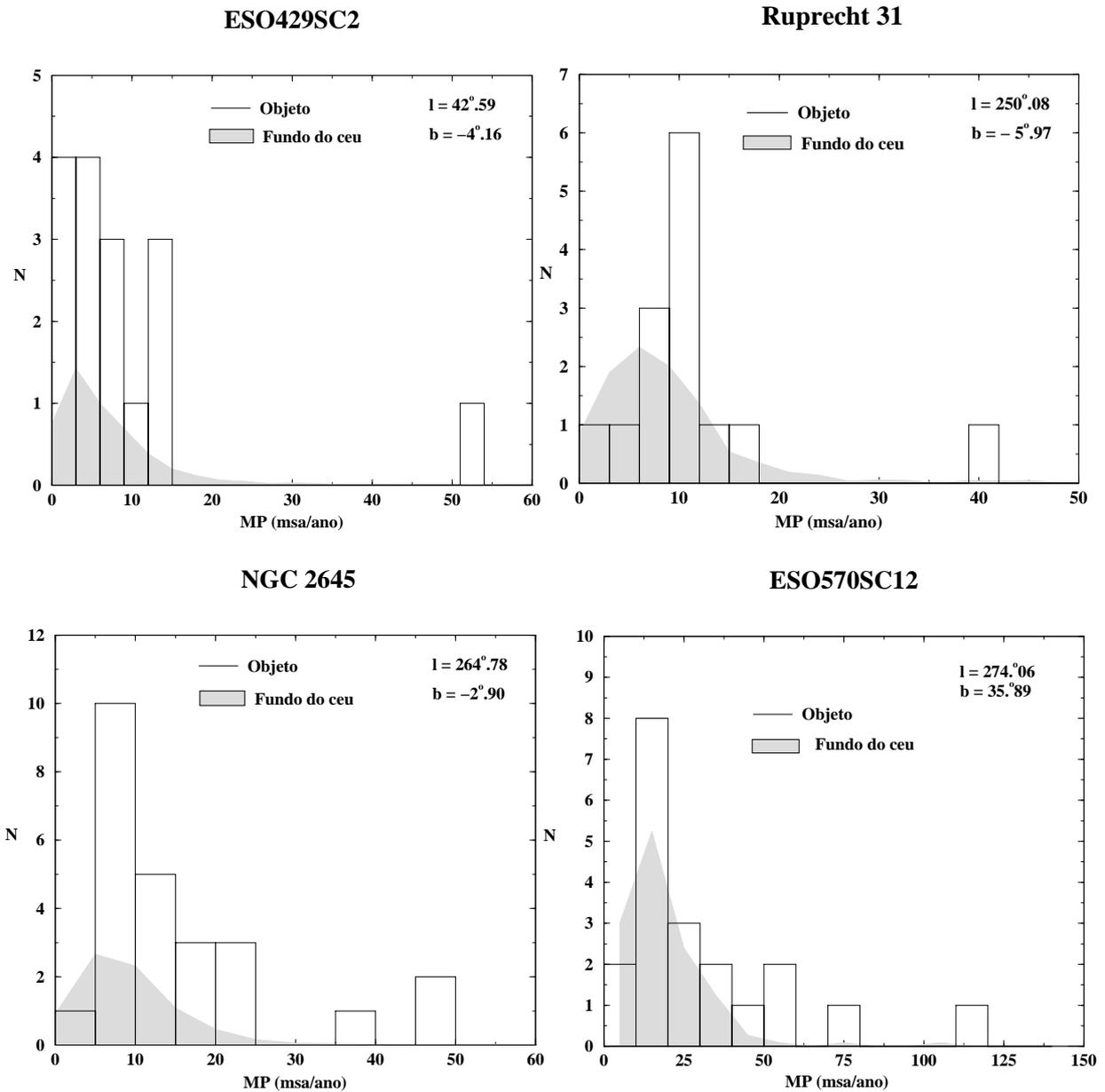


Figura 6.3: Os Histogramas mostram o número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. As distribuições apresentam o mesmo comportamento do indicado na figura 6.2. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.

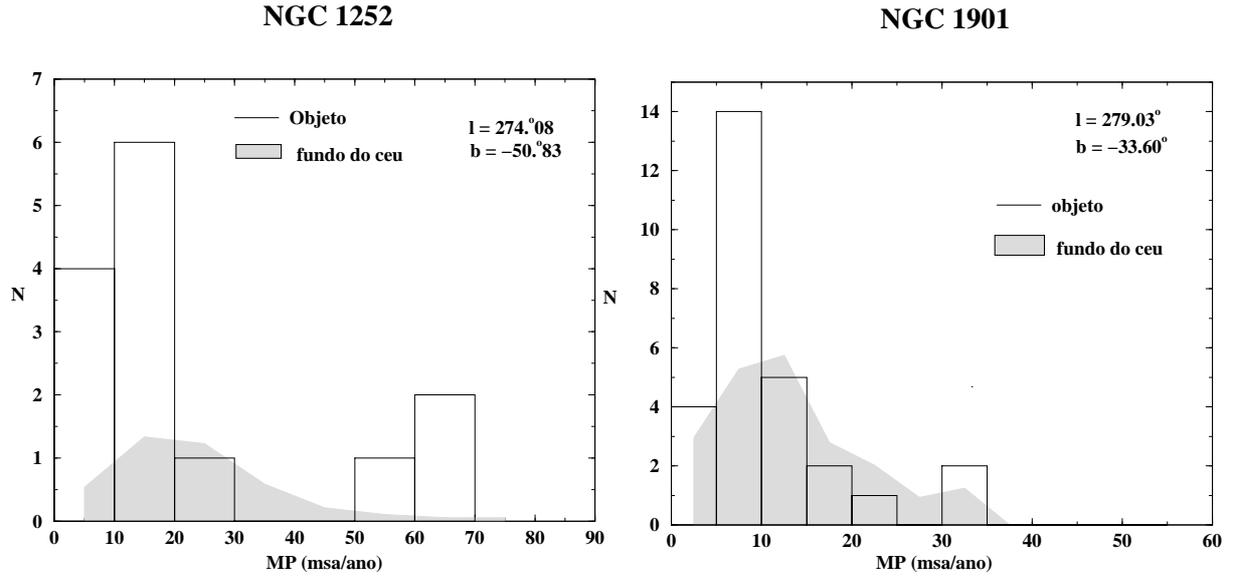


Figura 6.4: Os Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto (conforme legenda) e campo de comparação com grande estatística. As distribuições apresentam o mesmo comportamento do indicado na figura 6.2. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.

e Ordenkirchen & Soubiran (2002) [65] analisaram velocidades radiais e movimentos próprios, respectivamente, concluíram ser um sistema não-físico. A presente distribuição de movimentos próprios contribui no sentido de apontar NGC6994 como uma flutuação de estrelas do campo.

IC1023 (figura 6.7) possui  $I_a = 62\%$  mesmo sendo um dos objetos com maior presença de estrelas na região esperada para o campo no CMD. Para os movimentos próprios apresenta-se similar à distribuição do campo, porém o pico da distribuição não coincide com a distribuição do campo, além de indicar a presença de estrelas com valores maiores de movimentos próprios. É um candidato a remanescente indicado para realização de subtração estatística de campo, permitindo assim, um melhor estudo de suas propriedades.

Há várias maneiras de expressarmos, em diagramas, medidas de movimentos próprios e cada uma apresenta suas vantagens. Podem-se, por exemplo, construir (i) gráficos  $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$ , (ii) diagramas com vetores de movimentos próprios sobrepostos nas respectivas estrelas em mapas do céu  $\alpha \times \delta$ , que indicam a direção do movimento de cada estrela (figura.4, Pavani et al. 2001)[67] e, (iii) trabalhar com módulo de movimento próprio correspondendo à velocidade projetada no plano do céu.(figuras 6.1 a 6.6).

Na figura 6.8 são apresentados três painéis cujos dados estão na forma (i). Em cada painel são mostrados os objetos e dois campos de comparação próximos ao norte e ao sul. Os campos possuem mesmo ângulo sólido que os objetos. Para NGC3680, um conjunto de estrelas está coeso no centro da figura. A distribuição das estrelas nos campos de comparação difere ligeiramente do diagrama na direção de NGC3680. ESO425SC6 e IC1023 podem ser descritos da mesma maneira, apesar de menos concentrados. No caso de ESO425SC6 um dos campos mostra-se mais concentrado que o próprio objeto. Assim, dificilmente poderíamos afirmar conclusivamente a respeito da diferença entre os três objetos com base nos diagramas, principalmente quanto a condição de sistema

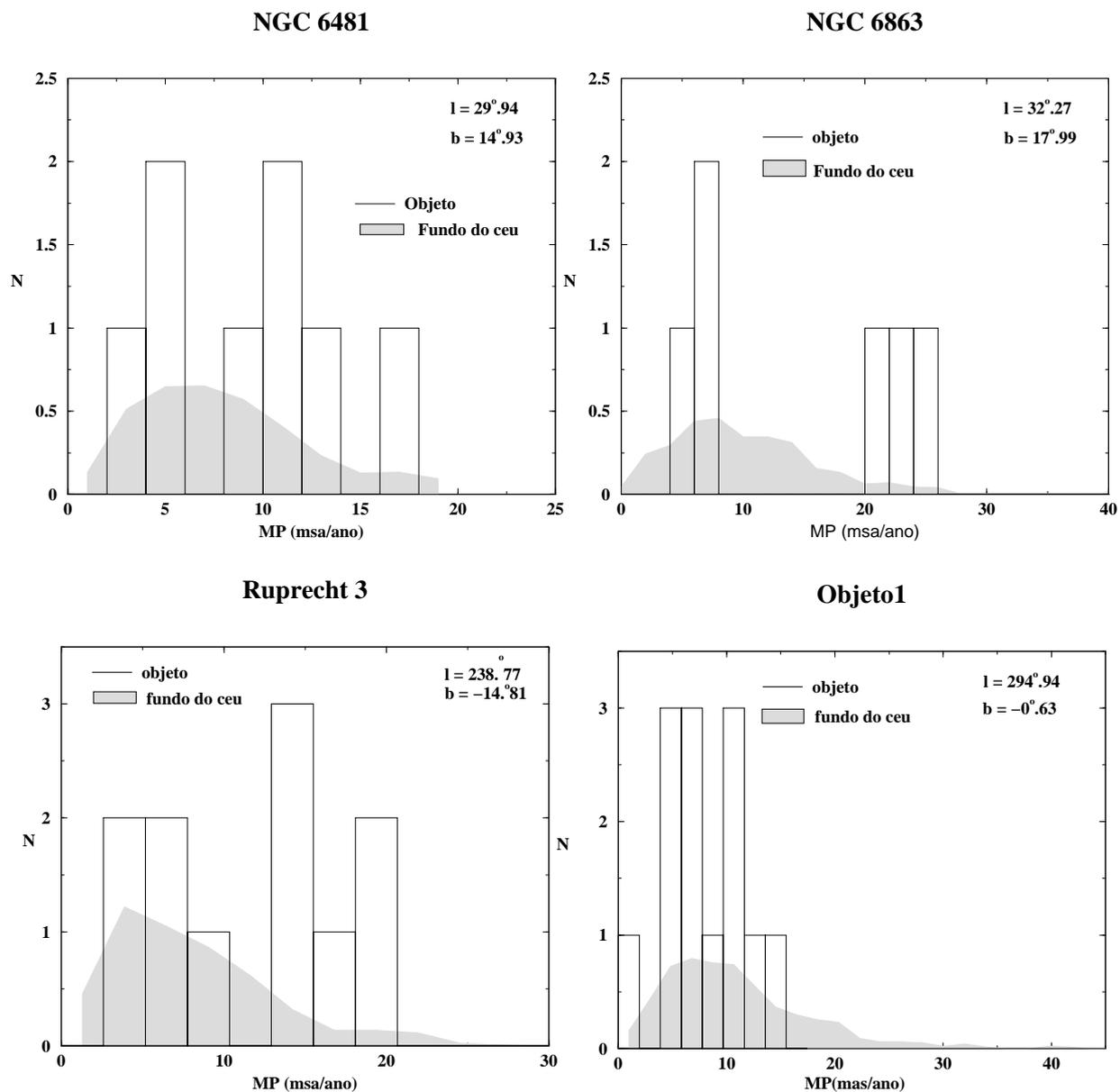


Figura 6.5: Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios sugere significativa presença de prováveis binárias em número igual ou superior ao número de estrelas sem companheira. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.

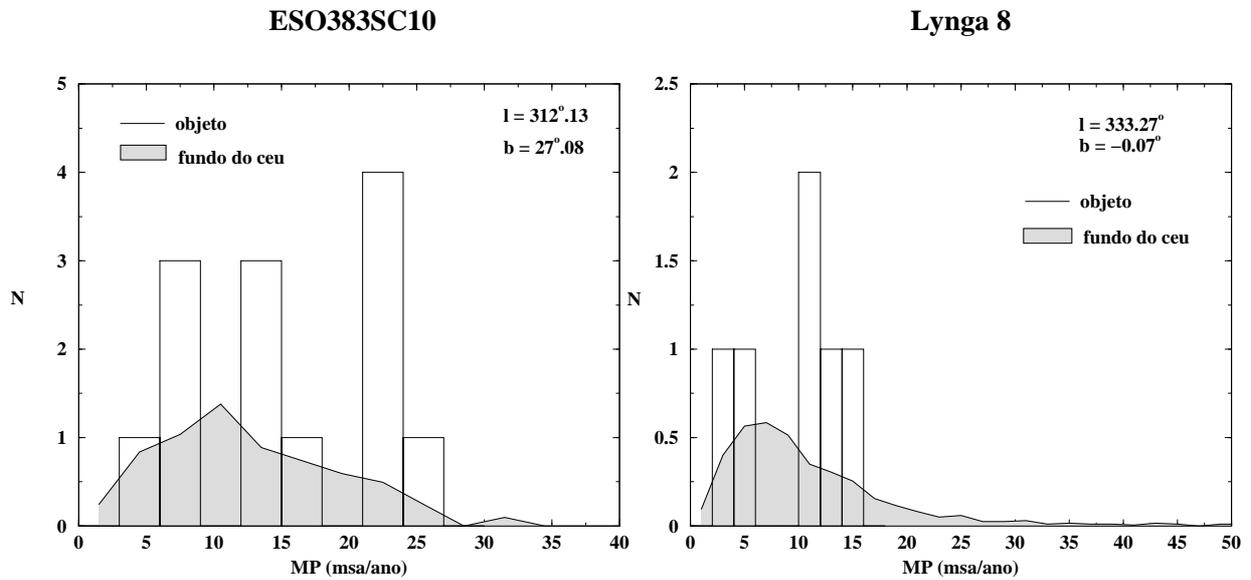


Figura 6.6: Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios apresenta mesmo o mesmo comportamento descrito na figura 6.5. São mostradas latitudes e longitudes Galácticas.

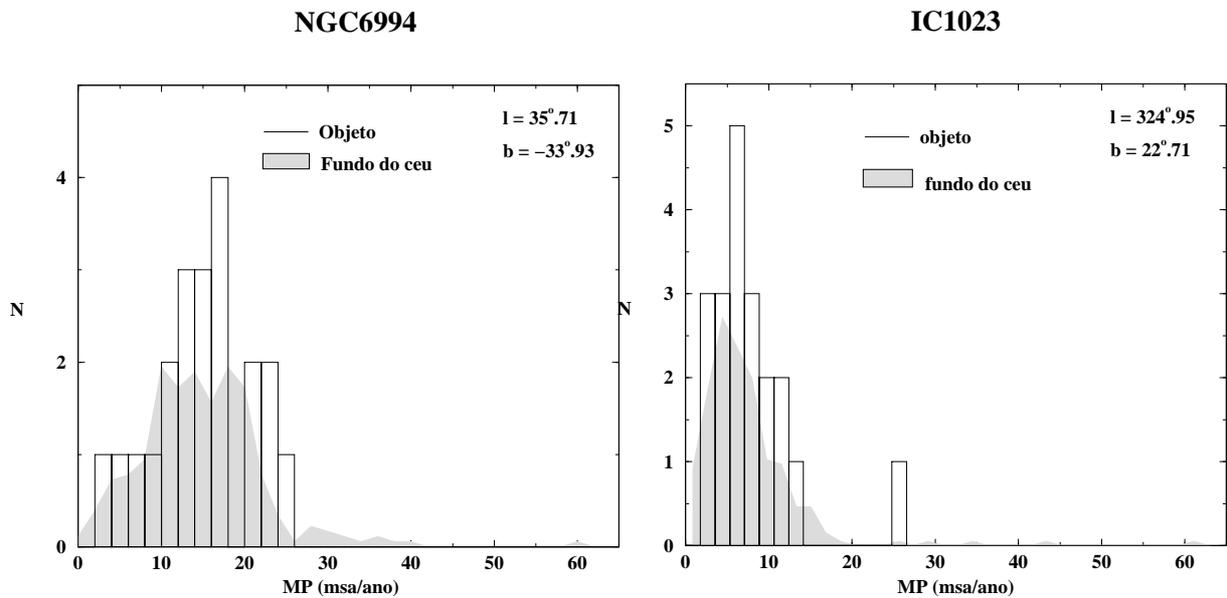


Figura 6.7: Histogramas do número de estrelas por intervalo de movimento próprio para cada objeto e campo de comparação com grande estatística, conforme legenda. A distribuição de movimentos próprios dos dois objetos apresenta semelhança com a distribuição dos respectivos campos. São mostradas latitude e longitude Galácticas.

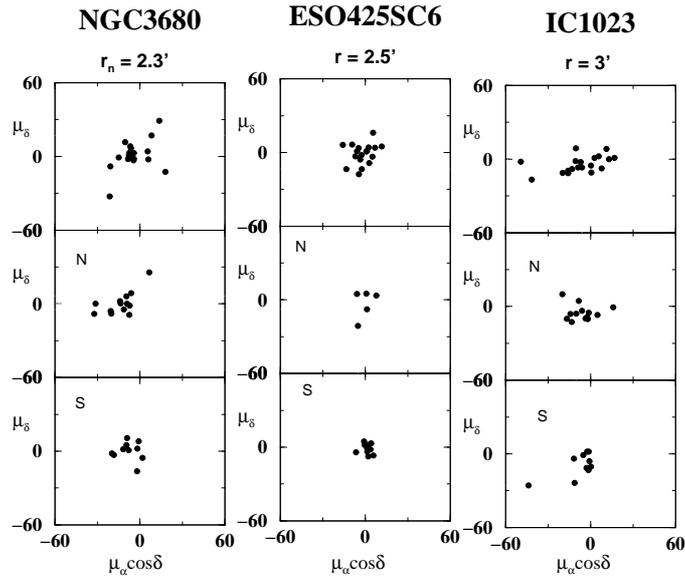


Figura 6.8: Diagrama da componente de movimento próprio  $\mu_\delta$  em função da componente  $\mu_\alpha \cos \delta$ . Painéis conforme a legenda. Os diagramas s permitem a comparação do objetos com campos de mesmo ângulo sólido.

físico ou não.

No estudo de remanescentes de aglomerados abertos, em especial, é necessário grande cuidado na determinação do tamanho das regiões de extração. Como discutido ao longo desta tese, estes objetos apresentam um reduzido número de estrelas e espera-se uma significativa fração de binárias. Estes dois fatores aliados podem resultar, para raios muito além do  $r_{lim}$  ou mesmo  $r_n$ , na perda de informação a respeito do objeto estudado. O binarismo pode contribuir para uma dispersão adicional de movimentos próprios nos gráficos.

Baseados nestes fatores optamos por diagramas envolvendo módulo de movimentos próprios. Apesar das informações de direção e sentido não serem consideradas, permitem uma comparação objetiva com as propriedades do campo. Esse último é tratado em grandes ângulos sólidos proporcionando significância estatística.

## 6.2 Caracterização de velocidades absolutas

A distribuição de movimentos próprios pode fornecer informações cinemáticas externas e internas dos objetos, mesmo estando afetada por movimentos sistemáticos, dispersões e assimetrias. Conforme visto até aqui, os objetos podem ser separados em dois grupos. No primeiro encontram-se aqueles cuja distribuição de movimentos próprios mostra-se semelhante à distribuição do aglomerado aberto NGC3680: NGC1663, ESO426SC6, ESO429SC2, ESO425SC15, ESO426SC26, Ruprech 31, NGC2645, ESO570SC12, NGC1251 e NGC1901. No segundo grupo estão os objetos cujas estrelas estão distribuídas sem máximos ao longo do histograma ou com desvios em direção a valores maiores de movimento próprio. São eles NGC6481, NGC6863, Ruprecht 3, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8.

Para podermos caracterizar estes desvios em termos de velocidades absolutas projetadas, os valores de

movimentos próprios em msa/ano foram transformados para km/s usando as distâncias obtidas no Capítulo 5, através da seguinte expressão

$$v(km/s) = MP(msa/ano) * d(pc) * C \quad (6.2)$$

onde a constante corresponde a  $C = 4.74 \times 10^{-3}$  é o resultado da multiplicação dos fatores  $C = (\frac{1}{1000} * \pi * \frac{1}{180} * \frac{1}{3600})(rad/msa) * 3.08 \times 10^{13}(km/pc) * (3.15) - 1 \times 10^{-7}(ano/seg)$ .

Em qualquer das unidades estamos lidando com velocidades absolutas projetadas no plano do céu, para diferenciarmos módulo de movimentos próprios em (msa/ano) e em (km/s), o último será referido por  $v_p$ .

A distribuição de  $v_p$  para os candidatos a remanescentes do primeiro grupo é mostrada nas figuras 6.9 a 6.11. Os máximos que alcançaram 15 (msa/ano) em movimentos próprios correspondem a  $v_p = 50$  km/s, com exceção de ESO426SC26, NGC2645 e NGC1252 cujo valor fica em torno de 65 km/s. A distribuição atinge  $v_p$  de até 100 km/s, com algumas estrelas chegando, em alguns casos, a 250 km/s.

São esperadas estrelas com  $v_p$  maiores que a da distribuição de estrelas sem companheira, que podem ser relacionadas com o movimento orbital de binárias não resolvidas (Bica & Bonatto 2005 [13]). Já as estrelas com  $v_p > 100km/s$  poderiam estar relacionadas com a ocorrência de outro tipo de binárias, como por exemplo, binárias de contato.

Nas figuras 6.12 e 6.13 vemos os diagramas dos candidatos a remanescentes que apresentaram distribuições que não se assemelham à do aglomerado aberto NGC3680. Os 6 objetos (NGC6481, NGC6863, Ruprecht 3, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8) mostram distribuições que poderíamos chamar de homogêneas, isto é, sem a presença de máximos para altas ou baixas velocidades. Este resultado sugere a possibilidade destes objetos estarem em um estágio evolutivo mais avançado, tendo perdido uma parte das estrelas sem companheira para o campo, elevando assim a fração de binárias.

Diante destes resultados preliminares faz-se necessário testar a hipótese de que as velocidades absolutas projetadas para os candidatos a remanescentes possam ser relacionadas com a ocorrência de estrelas sem companheira e estrelas binárias, assim como no caso de aglomerados abertos. Porém é necessário levarmos em conta que estamos lidando com um número reduzido de estrelas em cada objeto.

Para minimizarmos a baixa estatística ao testarmos as hipóteses acima descritas construímos o que denominamos de histogramas absolutos compostos cujas  $v_p$  poderiam ser relacionadas com a posição das estrelas em um CMD absoluto composto. Para tanto foi utilizado o seguinte método:

1) máximos locais em baixas velocidades projetadas nos histogramas foram adotados para correção à velocidade de repouso,

2) os objetos foram reunidos em dois grupos de acordo com a forma da distribuição de velocidades projetadas,

⇒ **Grupo A : NGC1663, ESO425SC6, ESO425SC15, ESO426SC26, Ruprecht 31, ESO570SC12, NGC1252 e NGC1901.**

⇒ **Grupo B: NGC6481, NGC6863, Ruprecht 3, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8.**

3) os campos de comparação foram corrigidos à velocidade de repouso de acordo com os máximos locais

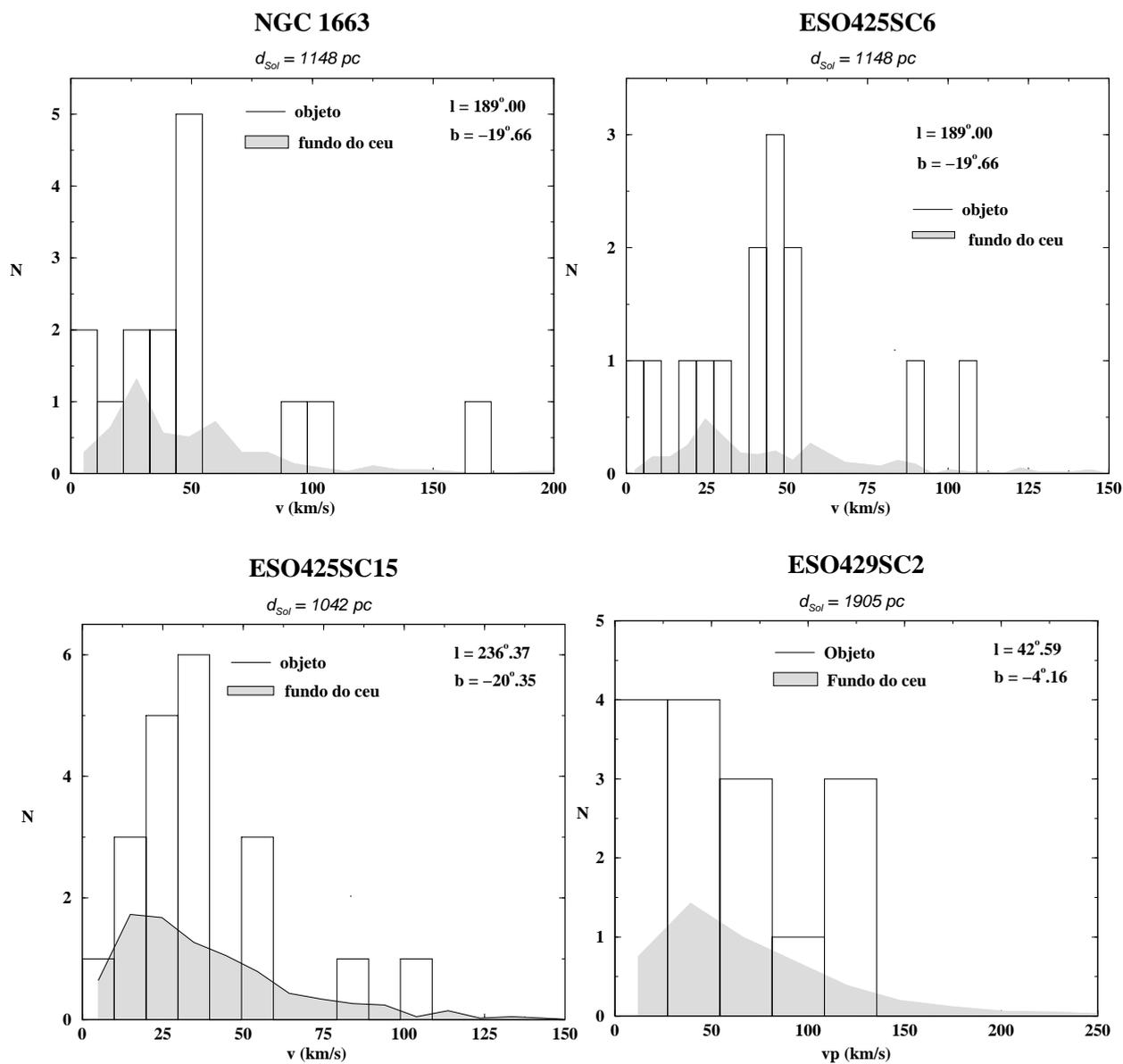


Figura 6.9: Idem à legenda da figura 6.2, porém em km/s.

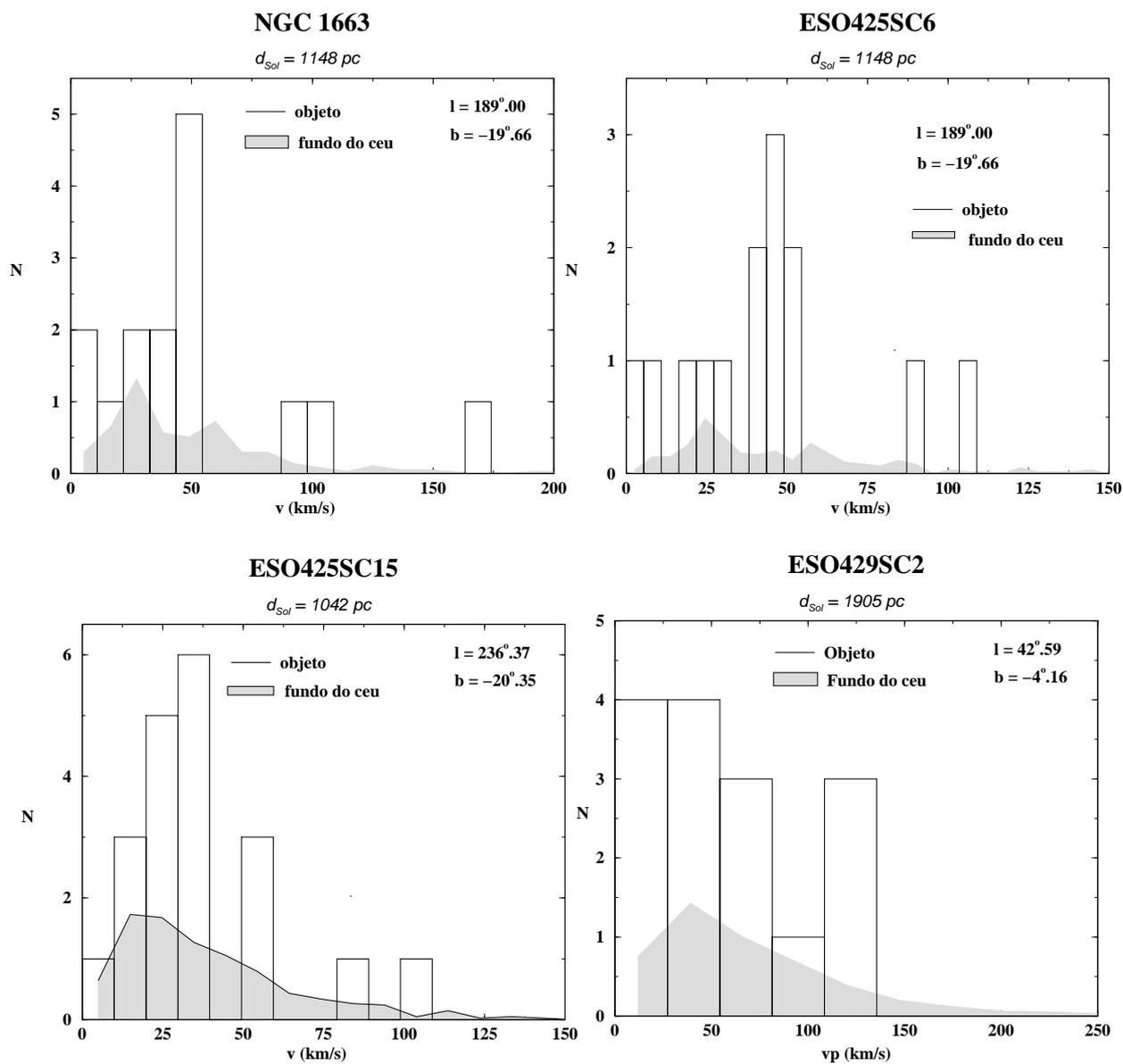


Figura 6.10: Idem à legenda da figura 6.3, porém em km/s.

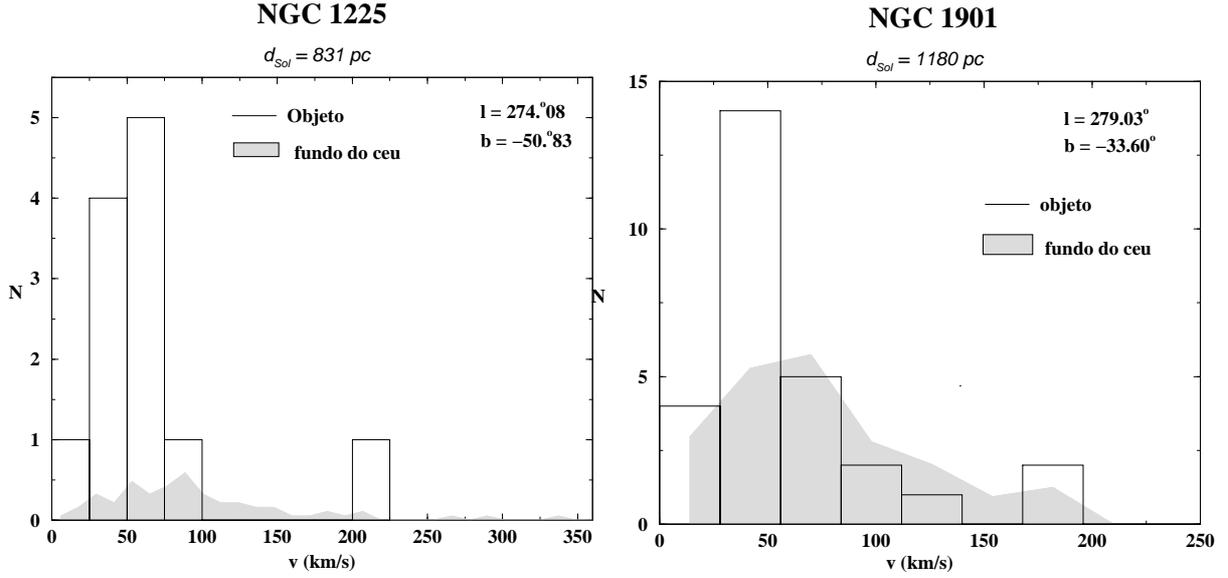


Figura 6.11: Idem à legenda da figura 6.4, porém em km/s.

utilizados na correção do seu respectivo objeto, sendo reunidos de acordo com os grupos A e B;

4) foi construído um histograma composto para cada grupo, contendo a distribuição relativa ao conjunto dos objetos do grupo e outra relativa ao conjunto dos respectivos campos de comparação, a exemplo dos histogramas individuais.

Em cada histograma composto a distribuição correspondente aos campos de comparação somados foi escalonada pela soma dos ângulos sólidos dos objetos através da razão

$$R = \frac{\sum_{j=1}^i \theta_{campos_i}}{\sum_{j=1}^i \theta_{objetos_i}} \quad (6.3)$$

onde  $\theta$  = ângulo sólido e  $i$  = número de objetos por grupo

Assim, foram obtidos os histogramas de velocidades absolutas projetadas compostos para os objetos dos grupos A e do B, incluindo os respectivos campos de comparação.

No grupo A excluímos NGC2645 e ESO429SC2, ambos com distribuição de velocidades projetadas semelhantes à do aglomerado aberto NGC3680. NGC2645, devido à sua baixa latitude Galáctica  $b = -2.9^\circ$ , possui grande contaminação por estrelas de campo gerando  $I_a < 60\%$ . Sua idade é 100 Myr. Já ESO429SC2 foi o candidato a remanescente mais jovem encontrado (40 Myr). Embora existam estudos na literatura indicando a possibilidade de dissolução de aglomerados abertos em escalas de tempo de  $\sim 50$  Myr optamos por não incluí-lo neste estudo final, assim como NGC2645.

CMD's absolutos compostos para aglomerados abertos têm sido construídos desde Sandage (1958) [72] e foram muito úteis para a modelagem da evolução estelar. No presente estudo utilizaremos CMD's absolutos compostos para compararmos as distribuições de velocidades absolutas projetadas com as posições das estrelas no CMD.

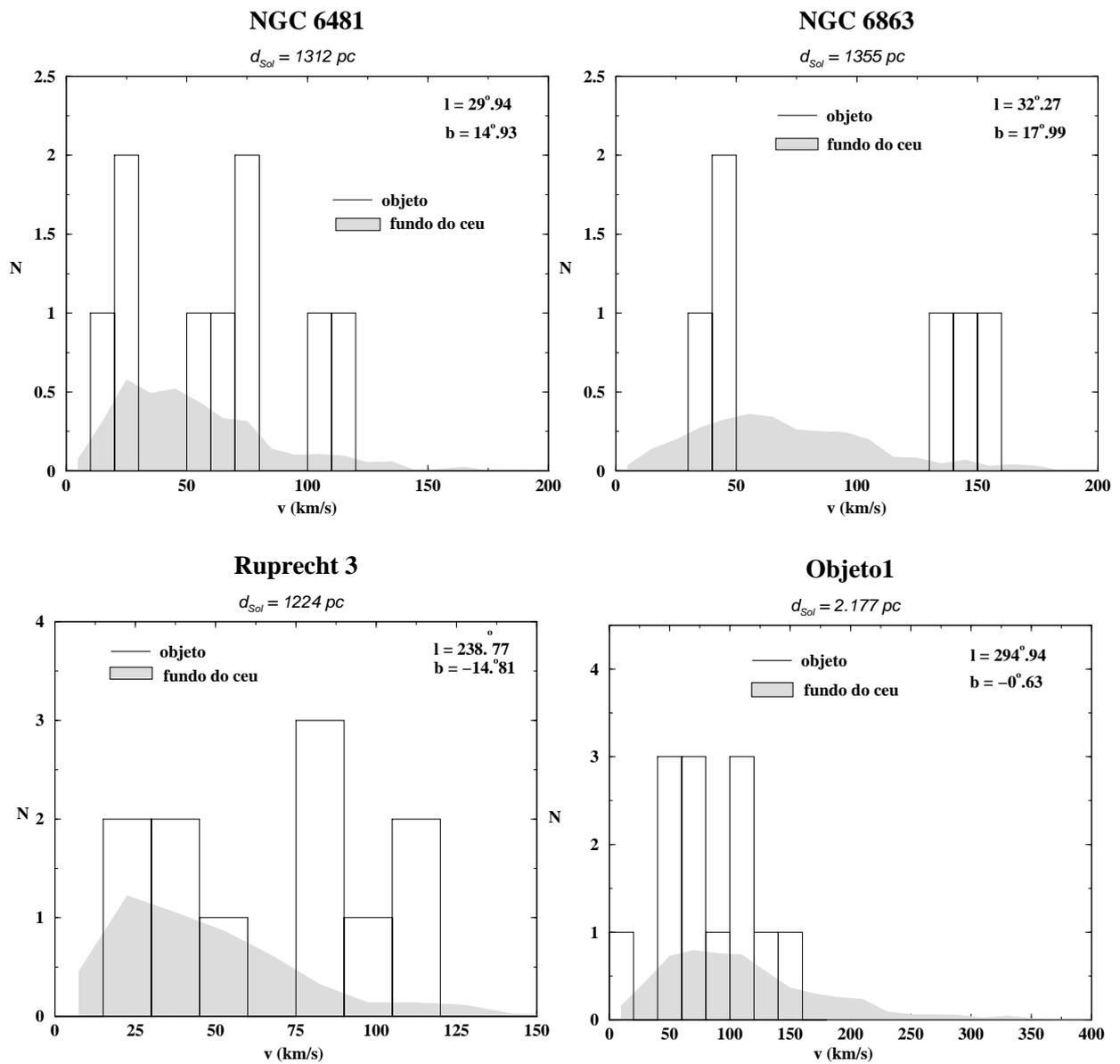


Figura 6.12: Idem à legenda da figura 6.5, porém em km/s.

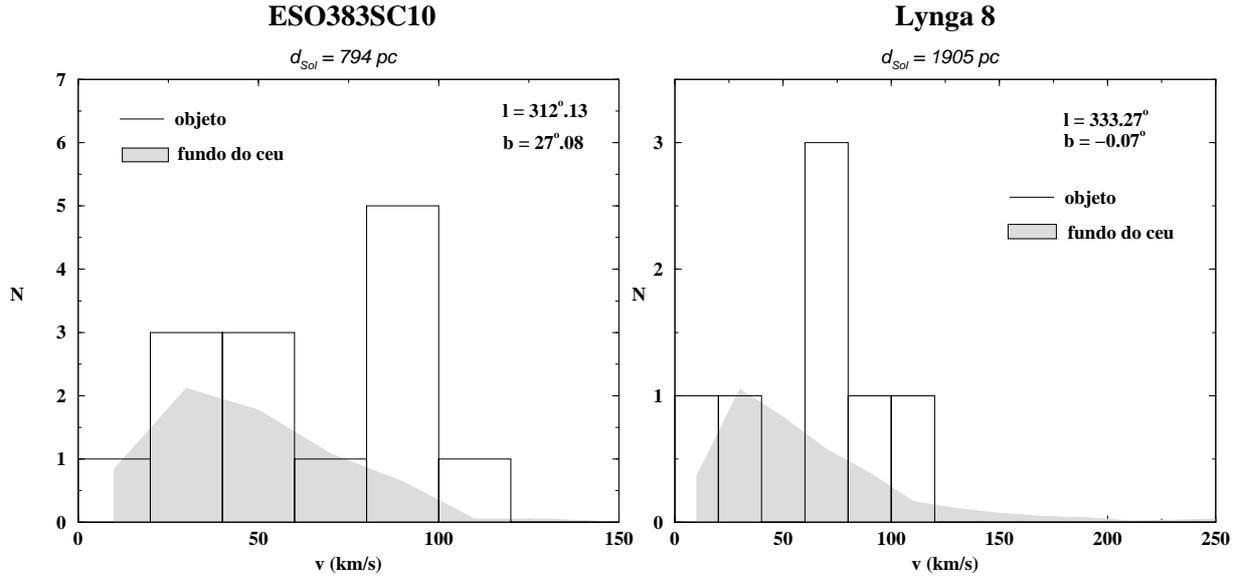


Figura 6.13: Idem à legenda figura 6.6, porém em km/s.

Os CMD's absolutos compostos dos candidatos a remanescentes foram construídos da seguinte forma:

- 1) para cada objeto as estrelas foram divididas em três faixas de velocidades absolutas projetadas, inspirados nas distribuições observadas em M67 (Bica e Bonatto 2005)[13].
- 2) de acordo com o objeto ao qual pertencem, as estrelas foram corrigidas por avermelhamento e módulo aparente;
- 3) os objetos tiveram as estrelas já corrigidas sobrepostas em um mesmo CMD de acordo com o grupo ao qual pertencem (A ou B) e diferenciados por velocidades absolutas projetadas.

Assim, foram obtidos dois CMD's absolutos compostos, um para o grupo A e outro para o B, estes podendo ser relacionados com o histograma de velocidades absolutas composto correspondente.

A figura 6.14 reproduz as figuras 5 e 6 de Bica e Bonatto (2005)[13]. No painel superior temos a distribuição de velocidades projetadas das estrelas de M67. De um lado temos o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidades absolutas projetadas em (km/s) para a região do núcleo e fora dele, além da contribuição do campo de comparação considerando o mesmo ângulo sólido de M67. Ainda neste painel, ao lado, temos uma função gaussiana ajustada à distribuição de velocidades projetadas para as mesmas regiões. Na figura para a região do núcleo vemos a presença de um máximo para baixas velocidades ( $v_p \approx 40 \text{ km/s}$ ) e outro para altas velocidades ( $v_p \approx 70 \text{ km/s}$ ), ocorrendo ainda excessos menores, o mais pronunciado centrado em  $v_p \approx 130 \text{ km/s}$ . Os autores relacionam o máximo em baixas velocidades aos movimentos randômicos das estrelas sem companheira sobrepostos ao movimento sistemático do aglomerado. Já o excesso para altas velocidades ( $v_p > 70 \text{ km/s}$ ) foi atribuído a mudanças significativas nas velocidades, produzidas pela presença de binárias não resolvidas no aglomerado. No painel inferior os autores identificaram e graficaram no CMD as estrelas com  $v_p > 70 \text{ km/s}$  para a região do núcleo de M67, onde é mostrado também uma isócrona de 3.2 Gyr. Estas estrelas, ao contrário

das demais, estão distribuídas ao longo da MS apresentando, porém, uma assimetria para o lado direito da isócrona. Elas ocupam o *locus* esperado para estrelas binárias, considerando as incertezas fotométricas. As demais estrelas estão preferencialmente ao longo da MS.

Os histogramas absolutos compostos e os CMD's absolutos compostos dos grupos A e B podem agora ser comparados aos resultados para M67, e NGC3680 que tem sido utilizado como aglomerado aberto de comparação.

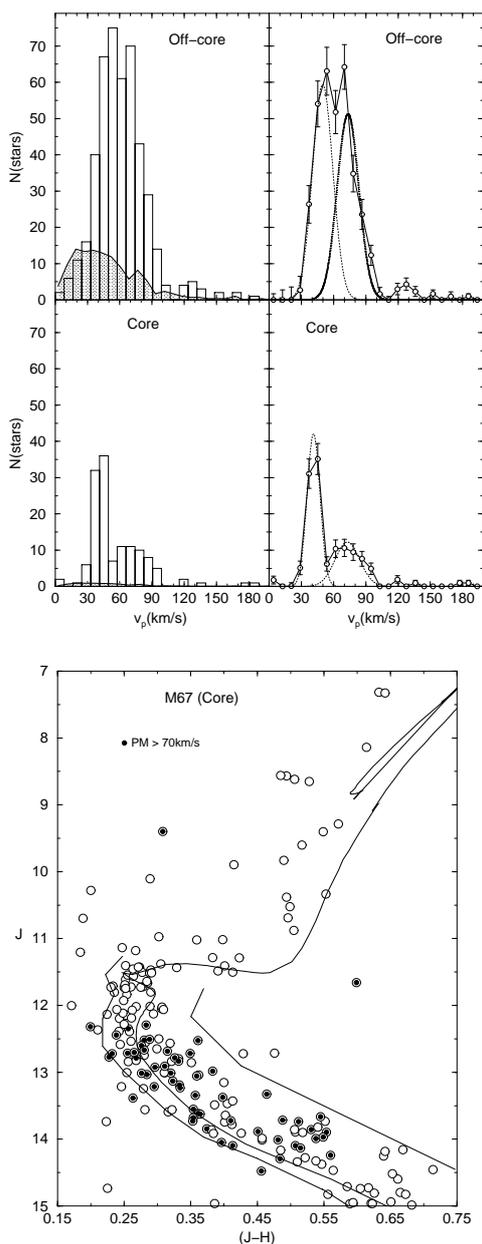


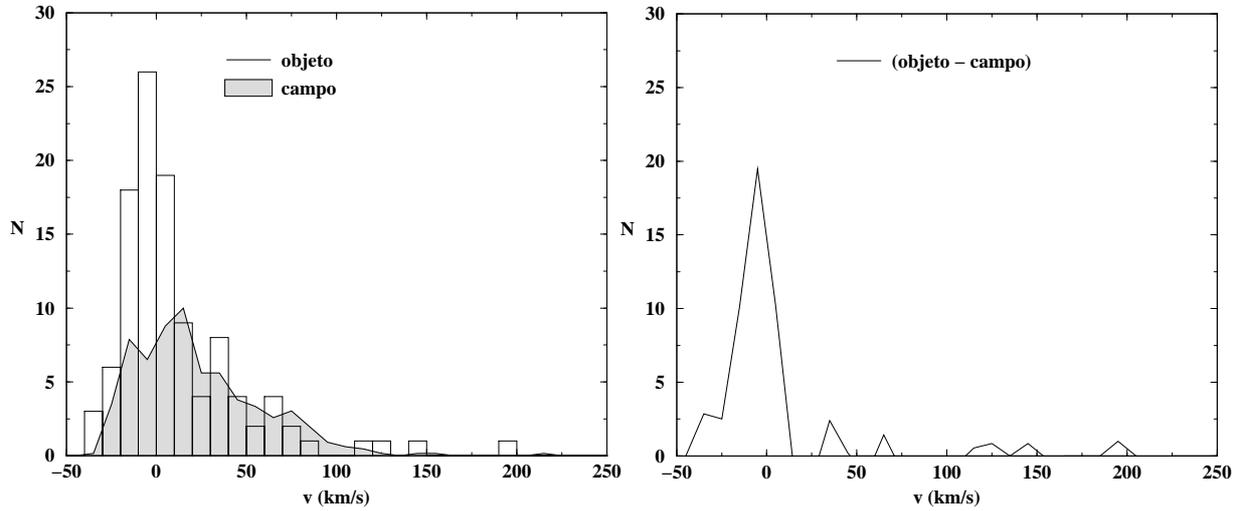
Figura 6.14: **Painel Superior:** distribuição de velocidades projetadas das estrelas de M67 para a região do núcleo e fora dele. À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde as áreas hachuradas indicam a contribuição do campo de comparação (mesmo ângulo sólido). À direita temos a distribuição de velocidades projetadas onde as linhas pontilhadas correspondem ao ajuste de uma função gaussiana. **Painel Inferior:** CMD para M67 mostrando o locus ocupado pelas estrelas com  $v_p > 70 \text{ km/s}$  (círculos fechados). São mostradas duas linhas sólidas que delimitam a região esperada para binárias não resolvidas considerando as incertezas fotométricas do 2MASS, além de uma isócrona de 3.2 Gyr.

Na figura 6.15 são apresentados três diagramas para NGC3680 a fim de ilustrar o método. Nos dois painéis superiores temos a distribuição de velocidades absolutas projetadas para a região central do aglomerado  $r = 7.5'$ . Essas distribuições foram levadas à velocidade de repouso, a qual foi obtida via o mínimo das estrelas individuais. À esquerda temos o histograma do número de estrelas por intervalo de  $v_p$  para as estrelas na direção do objeto e do campo de comparação de mesmo ângulo sólido (região cinza). À direita temos a curva correspondente à distribuição de velocidades tendo sido subtraída a contribuição do campo de comparação. No painel inferior temos o CMD do aglomerado cujas estrelas foram separadas em três faixas de velocidades absolutas projetadas de acordo com a distribuição no histograma. No máximo temos estrelas com  $v_p < 25$  km/s que devem corresponder às estrelas sem companheira, depois temos estrelas entre  $25 < v_p < 100$  km/s, devendo corresponder às binárias não resolvidas e estrelas com  $v_p > 100$  km/s que podem envolver também outros tipos de binárias. No painel inferior da mesma figura, as estrelas da primeira faixa em velocidades (consideradas estrelas individuais) são as que essencialmente delineiam a MS, o TO e a região de gigantes. As que corresponderiam a binárias não resolvidas povoam a MS, porém, essas e as de mais alta velocidade ( $v_p > 100$  km/s) estão levemente deslocadas em relação isócrona. Assim como para M67 (figura 6.14) vemos as estrelas de alta velocidades ( $v_p > 25$  km/s) estão distribuídas assimetricamente à direita da isócrona.

Na figura vemos os diagramas de velocidades projetadas do grupo A, com distribuições semelhantes à de NGC 3680. No painel superior à esquerda vemos o histograma de velocidades projetadas composto, com cada candidato à remanescente deslocado ao repouso. No painel à direita vemos a curva correspondente a subtração objetos/campos, esta apresenta-se semelhante ao observado em NGC3680 (figura 6.15): um mínimo maior e estrelas distribuídas em mais alta velocidade. No CMD absoluto composto foram inseridas duas isócronas representativas das idades (1 e 2.8 Gyr) para auxiliar. Conforme esperado ocorre a correspondência com o histograma de velocidades projetadas composto: temos a presença majoritária de estrelas com baixas velocidades definindo a MS em diferentes idades, e a presença de prováveis binárias em menor número. Estas últimas localizam-se preferencialmente à direita das isócronas.

A figura 6.17, apresenta os diagramas de velocidades projetadas do grupo B. No painel superior à esquerda vemos o histograma de velocidades projetadas composto, com cada candidato à remanescente deslocado ao repouso. No painel à direita a curva correspondendo à subtração objetos/campos indica três máximos. Um corresponde às estrelas de velocidades mais baixas, sendo menos pronunciado que o máximo para velocidades relacionadas à prováveis binárias não resolvidas. O terceiro máximo de intensidade menor que os dois anteriores alcançam velocidades maiores ( $\sim 80$  km/s). No CMD composto absoluto (painel inferior) foram inseridas duas isócronas uma para a idade mais jovem (831 Myr) e outra para a mais velha (3.5 Gyr). O CMD mostra que são as estrelas consideradas prováveis binárias não resolvidas que povoam preferencialmente à direita da MS para diferentes idades. Além disso, especialmente para a isócrona de 3.5 Gyr, vemos a presença acentuada das prováveis binárias. Essas estão substituindo a própria seqüência principal de estrelas sem companheira.

O Grupo B é composto por objetos morfológicamente compactos, com exceção de ESO383SC10. Os res-



### NGC3680

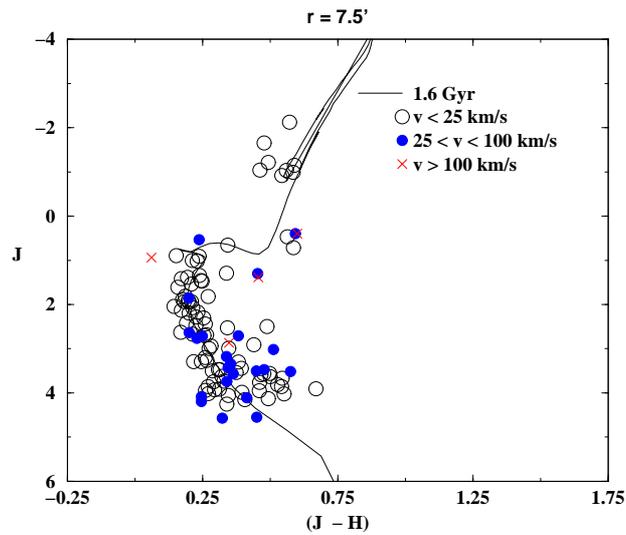


Figura 6.15: **Painel Superior:** distribuição de velocidades projetadas das estrelas de NGC3680 para a região central ( $r = 7.5'$ ). À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde a área hachurada corresponde à contribuição do campo de comparação. À direita é mostrado o resultado da subtração da contribuição do campo em relação à distribuição de velocidades projetadas das estrelas do aglomerado. **Painel Inferior:** CMD absoluto para NGC3680 mostrando o *locus* ocupado pelas estrelas em cada faixa de velocidades, conforme legenda no próprio painel. É mostrada uma isócrona de Padova de metalicidade solar. As estrelas de alta velocidade ( $v_p > 25$  km/s) localizam-se assimetricamente à direita da isócrona.

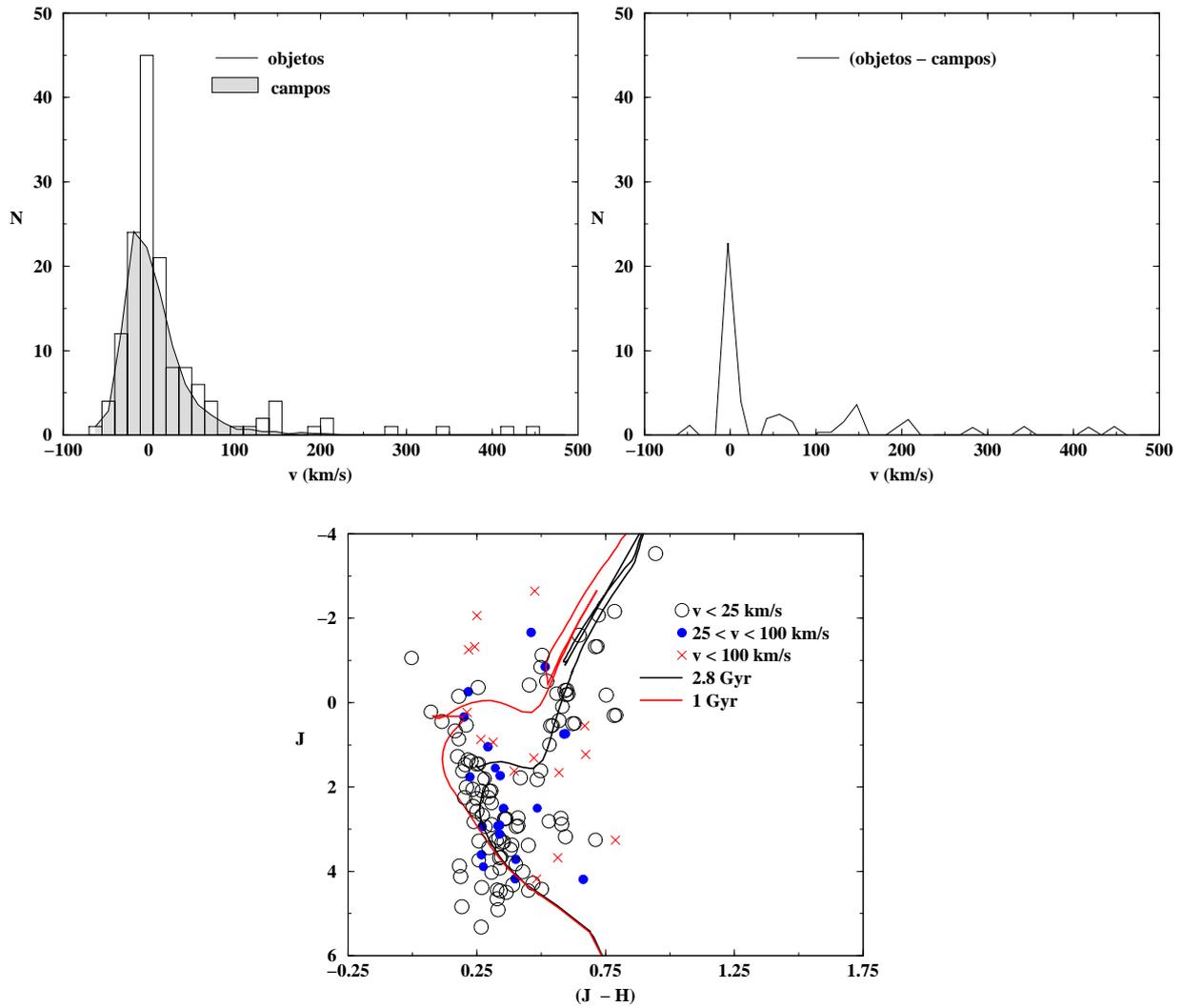


Figura 6.16: **Painel superior:** distribuição de velocidades projetadas das estrelas dos objetos que compõem grupo A. À esquerda é mostrado o histograma do número de estrelas por intervalo de velocidade projetada, onde a área hachurada corresponde à contribuição dos campos de comparação. à direita é mostrado o resultado da subtração da contribuição dos campos em relação à distribuição de velocidades projetadas das estrelas dos objetos do grupo A. **Painel Inferior:** CMD absoluto composto para os objetos que compõem o grupo A, mostrando o *locus* ocupado pelas estrelas em cada faixa de velocidades, conforme legenda no próprio painel. São mostradas duas isócronas de Padova de metalicidade solar. As estrelas de alta velocidade ( $v_p > 25$  km/s) localizam-se assimetricamente à direita da isócrona.

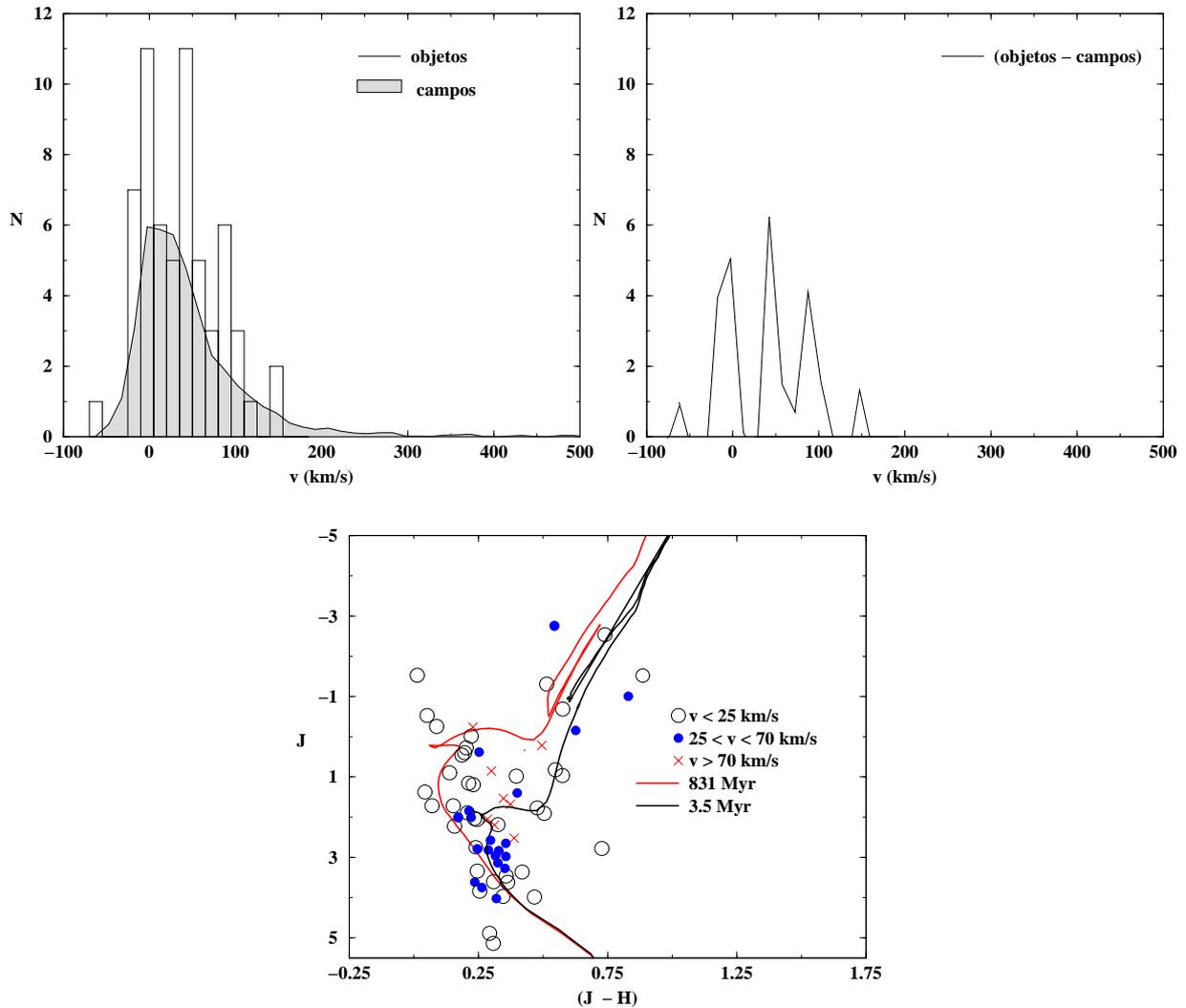


Figura 6.17: Mesma legenda da figura 6.16, porém para a distribuição de velocidades projetadas dos objetos que compõem o grupo B.

pectivos diagramas compostos sugerem a possível existência de um estágio evolutivo mais avançado do que o expresso nos diagramas para o Grupo A. Este último composto por objetos esparsos, com exceção de Ruprecht 31. Tal fato sugere a existência de estágios evolutivos distintos entre remanescentes, apontando para um cenário no qual objetos esparsos seriam menos evoluídos que compactos. Outra possibilidade seria evoluções separadas, com origem em aglomerados abertos com estruturas distintas.

Além de dar significância estatística, a construção de diagramas compostos permitiu, por meio do tratamento dos objetos em dois grupos distintos, com que vislumbrássemos dois cenários. O primeiro cenário, representado na figura 6.16, sugere que os candidatos a remanescentes que chegaram a esta etapa do estudo, na sua maioria esparsos, apresentam o comportamento cinemático semelhante ao esperado para aglomerados abertos evoluídos, tal como o visto para o núcleo de M67 e para o aglomerado aberto de idade intermediária NGC3680. O segundo cenário, representado pela figura 6.17, sugere que objetos ali envolvidos podem representar um estágio mais evoluído, caracterizado pela perda de boa parte das estrelas sem companheira para o campo, acarretando, com

isso, elevada fração de binárias. Tal fato está previsto em estudo teóricos. Em geral, não podemos afirmar de modo isolado, com base nos movimentos próprios, qual objeto configura-se em um remanescente de aglomerado aberto devido à incompletude dos dados, às incertezas observacionais e à baixa estatística. Porém as figuras 6.16 e 6.17 fornecem importantes evidências que sugerem a presença de remanescentes de aglomerados abertos em nossa amostra, podendo-se também inferir a partir daí sobre a provável evolução dinâmica.

## Capítulo 7

# Caracterização de um Remanescente

Ao longo deste estudo, foram aplicados 5 métodos para a análise de candidatos a remanescentes de aglomerados abertos: (i) análise das propriedades estruturais; (ii) teste para verificar a semelhança entre objeto e campo através de um método estatístico de comparação entre distribuições de estrelas no plano do diagrama cor-magnitude; (iii) análise de espectros; (iv) análise de diagramas cor-magnitude e obtenção de parâmetros; (v) análise de movimentos próprios e velocidades absolutas no plano do céu. O conjunto desses estudos fornece um panorama geral das propriedades dos objetos da amostra, além de fornecer critérios objetivos para o tratamento desse tipo de objeto.

Na tabela 7.1, estão reunidos os principais parâmetros obtidos a partir dos métodos desenvolvidos. Por coluna, temos: (1) nome; (2) classificação morfológica; (3) raio limite; (4) contraste densidade objeto/campo; (5) idade; (6) distância ao Sol; (7) diâmetro linear; (8), (9) e (10) coordenadas Galatocêntricas e, finalmente (11) raio Galatocêntrico.

As coordenadas heliocêntricas foram obtidas das equações para coordenadas heliocêntricas:

$$x_{\odot} = r_{plano} \cos \ell, \quad (7.1)$$

$$y_{\odot} = r_{plano} \sin \ell, \quad (7.2)$$

$$z_{\odot} = d_{\odot} \sin b, \quad (7.3)$$

$$r_{plano} = d_{\odot} \cos b, \quad (7.4)$$

resultando para coordenadas Galatocêntricas

Nome	M	$R_{lim}$	$\delta_c$	$\tau$	$d_\odot$	D	$X_{GC}$	$Y_{GC}$	$Z_{GC}$	$R_{GC}$
				Gyr	kpc	pc	kpc	kpc	kpc	kpc
NGC 6481	C	$1.5 \pm 0.5$	2.1	$3.5 \pm 0.50$	$1.31 \pm 0.06$	1.14	-6.86	0.58	0.30	6.89
M 73, NGC 6994	C	$4.5 \pm 0.5$	5.7	$1.0 \pm 0.50$	$1.20 \pm 0.11$	3.14	-7.16	0.49	-0.70	7.21
NGC 6863	C	$1.5 \pm 0.5$	2.5	$3.5 \pm 0.50$	$1.40 \pm 0.06$	1.22	-6.82	0.65	-0.39	6.86
NGC1663	E	$5.0 \pm 0.5$	2.7	$2.8 \pm 0.50$	$1.15 \pm 0.11$	3.34	-9.06	0.24	-0.35	9.07
ESO425SC6	E	$3.0 \pm 0.5$	4.7	$2.0 \pm 0.50$	$1.15 \pm 0.05$	2.08	-8.92	-0.57	-0.39	8.95
ESO425SC15	E	$3.5 \pm 0.5$	3.0	$0.9 \pm 0.30$	$1.0 \pm 0.05$	2.03	-8.8	-0.51	-0.31	8.82
Ruprecht 3	C	$2.0 \pm 0.5$	4.1	$1.0 \pm 0.50$	$1.24 \pm 0.06$	1.80	-8.98	-0.69	-0.29	9.01
ESO426SC26	E	$3 \pm 0.5$	2.7	$1.5 \pm 0.50$	$1.53 \pm 0.07$	2.70	-8.86	-0.86	-0.39	8.91
ESO429SC2	E	$4.5 \pm 0.5$	1.7	$0.04 \pm 0.05$	$1.9 \pm 0.17$	5.00	-9.48	-1.17	-0.12	9.55
Ruprecht 31	C	$2.0 \pm 0.5$	1.5	$1.0 \pm 0.50$	$0.96 \pm 0.09$	1.70	-8.67	-0.68	-0.08	8.69
Ruprecht 156	C	$1 \pm 0.5$	1.4	...	...	...	...	...	...	...
NGC 2645, Pis 6	C	$9.5 \pm 0.5$	1.7	$0.1 \pm 0.05$	$1.24 \pm 0.05$	6.85	-8.65	-1.05	-0.05	8.71
Waterloo 6	C	$1 \pm 0.5$	1.2	...	...	...	...	...	...	...
ESO211SC8	C	$2 \pm 0.5$	2.5	...	...	...	...	...	...	...
ESO570SC12	E	$3 \pm 0.5$	2.5	$0.8 \pm 0.30$	$0.7 \pm 0.03$	1.22	-8.23	-0.54	0.37	8.25
NGC 1252	E	$6 \pm 0.5$	2.8	$2.8 \pm 0.30$	$0.8 \pm 0.04$	2.80	-8.22	-0.51	-0.57	8.25
NGC 1901	E	$4 \pm 0.5$	5.2	$0.6 \pm 0.10$	$1.18 \pm 0.11$	2.75	-8.32	-0.96	-0.59	8.39
Objeto 1	C	$2 \pm 0.5$	1.7	$0.84 \pm 0.3$	$2.18 \pm 0.2$	2.54	-8.17	-2.17	-0.02	8.45
ESO132SC14	C	$2 \pm 0.5$	1.7	...	...	...	...	...	...	...
ESO383SC10	E	$3 \pm 0.5$	3.9	$2.0 \pm 0.5$	$0.8 \pm 0.04$	1.40	-7.86	-0.71	0.33	7.90
IC1023	E	$4 \pm 0.5$	1.9	$2.0 \pm 0.5$	$1.24 \pm 0.05$	2.90	-7.55	-1.07	0.43	7.64
Lynga 8	C	$1.5 \pm 0.5$	1.6	$2.0 \pm 0.5$	$1.2^{+0.24}_{-0.10}$	1.04	-7.40	-1.04	-0.0013	7.47
ESO389**5	C	$2 \pm 0.5$	1.5	...	...	...	...	...	...	...
NGC 3680	E	$22 \pm 1$	3.5	$1.6 \pm 0.5$	$1.0 \pm 0.09$	12.80	-8.20	-0.94	0.26	8.26

Tabela 7.1: Principais parâmetros obtidos para os 23 candidatos a remanescentes e o aglomerado aberto NGC3680.

$$X = x_\odot - d_{GC}, \quad (7.5)$$

$$Y_{GC} = y_\odot, \quad (7.6)$$

$$Z = z_\odot, \quad (7.7)$$

Para a distância do Sol ao centro da Galáxia (Galactocêntrica)  $d_{GC}$ , adotou-se 8 kpc (Reid 1993)[71].

Conforme a tabela 7.1, dos 23 objetos da amostra 18 forneceram indicação de idades e coordenadas Galatocêntricas. Os objetos estão distribuídos em 5 faixas de idades.

1<sup>a</sup> Faixa -  $\tau \leq 0.1$  Gyr: inclui 2 objetos;

2<sup>a</sup> Faixa -  $0.1 < \tau < 1$  Gyr: 4;

3<sup>a</sup> Faixa -  $1 \leq \tau < 2$  Gyr: 4;

4<sup>a</sup> Faixa -  $2 \leq \tau < 3$  Gyr: 6;

5<sup>a</sup> Faixa -  $\tau \geq 3.5$  Gyr: 2.

Segundo os resultados, os objetos na primeira faixa de idades estão imersos no disco fino ( $Z_{GC} < 0.35$  kpc),

onde espera-se que os efeitos do campo Galáctico contribuam significativamente para a dissolução. Os demais objetos encontram-se no disco espesso ou atingindo regiões mais externas do mesmo, com exceção de Objeto 1, Ruprecht 31 e Lynga 8, na segunda, terceira e quarta faixa de idades respectivamente, todos apresentando pequenos valores de  $Z_{GC}$ .

Em geral, sem fazermos considerações a respeito da massa, a tendência é que aglomerados abertos nas regiões internas do disco tenham um tempo de vida menor, enquanto aqueles localizados nas regiões mais externas tenham uma sobrevivência maior. Assim, verificamos que há coerência entre os valores em faixas em idades e as posições na Galáxia, levando-se em conta as incertezas envolvidas.

No estudo de candidatos a remanescentes, a diferenciação entre sistemas físicos e flutuações de campo é fundamental. Porém, os possíveis remanescentes são pouco estudados, não existindo dados sistemáticos disponíveis. Tal fato exige a utilização de várias ferramentas de análise que resultem complementares e objetivas na caracterização das propriedades dos objetos.

O significativo contraste de densidade em número de estrelas na direção dos candidatos a remanescente obtido quando comparado à contagem de estrelas na direção do campo está associado a um perfil de densidade radial de estrelas característico. A classificação morfológica entre compactos e esparsos está igualmente relacionada a esse perfil. Os Objetos classificados como compactos  $r_{lim} \leq 2.5'$ , com aparência em placas do céu correspondendo a um pequeno número de estrelas centralmente concentradas - apresentam perfil caracterizado por um único máximo para a região central que decresce até confundir-se com a contribuição do campo. Já os esparsos  $r \geq 3'$ , com um número maior de estrelas distribuídas de maneira dispersa - apresentam um perfil de densidade que decresce suavemente até flutuar em torno da contribuição do campo. Em alguns casos, foi possível um ajuste aproximado por um perfil de King (1966) [52]. Entre os objetos da amostra, houve 2 compactos com perfil característico de esparsos (Ruprecht 156 e NGC2645) e um esparsos com perfil característico de compacto (ESO570SC12). Através do ajuste pelo perfil de King, obtêm-se para aglomerados abertos o raio de núcleo ( $r_n$ ) e o raio limite ( $r_{lim}$ ).

As propriedades estruturais - que quantificam e permitem comparar o número integrado de estrelas na direção do objeto com o número na direção do campo - e a análise do diagrama cor-magnitude - de onde resultam os parâmetros de avermelhamento e módulo de distância - configuram-se como métodos fundamentais na indicação de um objeto como possível sistema físico. Um perfil radial de estrelas semelhante ao do campo, aliado a não distribuição das estrelas no diagrama cor-magnitude ao longo das seqüências evolutivas esperadas (seqüência principal, *turn-off*, região de gigantes, etc.) sugerem fortemente a condição de sistema não-físico.

O teste para verificar a semelhança entre objeto e campo através de um método estatístico de comparação entre distribuições de estrelas no diagrama cor-magnitude fornece importantes resultados. Mesmo não sendo possível afirmar através dele se um sistema é físico. O método é capaz de indicar se um objeto representa uma distribuição, em cor e magnitude, esperada para o campo na vizinhança. Para os objetos estudados, o teste realizado para campos próximos de grande ângulo sólido resultou em 70 %, com probabilidade  $p < 1\%$  de ser

representativo do campo .

O espectro de um sistema estelar como abordado aqui fornece, além de tipos espectrais, idades e avermelhamentos. Mas não deve ser utilizado, todavia, como único método. Isso porque é possível que o espectro de uma combinação aleatória de poucas estrelas brilhantes assemelhe-se ao espectro de templates de aglomerados. Por outro lado, os parâmetros fornecidos pelo estudo de espectros podem ser comparados com aqueles obtidos da análise do diagrama cor-magnitude, configurando-se em importante método complementar.

Dados de movimentos próprios, considerando-se os dados disponibilizados até o momento para os objetos, mostram-se importantes indicadores da cinemática interna dos objetos estudados, sugerindo a diferenciação dos mesmos em distintos estágios evolutivos. De fato, a diferenciação entre componentes para estrelas sem companheira e estrelas binárias e o correspondente mapeamento no diagrama cor-magnitude possibilitam inferir sobre estágios evolutivos para remanescentes. Tal procedimento pode, por sua vez, representar o contraponto observacional do que é apontado em estudos teóricos.

## 7.1 Balanço individual dos objetos

Apresentamos na tabela 7.1 um balanço individual dos 23 objetos considerando os resultados obtidos. Conforme o método utilizado, os sinais [ + , - e  $\pm$ ] definem o desempenho obtido pelo objeto. Caso não tenham sido disponibilizados dados suficientes para a análise, será utilizada a notação [...]. Desse modo, de acordo com o método, os sinais correspondem:

- (i) ao perfil de densidade radial: ( + ) perfil acima da contribuição do campo; ( $\pm$ ) perfil acima da contribuição do campo para  $J < 13$ ; ( - ), semelhante à da contribuição do campo.
- (ii) à probabilidade do objeto ser representativo do campo: ( + )  $p < 1\%$ ; ( $\pm$ )  $1 < p < 10\%$ ; ( - )  $p > 10\%$ .
- (iii) aos espectros: ( + ) parâmetros consistentes com CMD; ( $\pm$ ) 1 parâmetro inconsistente; ( - ) inconsistente.
- (iv) ao índice de ajuste no CMD: ( + )  $I_a > 60\%$  e distribuição homogênea no CMD; ( $\pm$ )  $50 < I_a < 60\%$ , ou  $I_a > 60\%$  com distribuição não homogênea no CMD; ( - )  $I_a < 50\%$  ou não foi possível o ajuste.
- (v) ao módulo de movimentos próprios: ( + ) incluído nos grupos A ou B; ( $\pm$ ) não incluído em nenhum dos grupos; ( - ) distribuição de movimentos próprios do objeto semelhante à do campo ou dados não úteis para análise.

A tabela apresenta por colunas: (1) nome do objeto; (2) classificação morfológica, (3) propriedades estruturais; (4) estatística de comparação; (5) análise dos CMD's, (6) análise dos movimentos próprios.

Segundo a tabela 7.2, dos 23 candidatos a remanescentes 16 foram bem qualificados de acordo com os seguintes métodos: perfil de densidade radial de estrelas acima da contribuição do campo; probabilidade de ser representativo do campo menor que 10%; parâmetros obtidos a partir do espectro, quando disponíveis, coincidentes com os obtidos do CMD, índice de ajuste  $I_a > 50\%$  e distribuição de movimentos próprios não coincidente com a do campo. Assim, podemos concluir que os métodos empregados foram capazes de caracterizar

Nome	M	Perfil	$CMD_{obj \times campo}$	Esp.	CMD	MP
NGC 6481	C	+	+	+	+	+
M 73, NGC 6994	C	+	+	...	±	-
NGC 6863	C	+	±	+	+	+
NGC1663	E	+	±	...	+	+
ESO425SC6	E	+	+	...	+	+
ESO425SC15	E	+	+	...	+	+
Ruprecht 3	C	+	+	+	+	+
ESO426SC26	E	+	±	...	+	+
ESO429SC2	E	+	±	...	+	±
Ruprecht 31	C	+	±	-	+	+
Ruprecht 156	C	+ <sup>a</sup>	+	+	...	...
NGC 2645, Pis 6	C	+	+	...	±	±
Waterloo 6	C	-	-	...	-	-
ESO211SC8	C	+	+	+	-	-
ESO570SC12	E	+	+	...	±	+
NGC 1252	E	+	+	...	+	+
NGC 1901	E	+	+	...	+	+
Objeto 1	C	±	+	+	±	+
ESO132SC14	C	±	+	+	-	-
ESO383SC10	E	+	+	+	+	+
IC1023	E	+	+	...	+	-
Lynga 8	C	±	+	+	+	+
ESO389**5	C	-	+	+	-	-

Tabela 7.2: Desempenho dos objetos conforme o método utilizado. <sup>a</sup>apresentou perfil característico de objeto esperso, porém possui  $d < 1'$

objetivamente os objetos da amostra.

Os objetos NGC1252, NGC1901, Ruprecht 3, NGC1663 e NGC6994 já haviam sido analisados anteriormente quanto à sua condição de remanescentes. NGC1252 e NGC1901 foram estudados no ótico durante o mestrado (Pavani 2001)[66], com resultados apresentados em Pavani et al. (2001)[67]. O primeiro foi considerado como um provável remanescente de aglomerado aberto e o segundo como um sistema físico compatível ou mais evoluído que as Hyades. A disponibilização de dados fotométricos no infravermelho, além de dados cinemáticos em maior número, leva à conclusão de que ambos objetos configuram-se como remanescentes de aglomerado aberto. Ruprecht 3, estudado em Pavani et al. (2003)[68], também é aqui confirmado como remanescente. NGC1663, apresentado como remanescente por Baume et al. (2003)[7], também assim se confirma. Finalmente, NGC6994 foi apontado como um remanescente por Bassino et al (2000)[6]. No entanto, Carraro (2000)[19] e Ordenkirchen & Soubiran (2002)[65] apresentaram evidências que indicam tratar-se de uma flutuação de estrelas de campo. Os estudos ora desenvolvidos concordam, por sua vez, para a condição de flutuação de campo para NGC6994.

Em relação a ESO425SC6, ESO425SC15, ESO426SC26, Ruprecht 31, ESO570SC12, os estudos indicam a forte condição de candidatas a remanescentes, assim como quanto a NGC6481, NGC6863, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8. Estes últimos, em conjunto, apresentam como característica marcante a possível existência de um estágio evolutivo mais avançado (figura 6.17), sugerindo a distinção evolutiva entre remanescentes. Nesse cenário, portanto, objetos esparsos seriam menos evoluídos do que os compactos.

Os objetos NGC2645, ESO49SC2 e IC1023 apresentaram resultados promissores. O primeiro é classificado morfológicamente como compacto com perfil semelhante ao de um aglomerado aberto. Localizado à baixa latitude e imerso no disco Galáctico fino, apresenta grande contaminação por estrelas do campo em sua direção. Conseqüentemente, possui índice de ajuste das estrelas isócrona abaixo de 60%, para uma extração menor que seu raio limite. Por outro lado, apresenta estrelas ajustadas à região do *turn-off* de 100 Myr, e distribuição de movimentos próprios distinta da distribuição do campo. Tais características o habilitam para um estudo mais detalhado, incluindo, por exemplo, subtração estatística de estrelas de campo. Verificando, assim, sua natureza física, que poderia corresponder a um estágio anterior a remanescente. Os métodos forneceram boa qualificação para ESO429SC2, mas como foi ajustado por uma idade jovem (40 Myr) deve ser igualmente estudado em detalhe para que se possa verificar sua condição de sistema físico e a que fase da evolução corresponderia. Esses dois objetos constituiriam a evidência de que a dissolução pode ocorrer em idades menores. Já o candidato a remanescente IC1023 apresentou qualificação positiva para o perfil, teste estatístico e ajuste de isócrona. Porém, seus movimentos próprios não foram conclusivos, impossibilitando sua caracterização como provável sistema físico ou flutuação de campo.

Ruprecht 156 possui qualificação positiva para análise de perfil, teste estatístico e espectro. O diagrama cor-magnitude sugere a possibilidade do objeto estar localizado a grande distância, com dados fotométricos não sendo suficientemente profundos. Os dados cinemáticos, por fim, são incompletos para  $J \leq 14.5$ , o que não permite a conclusão da análise desse objeto.

ESO211SC8 e ESO132SC14 apresentaram qualificação negativa em dois dos cinco métodos. Não apresentaram característica de remanescente no que diz respeito à análise de CMD e não possuem dados suficientes para movimentos próprios. Entretanto, obtiveram qualificação positiva para propriedades estruturais, teste estatístico e espectros. Assim, não foi possível diferenciá-los entre flutuações de campo ou prováveis sistemas físicos de maneira conclusiva.

ESO383\*\*5 obteve uma qualificação positiva ao ser comparado com o campo próximo ( $p < 1\%$ ) e no estudo espectroscópico, que sugeriu idade entre 3-4 Gyr. Em outros três métodos, a qualificação foi negativa: perfil de densidade radial, dispersão no diagrama cor-magnitude (que poderia estar associada à presença de binárias, figura 5.25) e, dados cinemáticos não conclusivos. Ainda não é possível, portanto caracterizá-lo.

Waterloo 6 obteve qualificação negativa nos 4 métodos (espectro não disponível para o objeto), apresentando fortes evidências de se tratar de uma flutuação de campo.

Para concluir, salientamos que os 5 métodos empregados revelam-se eficazes para identificar e caracterizar remanescentes de aglomerados abertos. Devido à incompleteza dos dados, às incertezas observacionais e à baixa estatística, porém, eles não são suficientes para que possamos em geral individualmente afirmar de modo conclusivo qual objeto configura-se como um real remanescente de aglomerado aberto. O que nos é possível dizer é que os métodos sugerem fortemente a presença de remanescentes de aglomerados abertos em nossa amostra, além de permitirem inferir a respeito da provável evolução dinâmica dos mesmos.

## Capítulo 8

# Conclusões e Perspectivas

Com o objetivo de contribuir para o melhor entendimento da evolução dos aglomerados abertos e dos subsistemas de abertos na Galáxia através da caracterização de possíveis candidatos a remanescentes de aglomerados abertos, foi estudada uma amostra com 23 objetos lançando-se mão de dados fotométricos, espectroscópicos e cinemáticos.

O delicado balanço entre efeitos que competem para a formação e a destruição de aglomerados abertos produz a população de abertos que vemos hoje. A distribuição cumulativa de idades indica que essa população está basicamente dividida entre duas idades características. Há uma grande população de abertos com idades típicas de 200 Myr e uma população com um número menor, mas significativo, de membros com idade típica de 3.5 Gyr (Friel 2002)[39]. Conhecer em detalhes os aglomerados abertos é uma tentativa de quantificar os efeitos que influenciam nos processos de formação, evolução dinâmica e dissolução dos mesmos. Como evoluem dinamicamente e como os diversos efeitos internos e externos que levam à perda de estrelas podem conduzi-los à dissolução, é de se esperar que exista uma população de remanescentes de aglomerados abertos.

Ao longo dos capítulos aqui desenvolvidos, os 23 candidatos a remanescentes de aglomerados abertos foram estudados através de fotometria infravermelha do catálogo 2MASS, espectros obtidos através de observações no Complejo Astronómico El Leoncito e de movimentos próprios fornecidos pelo catálogo UCAC2. Esses dados forneceram informações sobre os objetos e seus campos, além de idades, avermelhamentos, distâncias e cinemática. Os métodos desenvolvidos, por sua vez, permitiram analisar objetivamente os objetos e sugerem fortemente a presença de remanescentes de aglomerados abertos em nossa amostra. Além disso, outro importante resultado é a indicação de que é possível inferir sobre distintos estágios evolutivos a partir do estabelecimento de uma relação entre a distribuição de estrelas no diagrama cor-magnitude e a distribuição de movimentos próprios para objetos e campos.

Foram confirmados como remanescentes de aglomerado aberto os seguintes objetos: NGC1252 e NGC1901, Ruprecht 3, NGC1663; e como flutuação de campo: NGC6994. O que vem ao encontro de estudos prévios presentes na literatura (Pavani et al. 2001; Pavani et al. 2003; Baume et al. 2003; Carraro 2000; Ordenkirchen & Soubiran 2002)[67, 68, 7, 19, 65]. Como fortes candidatos a remanescentes estão: ESO425SC6, ESO425SC15,

ESO426SC26, Ruprecht 31, ESO570SC12 NGC6481, NGC6863, Objeto 1, ESO383SC10 e Lynga 8.

NGC2645, ESO429SC2 e IC1023 requerem estudos mais detalhados para melhor definição da provável natureza física. Ruprecht 156 não apresentou dados sistemáticos, impossibilitando uma análise conclusiva. ESO211SC8, ESO132SC14 e ESO389\*\*5 não apresentaram características de remanescentes na análise do diagrama cor-magnitude; por outro lado, os demais resultados não permitem afirmar conclusivamente que se trata de flutuação de campo. Já Waterloo 6 apresentou forte evidência de ser uma flutuação de estrelas do campo.

De uma maneira geral, foi possível separar os objetos de forma a qualificá-los para estudos posteriores. Os remanescentes e os candidatos a remanescentes de aglomerados abertos devem compor uma nova amostra para a obtenção de movimentos próprios sobre vários anos para todos os seus prováveis membros e velocidades radiais, além de resolver os sistemas binários de estrelas. Os telescópios SOAR e GEMINI mostram-se adequados para alcançar esses objetivos. Diagramas cor-magnitude mais profundos também são necessários. Em conjunto, a disponibilização desses dados contribuirá para a definição, com menor incerteza, da natureza física desses sistemas.

Estudos observacionais com o objetivo de identificar remanescentes de aglomerados abertos têm sido feitos em número crescente nos últimos anos, fazendo com que essa classe de objetos ganhe projeção. Estudos teóricos a respeito da evolução de aglomerados abertos, feitos através de simulações de N-corpos (Terlevich 1987, de la Fuente Marcos 1997-98, Hsu et al. 1996)[85, 27, 28, 46], indicaram a existência de remanescentes e as características esperadas para os remanescentes de aglomerados abertos. O presente trabalho constitui-se, nesse sentido, no primeiro estudo observacional para um número razoável de objetos, analisados em conjunto e sob os mesmos métodos, para a identificação e a caracterização de propriedades em comum. Daí resulta que: (i) devido à incompleteza dos dados, às incertezas observacionais e à baixa estatística inerente aos objetos, é fundamental a utilização de vários métodos complementares para relacionar melhor os resultados; (ii) foram encontradas propriedades comuns aos objetos que, em sua maioria, confirmam o esperado teoricamente para remanescentes de aglomerados abertos (por exemplo, de la Fuente Marcos 1997-98, 2002)[27, 28, 29].

No que diz respeito ao item (ii), do ponto de vista da caracterização, acreditamos que a presente amostra sugere que remanescentes de aglomerados abertos, mesmo bem menos povoados, devem apresentar uma distribuição de estrelas no plano do céu que permita a obtenção de densidades em número de estrelas significativas quando comparadas ao campo. Essas densidades devem resultar em um perfil de densidade radial de estrelas do tipo compacto ou esparso. Já a distribuição de estrelas no plano do diagrama cor-magnitude correspondente à região mais densa do objeto deve povoar a seqüência principal de forma homogênea, apesar da erosão da baixa seqüência principal. Ainda quanto ao diagrama cor-magnitude, confirmou-se o reduzido número de estrelas e a presença significativa de prováveis binárias não resolvidas. Outro resultado importante é quanto à distribuição de movimentos próprios dos objetos: além de ser distinguível da distribuição para o campo, deve apresentar uma componente correspondendo à presença de estrelas sem companheiras e/ou binárias. Esse resultado foi encontrado para aglomerados abertos (Bica & Bonatto 2005) e deve ter também correspondência no diagrama

cor-magnitude.

Como perspectivas, questões importantes devem ainda ser respondidas como, por exemplo: (i) a ocorrência de objetos compactos e esparsos sugere a existência de estruturas relativamente estáveis com uma sobrevivência dinâmica em relação a aglomerados. A distinção entre esses dois tipos de estrutura estaria relacionada ao aglomerado aberto precursor e/ou a processos evolutivos?; (ii) a presença acentuada de binárias, substituindo a própria seqüência principal de estrelas sem companheira, como vista nos objetos do grupo B, sugere a existência de estágios distintos dentro da evolução dinâmica de remanescentes de aglomerado aberto. Se os estágios ocorrem, o que levaria a esses caminhos evolutivos distintos?

Fica claro, pois, que, além da obtenção de dados fotométricos, espectroscópicos e cinemáticos mais profundos e completos para candidatos a remanescentes de aglomerados abertos, é necessário o aprofundamento de estudos teóricos. Simulações de N-corpos são fundamentais especialmente para a análise dos processos dinâmicos envolvidos na dissolução de aglomerados abertos, como formação de binárias e evaporação.

# Apêndice A

## CMD's: objetos e campos sobrepostos

No capítulo 3 foi realizada uma estatística para comparação da distribuição de estrelas no CMD dos objetos e campos realizada. Nesse apêndice é disponibilizado o diagrama cor-magnitude (CMD) de cada objeto sobreposto ao campo Galáctico próximo, correspondendo as distribuições sobre as quais foi aplicado o método.

Para os objetos, os CMD's incluem as estrelas internas ao raio de extração escolhido com base no perfil de densidade radial. Nenhum filtro fotométrico foi aplicado, com exceção de NGC 1901, que está projetado na direção da LMC. Filtros fotométricos são discutidos em Bonatto et al. 2004 [16]: tratam-se de filtros que isolam as seqüências do objeto e permitem um melhor estudo estrutural. No caso de NGC 1901, foram isoladas apenas as estrelas vermelhas na direção da LMC (figura A.7).

O CMD do aglomerado aberto NGC 3680 - nosso objeto de comparação - é mostrado sobreposto a um campo próximo na figura A.1 No painel à esquerda, temos as estrelas internas a um raio que engloba o de núcleo ( $r = 2.3' \pm 0.4'$ ). À direita temos as estrelas internas ao raio da região central ( $r = 7.5'$ ) (Bonatto et al. 2004 [16]). Em ambos CMD's, vemos a MS do aglomerado bem definida, assim como a região do TO e a presença de gigantes. Para  $r = 7.5'$ , ocorre um maior número de estrelas em cada uma dessas regiões, porém percebemos a maior contaminação por estrelas de campo.

As figuras de A.2 a A.5 mostram, em ordem crescente de longitude Galáctica (l), os objetos classificados como compactos. As figuras A.6, A.7, A.8 os classificados como esparsos.

Podemos dividir os CMD's dos compactos em três grupos: (i) objetos povoados na região esperada para MS e não povoados na região esperada para estrelas de campo; (ii) objetos povoados em ambas regiões e, (iii) objetos com uma distribuição de estrelas dispersa.

Entre os objetos do primeiro grupo NGC 6481, NGC 6863, Ruprecht 3 (figura A.2) e Lynga 8 (figura A.4) têm seus CMD's construídos para pequenos raios de extração  $1'$ ,  $1.5'$ ,  $2'$  e  $1'$  (tabela 3.1), respectivamente. O perfil radial destes objetos (Seção 2.3) apresentou barras de erro significativas na região central devido ao número reduzido de estrelas. Entretanto, mesmo os CMD's não sendo completos (raio de extração  $<$  raio limite), observa-se a presença de estrelas na região esperada para a MS no campo. Destacam-se, pela melhor definição

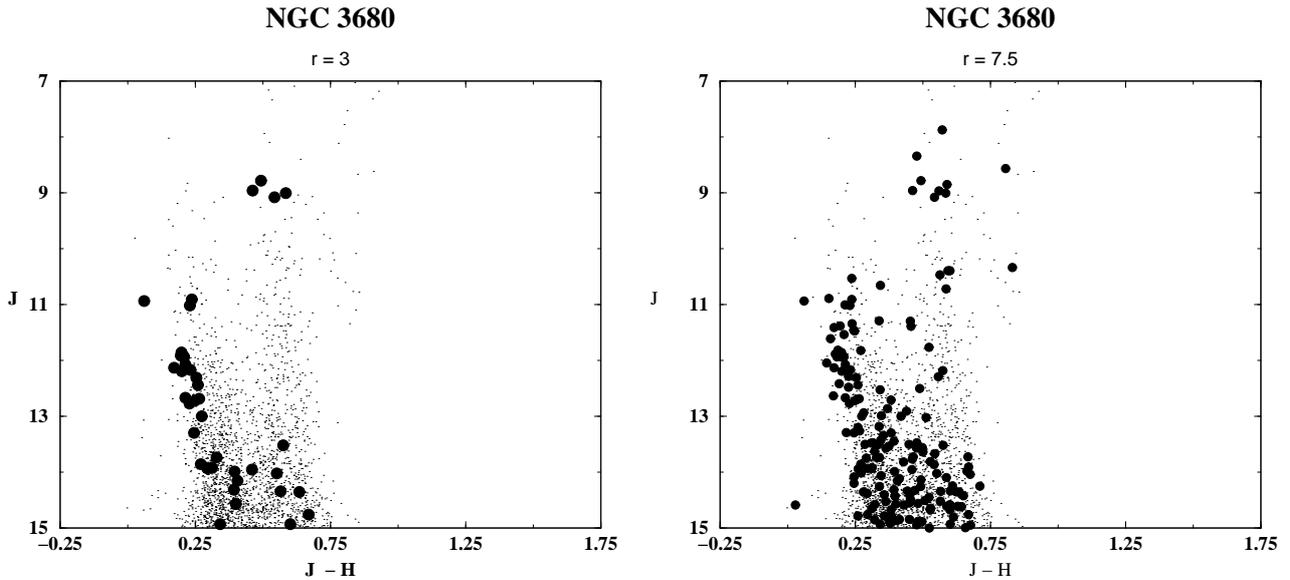


Figura A.1: Diagrama  $J \times (J - H)$  para NGC 3680 e campo. Painele à esquerda: extração para um raio de  $3'$ . Painele à direita: raio de  $7.5'$ . Os círculos cheios correspondem ao aglomerado e os pontos, ao campo (tabela 3.2).

da MS e a presença de gigantes, Ruprecht 3 e Lynga 8. NGC 6994 apresenta estrelas distribuídas no CMD em duas regiões separadas por 2 magnitudes.

No segundo grupo temos Ruprecht 31, NGC 2645, Ruprecht 156, (figura A.3) que apresentam um número maior de estrelas para os raios de extração  $1.75'$ ,  $3'$  e  $3'$  (tabela 3.1), respectivamente. Os CMD's de Ruprecht 156 (figura A.3) e Objeto 1 (fig. A.4) contém uma MS que se destaca em relação às estrelas de campo. Waterloo 6 (fig. A.3) poderia ser incluído nesse grupo, porém suas estrelas apresentam-se dispersas no CMD.

No grupo (iii), incluem-se ESO211SC8, ESO132SC14 (fig. A.4) e ESO389\*\*5 (fig.A.5), com pequenos raios de extração ( $r = 1'$ ) e uma distribuição dispersa no CMD. ESO389\*\*5 apresenta poucas estrelas para o raio de extração escolhido. Os dois primeiros apresentam, porém, perfis cuja densidade na região central se destaca em relação à contribuição do fundo do céu (fig. 2.13). Já o perfil de ESO389\*\*5 (fig. 2.14) não apresenta esta característica.

As figuras A.6, A.7 e A.8 apresentam os candidatos a remanescentes classificados como esparsos cujos raios variam de  $2.5'$  a  $7.5'$ . Elas apresentam um número maior de estrelas e a presença de estrelas notavelmente de campo em maior ou menor número. Entretanto, a região esperada para a MS do campo está bem povoada e, na maioria dos casos, bem definida.

ESO425SC6 (fig. A.6) e ESO383SC10 (fig. A.8) estão entre os objetos esparsos em que foi possível um ajuste aproximado por perfil de King (figs. 2.15 e 2.17). ESO570SC12, apesar de esparsa, reproduziu um perfil característico de compacto (fig. 2.16). Esses 3 objetos destacam-se dos demais esparsos pela pequena presença de estrelas notavelmente de campo.

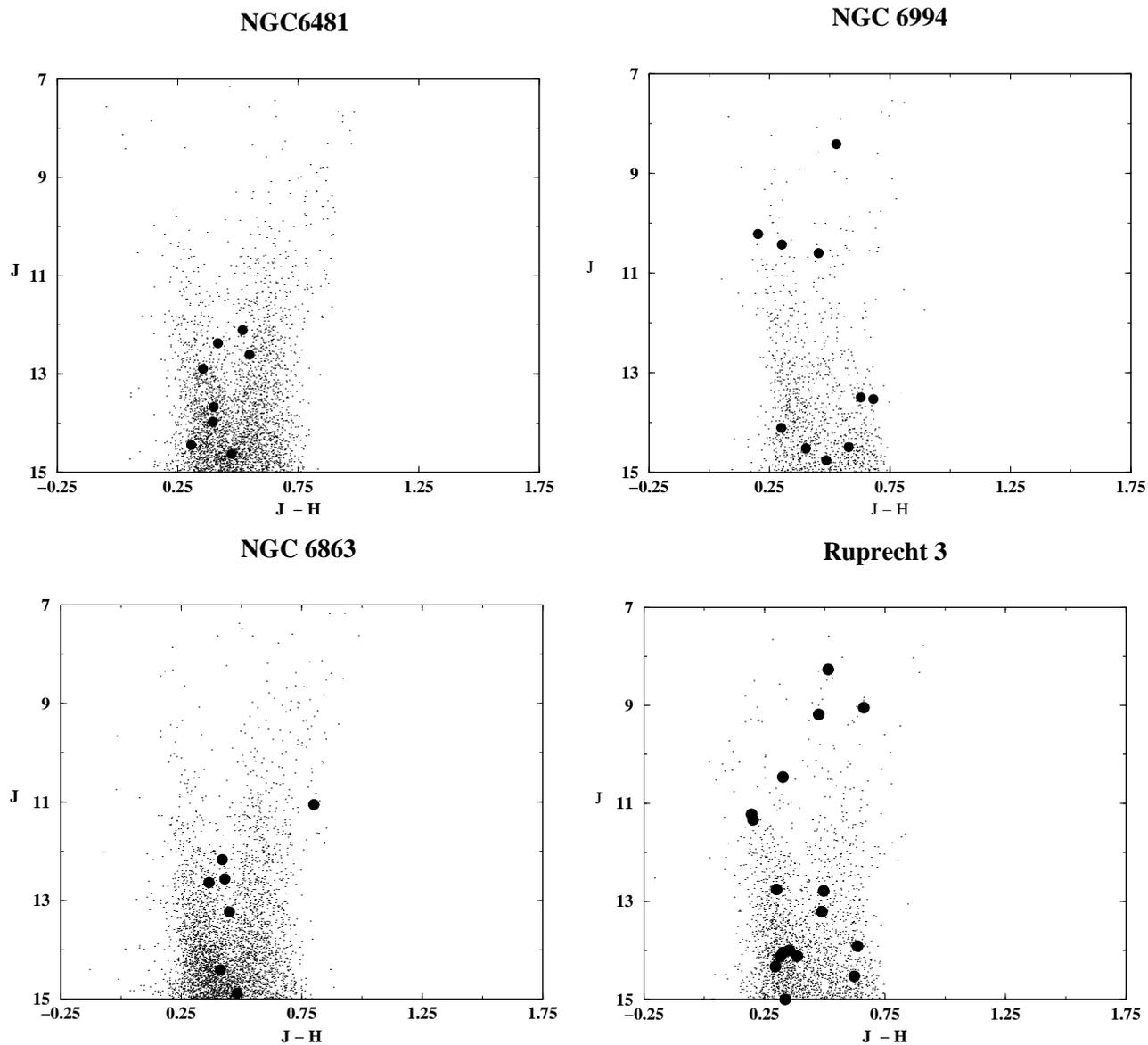


Figura A.2: Diagramas cor-magnitude 2MASS. Cada objeto está sobreposto a um campo próximo correspondente. Círculos cheios correspondem às estrelas do objeto e os pontos, às estrelas do campo. Todos eles são classificados como compactos.

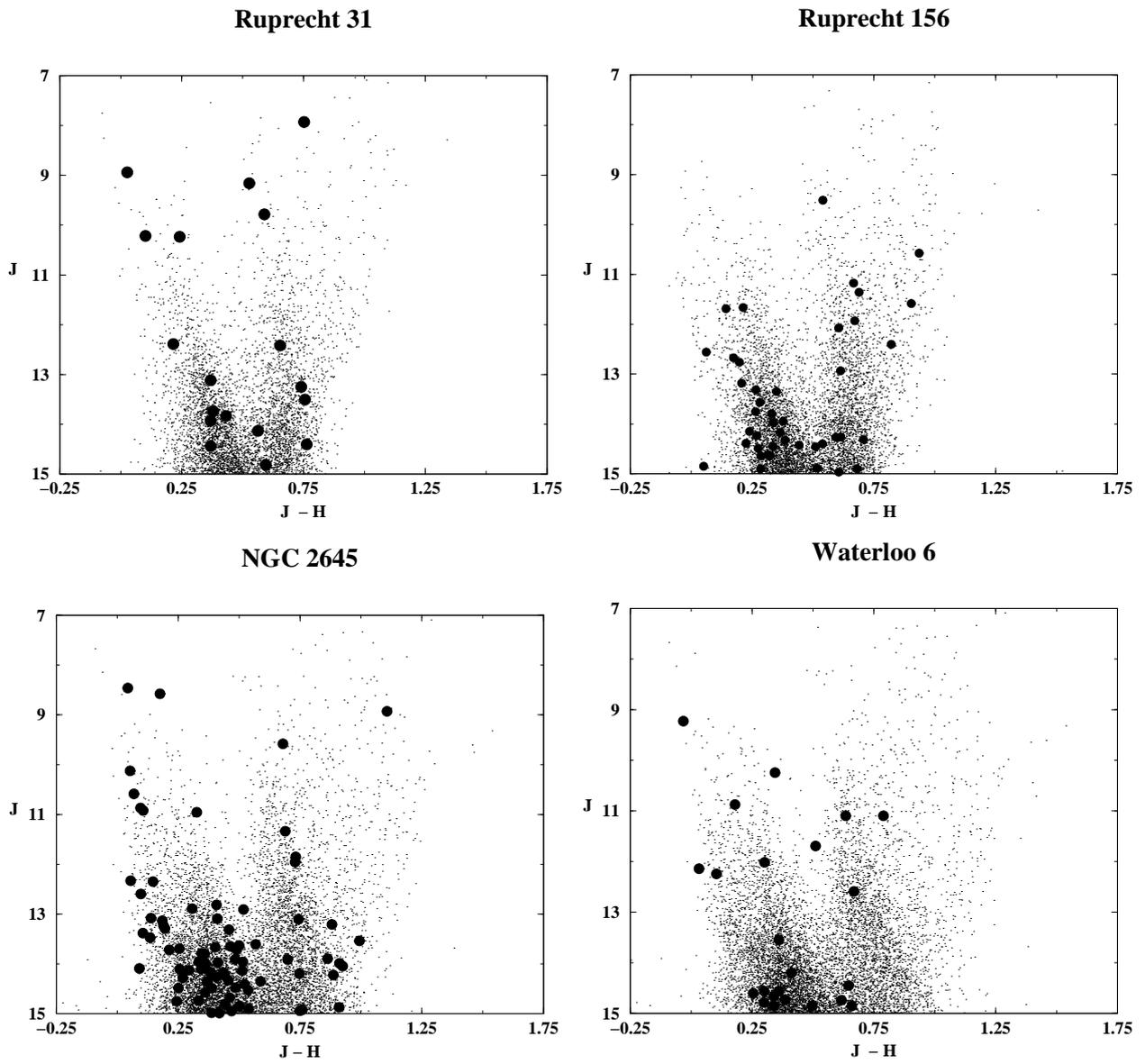


Figura A.3: Diagrama  $J \times (J - H)$ . Idem à figura A.2.

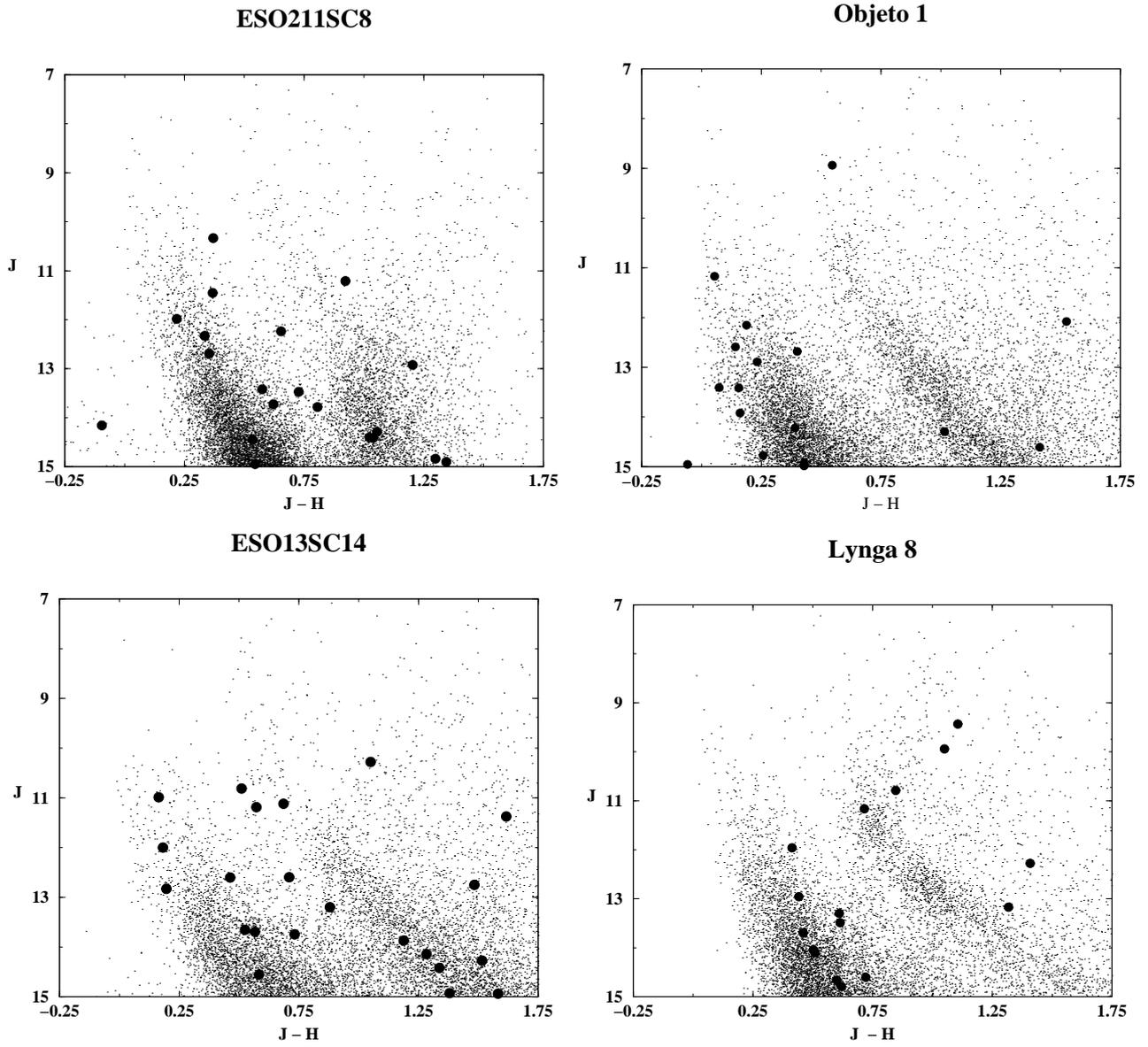


Figura A.4: Conforme legenda da figura A.2, mais quatro candidatos a remanescentes classificados como compactos

**ESO389\*\*5**

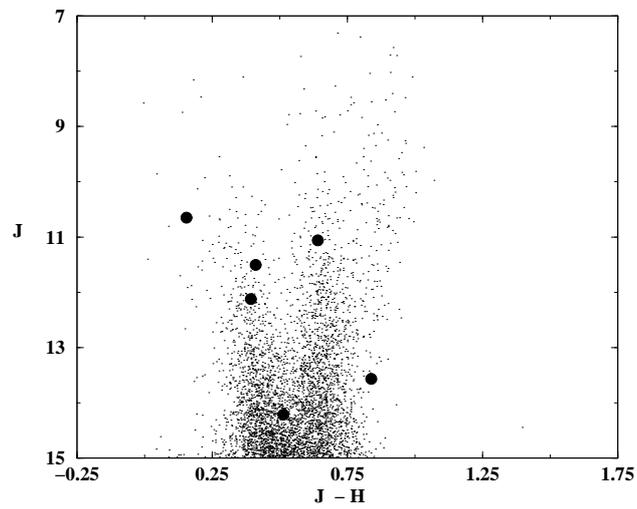


Figura A.5: Diagrama cor-magnitude para o compacto ESO 389\*\*5 e campo próximo de comparação. Idem à legenda da figura A.2.

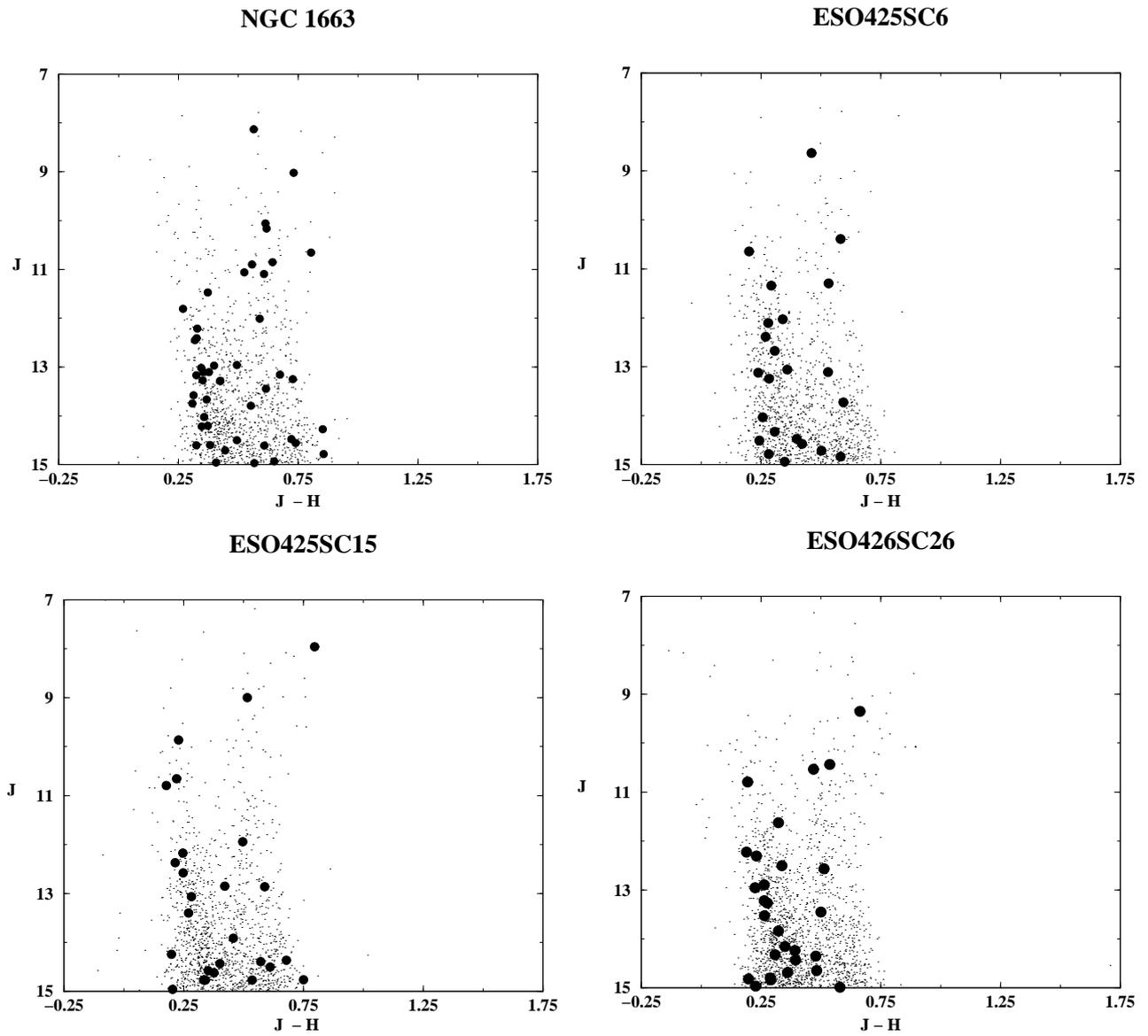


Figura A.6: Diagramas  $J \times (J - H)$  dos objetos sobrepostos aos campos correspondentes. Círculos cheios: estrelas do objeto; pontos: estrelas do campo. Objetos classificados como esparsos.

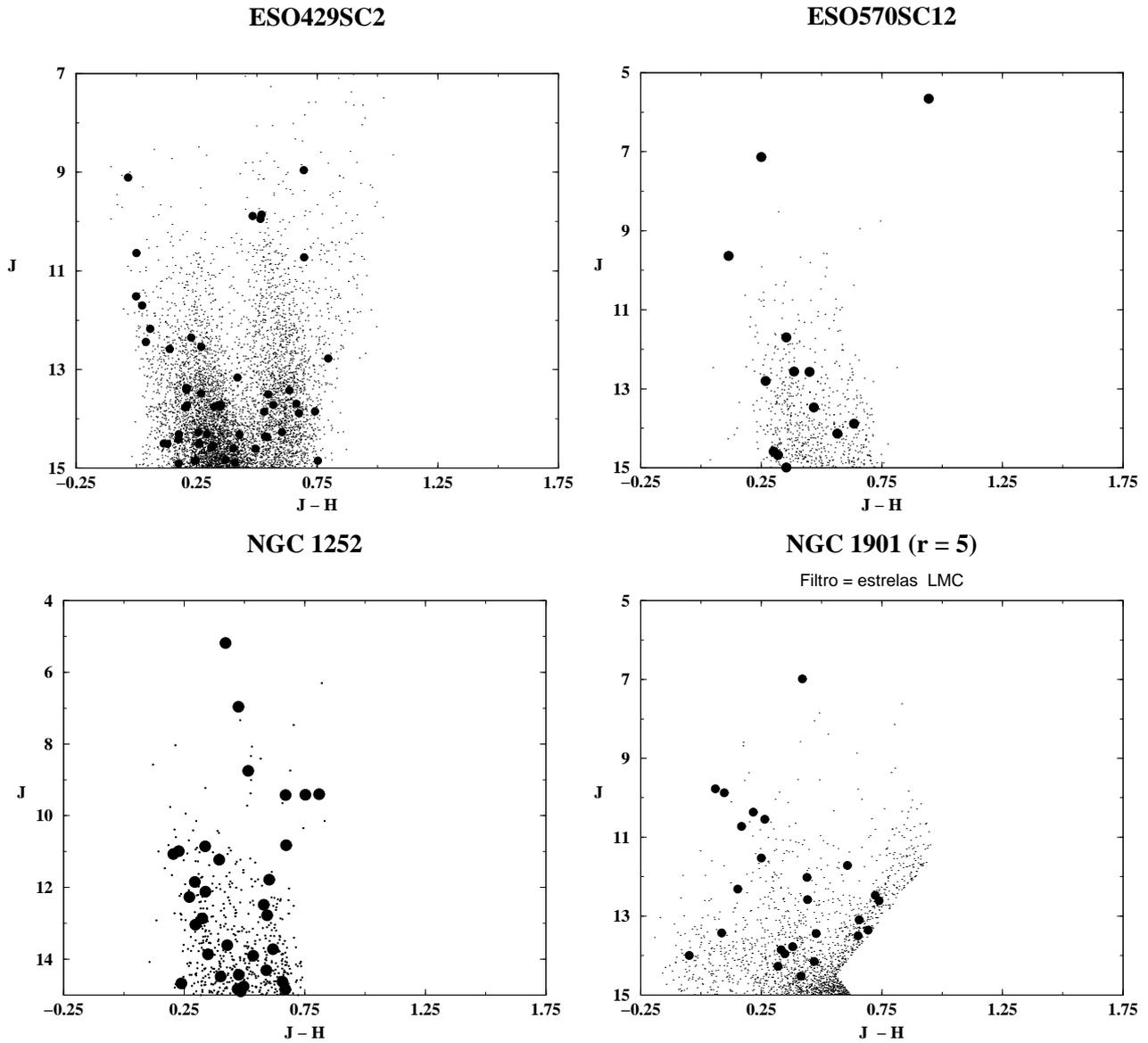
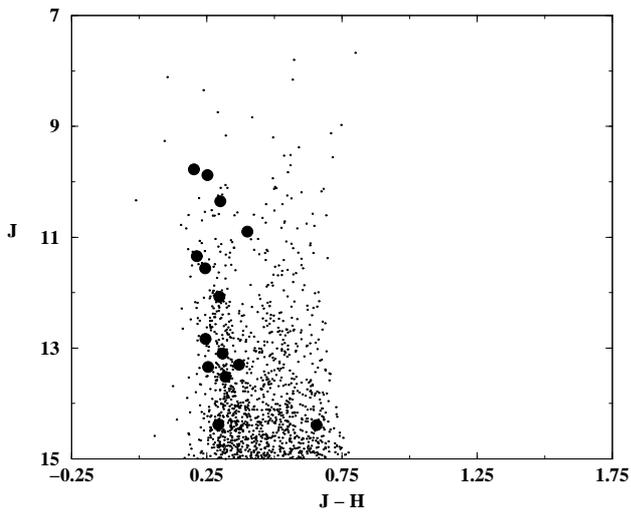


Figura A.7: Diagramas  $J \times (J - H)$  dos objetos sobrepostos aos campos correspondentes. Círculos cheios: estrelas do objeto; pontos: estrelas do campo. Objetos classificados como esparsos. Para NGC 1901, foi aplicado um filtro fotométrico para exclusão de estrelas na direção de LMC. Todos eles classificados como esparsos.

**ESO383SC10**



**IC 1023**

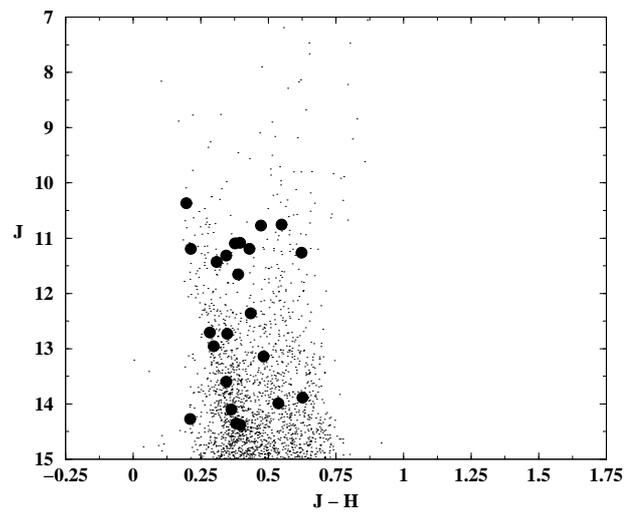


Figura A.8: Idem à legenda da figura A.6.

# Referências Bibliográficas

- [1] ALIBÉS, A.; LABAY, J.; & CANAL, R. Galactic Chemical Abundance Evolution in the Solar Neighborhood up to the Iron Peak, *Astronomy & Astrophysics*, v.370, p. 1103-1121, 2001.
- [2] ALTER, G.; RUPRECHT, J.; VAŇYSEK, J., *Catalogue of Star Cluster and Associations*. ed. G. Alter, B. Balaáz, J. Ruprecht. Budapest: Akademiai Kiado, 1970.
- [3] ANDRIEVSKY, S. M.; LUCK, R. E.; MARTIN, P.; LÉPINE, J. R. D. The Galactic Abundance Gradient from Cepheids. V. Transition Zone between 10 and 11 kpc, *Astronomy & Astrophysics*, v. 413, p. 159-172, 2004.
- [4] BAADE, W. The Resolution of Messier 32, NGC205 and the Central Region of the Andromeda Nebula, *Astrophysical Journal*, v. 100, p. 137-146, 1944.
- [5] BARBUY, B.; BICA, E.; ORTOLANI, S. Globular Clusters within 5(deg) Galactic Center, *Astronomy & Astrophysics*, v.333, p. 117-124, 1998.
- [6] BASSINO, L.P.; WALDHAUSEN, S.; MARTÍNEZ, R., CCD Photometry in the Region of NGC 6469; the Remains of an Old Open Cluster, *Astronomy & Astrophysics*, v.355, p. 138-144, 2000.
- [7] BAUME, G.; VILLANOVA, S.; CARRARO, G. A Study of the Two Northern Open Clusters NGC1582 and 1663, *Astronomy & Astrophysics*, v. 407, p. 527-539, 2003.
- [8] BERGOND, G.; LEON, S.; GUILBERT, J. Gravitational Tidal Effects on Galactic Open Clusters, *Astronomy & Astrophysics*, v. 377, p. 462-472, 2001.
- [9] BERTELLI, G.; BRESSAN, A.; CHIOSI, C.; FAGOTTO, F.; NASI, E. Theoretical Isochrones from Models with New Radiative Opacities, *Astronomy & Astrophysics. Supplement*, v. 106, p. 275-302, 1994.
- [10] BELLONI, T.; VERBUNT, F. An X-ray View of Old Open Clusters, The origins, evolution, and destinies of binary stars in clusters, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Volume 90*, An international symposium held at the University of Calgary, 18-23 June 1995, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific (ASP), |c1996, xxvi, 508 p., edited by E. F. Milone and J.-C. Mermilliod, p.82

- [11] BICA, E.; ALLOIN, D. A Grid of Star Cluster Properties for Stellar Population Synthesis, *Astronomy & Astrophysics*, v. 66, p. 171-179, 1986.
- [12] BICA, E.; SANTIAGO B.X.; DUTRA, C.M.; DOTTORI, H.; OLIVEIRA, M.R.; PAVANI, D. B. Dissolving Star Cluster Candidates, *Astronomy & Astrophysics*, v.366, p. 827-833, 2001.
- [13] BICA, E.; BONATTO, C. Proper Motions Measurements as Indicators of Binarity in Open Clusters, *Astronomy & Astrophysics*, v. 431, p. 973-951, 2005.
- [14] BINNEY, J.; MERRIFIELD, M. *Galactic Astronomy*, Princeton University Press, p. 107 1998.
- [15] BLITZ, L.; SPERGEL, N. D. Direct Evidence for a Bar at the Galactic Center, *Astrophysical Journal*, v. 379, p. 631 - 638, 1991.
- [16] BONATTO, C.; BICA, E.; PAVANI, D. B. NGC 2180; a Disrupting Open Cluster, *Astronomy & Astrophysics*, v. 427, p.485-494, 2004.
- [17] BRESSAN, A.; FAGOTTO, F.; BERTELLI, G.; CHIOSI, C. Evolutionary Sequences of Stellar Models with New Radiative Opacities. II -  $Z = 0.02$ , *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, v. 100, p. 647-664, 1993.
- [18] CARDELLI, J. A.; CLAYTON, G. C.; MATHIS, J. S. The Relationship Between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction, *Astronomical Journal*, v. 345, p. 245-256, 1989.
- [19] CARRARO, G., NGC 6994; An Open Cluster Which is Not an Open Cluster, *Astronomy & Astrophysics*, v. 357, p. 145 -148, 2000.
- [20] CARRARO, G Photometry of Dissolving Star Cluster Candidates. The Cases of NGC7036 and NGC7772, *Astronomy & Astrophysics*, v. 385, p. 471-478, 2002.
- [21] CHIAPPINI, C.; MATTEUCCI, F.; ROMANO, D., Abundance Gradients and the Formation of the Milky Way, *Astrophysical Journal*, v. 554, p. 1044-1058, 2001.
- [22] CHIOSI, C.; VALLENARI, A.; BRESSAN, A.HST Photometry: Can UV Colors Probe the Galaxy Ages ?, *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, v. 121, p. 301-319, 1997
- [23] COSTA, R. D. D.; UCHIDA, M. M. M.; MACIEL, W. J., Chemical Abundances of Planetary Nebulae Towards the Galactic Anticenter, *Astronomy & Astrophysics*, v. 423, p. 199-207, 2004.
- [24] DEHARVENG, L.; PEÑA, M.; CAPLAN, J.; COSTERO, R., Oxygen and Helium Abundances in Galactic HII Regions - II. Abundance Gradients, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 311, p. 329-345, 2000.

- [25] DE LA FUENTE MARCOS, R., The Initial Mass Function and the Dynamical Evolution of Open Clusters. I. Conservative Systems, *Astronomy & Astrophysics*, v.301, p. 407-418, 1995.
- [26] DE LA FUENTE MARCOS, R., The Initial Mass Function and the Dynamical Evolution of Open Clusters. III. With Primordial Binaries, *Astronomy Astrophysics*, v. 314, p. 453-464, 1996.
- [27] DE LA FUENTE MARCOS, R. The Initial Mass Function and Dynamical Evolution of Open Clusters. IV Realistic Systems, *Astronomy & Astrophysics*, v. 322 , p. 764-777, 1997.
- [28] DE LA FUENTE MARCOS, R. Searching for Open Cluster Remnants, *Astronomy & Astrophysics*, v. 333, p. L23-L30, 1998.
- [29] DE LA FUENTE MARCOS, R.; DE LA FUENTE MARCOS, C. Dynamics of Very Open Clusters, *Astrophysics and Space Science*, v. 280, p. 381-404, 2002.
- [30] DIAS W.S., A. B.S., MOITINHO A., LEPINE J.R.D., New Catalogue of Optically Visible Open Clusters and Candidates, *Astronomy & Astrophysics*, v. 389, p. 871-873, 2002.
- [31] DREYER, J. L. E., A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F.W. Herschel, Bart., revised, corrected, and enlarged, *Mem. Royal Astronomical Society*, v. 49, p. 1-237, 1888.
- [32] DREYER, J. L. E., Index Catalogue of Nebulae found in the Years 1888 to 1894, with Notes and Corrections to the New General Catalogue, *Mem. Royal Astronomical Society*, v. 51, p. 185-228, 1895.
- [33] DREYER, J. L. E., Index Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, containing Objects Found in the Years 1895 to 1907; with Notes and Corrections to the New General Catalogue and to the Index Catalogue for 1888-94, *Mem. Royal Astronomical Society*, v. 59, p. 105-198, 1908.
- [34] EGGEN, O. J.; LYNDEN-BELL, D.; SANDAGE, A. R., Evidence from the Motions of Old Stars that the Galaxy Collapsed, *Astrophysical Journal*, v. 136, p. 748-767, 1962.
- [35] ELSON, R; HUT, P; INAGAKI, S, Dynamical Evolution of Globular Clusters, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 25, p. 565-601, 1987.
- [36] ELSON, R.; SIGURDSSON, S.; DAVIS, M.; HURLEY, J.; GILMORE, G. The Binary Star Population of the Young Cluster NGC 1818 in the Large Magellanic Clouds, *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, v. 300, p. 857-862, 1998.
- [37] FRIEL, E. D., The Old Open Clusters Of The Milky Way, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, v. 33, p. 381-414, 1995.
- [38] FRIEL, E. D., Open Clusters as a Record of the Past, *Astrophysics & Space Science*, v. 265, p. 271-278 1999.

- [39] FRIEL, E. D.; JANET, K. A.; TAVAREZ, M.; SCOTT, J.; KATSANIS, R.; LOTZ, J.; HONG, L.; MILLER, N., Metallicities of Old Open Clusters, *Astronomical Journal*, v. 124, p. 2693-2720, 2002.
- [40] GENZEL, R.; SCHODEL, R.; OTT, T.; ECKART, A.; ALEXANDER, T.; LACOMBE, F.; ROUAN, D.; ASCHENBACH, B. Near-infrared Flares from Accreting Gas Around the Supermassive Black Hole at the Galactic Center, *Nature*, v. 425, p. 934-937, 2003.
- [41] GILMORE, G.; REID, N., New Light on Faint Stars. III - Galactic Structure Towards the South Pole and the Galactic Thick Disc, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 202, p. 1025-1047, 1983.
- [42] GIRARDI, L.; BERTELLI, G.; BRESSAN, A.; CHIOSI, C; GROENEWEGEN, M. A. T.; MARIGO, P.; SALASNICH, B.; WEISS, A. Theoretical Isochrones in Several Photometric Systems. I. Johnson-Cousins-Glass, HST/NICMOS, Washington, and ESO Imaging Survey Filter Sets, *Astronomy & Astrophysics*, v. 391, p. 195-212, 2002.
- [43] HENRY, R. B. C.; KWITTER, K. B.; BALICK, B., Sulfur, Chlorine, and Argon Abundances in Planetary Nebulae. IV. Synthesis and the Sulfur Anomaly, *Astronomical Journal*, v. 127, p. 2284-2302, 2004.
- [44] HERNANDEZ, X.; VALLS-GABAUD, D.; GILMORE, G., Deriving Star Formation Histories: Inverting Hertzsprung-Russell Diagrams Through a Variational Calculus Maximum Likelihood Method, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 304, p. 705-719, 1999
- [45] HOU, J. L.; PRANTZOS, N.; BOISSIER, S, Abundance Gradients and their Evolution in the Milky Way Disk, *Astronomy & Astrophysics*, v. 362, p. 921-936, 2000.
- [46] HSU, L.; NORIEGA-CRESPO, A.; FRIEL, E. D., N-Body Numerical Simulations for Orbits of Old Open Clusters, *American Astronomical Society, 189th AAS Meeting, #72.04; Bulletin of the American Astronomical Society*, v. 28, p. 1366, 1996.
- [47] HUT, P. The Origins Evolutions, and Destinies of Binary Stars in Clusters, *ASP Conference Series*, ed. E.F. Milone, & J.-C. Mermilliod, v. 90, p. 31, 1996.
- [48] JANES, K. A.; PHELPS, R. L., The Galactic System of Old Star Clusters: The Development of the Galactic Disk, *Astronomical Journal*, v. 108, p. 1773-1785. 1994.
- [49] KERBER, L. O.; SANTIAGO, B. X.; CASTRO, R.; VALLS-GABAUD, D., Analysis of Colour-Magnitude Diagrams of Rich LMC Clusters: NGC 1831, *Astronomy & Astrophysics*, v. 390, p. 121-132, 2002.
- [50] KERBER, L. O., Análise de Diagramas Cor-Magnitude de 5 Aglomerados Ricos da LMC, *Tese de Doutorado, UFGRS*, 2004.
- [51] KERBER, L. O.; SANTIAGO, B. X., Physical Parameters of Rich LMC Clusters From Modeling of Deep HST Colour-Magnitude Diagrams, *Astronomy & Astrophysics*, v. 435, p. 77-93, 2005.

- [52] KING, I., The structure of star clusters. III. Some Simple Dynamical Models, *Astronomical Journal*, v. 71, p. 64-75, 1966.
- [53] LADA, C. J.; LADA, E. A., Embedded Clusters in Molecular Clouds, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, v. 41, p. 57-115, 2003.
- [54] LIN, C. C.; SHU, F. H. Density Waves in Disk Galaxies, {Radio Astronomy and the Galactic System}, Proceedings from IAU Symposium no. 31 held in Noordwijk, Netherlands. Editado por Hugo van Woerden. International Astronomical Union. Symposium no. 31, Academic Press, Londres, p.313-317, 1967.
- [55] LYNGA, G., Computer-Based Catalogue of Open Cluster Data, 5th ed. (Strasbourg; CDS), 1987.
- [56] MACIEL, W. J.; QUIZERA, C., Abundance Gradients in the Outer Galactic Disk from Planetary Nebulae, *Astronomy & Astrophysics*, v. 345, p. 629-634, 1999.
- [57] MACIEL, W. J.; COSTA, R. D. D.; UCHIDA, M. M. M., An Estimate of the Time Variation of the O/H Radial Gradient from Planetary Nebulae, *Astronomy & Astrophysics*, v. 397, p. 667-674, 2003.
- [58] MACIEL, W. J.; LAGO, L. G.; COSTA, R. D. D., An Estimate of the Time Variation of the Abundance Gradient from Planetary Nebulae. II. Comparison with Open Clusters, Cepheids and Young Objects, *Astronomy & Astrophysics*, v. 433, p. 127-135, 2005.
- [59] MACKEY, A. D.; GILMORE, G. F., Surface Brightness Profiles and Structural Parameters for Globular Clusters in the Fornax and Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxies, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, v. 340, p. 175-190, 2003.
- [60] MATHIS, S. J., Interstellar Dust and Extinction, *Annual Review Astronomical Astrophysical*, v. 28, p. 37-70, 1990.
- [61] MERMILLIOD, J. C. Comparative Studies of Young Open Clusters. III - Empirical Isochronous Curves and Zero Age Main Sequence, *Astronomy & Astrophysics*, v. 97, p. 235-244, 1981.
- [62] MINNITI, D.; CLARÍA J. J.; GÓMEZ, M. The Atmospheric Extinction at the Complejo Astronomico El Leoncito and Bosque Alegre Station, *Astrophysics & Space Science*, v. 158, p. 9-18, 1989.
- [63] MIGUELL, K. J., Parameter Estimation in Astronomy with Poisson-distributed Data. I. The  $\chi^2_\gamma$  Statistic, *Astrophysical Journal*, v. 518, p. 380-393, 1999.
- [64] MOFFAT, A. F. J.; FITZGERALD, M. P., Some Very Luminous Supergiants Associated With Compact Groups of Luminous OB Stars, *Astronomy & Astrophysics*, v. 54, p. 263-268, 1977.
- [65] ORDENKIRCHEN, M.; SOUBIRAN, C. NGC6994 - Clearly Not a Physical Stellar Ensemble, *Astronomy & Astrophysics*, v. 383, p. 163-170, 2002.

- [66] PAVANI, D. B. Estágios Finais da Evolução de Aglomerados Abertos, Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2001.
- [67] PAVANI, D.B.; BICA, E.; DUTRA, C.M. ; DOTTORI, H.; SANTIAGO, B. X.; CARRANZA, G.; DÍAZ, R. J. Open Clusters or their Remnants; B and V Rhotometry of NGC 1901 and NGC1252, *Astronomy & Astrophysics*, v. 374, p. 554-563, 2001.
- [68] PAVANI, D. B.; BICA, E; AHUMADA, A. V.; CLARIÁ J. J. Ruprecht 3; An Old Star Cluster Remnant ?, *Astronomy & Astrophysics*, v. 399, p. 113-120, 2003.
- [69] PIATTI, A. E.; BICA, E.; CLARIÁ J. J.; SANTOS, J. F. C.; AHUMADA, A.V. Integrated spectral evolution of Galactic open clusters, {*Monthly Notes of Royal Astronomical Society*}, v. 335, p. 233-240, 2002.
- [70] PORTEGIES, Z. S. F.; MAKINO, J.; MCMILLAN, S. L. W.; Hut, P., The Lives and Deaths of Star Clusters near the Galactic Center, *Astrophysical Journal*, v. 565, p. 265-279, 2002.
- [71] REID, M.; MAJEWSKI, S.R., Star Counts Redivivus. I - A New Look at the Galaxy at Faint Magnitudes, *Astrophysical Journal*, v. 409, p. 635-662, 1993.
- [72] SANDAGE, A. The Color-Magnitude Diagrams of Galactic and Globular Clusters and their Interpretation as Age Groups, *Ricerche Astronomiche*, Vol. 5, Specola Vaticana, Proceedings of a Conference at Vatican Observatory, Castel Gandolfo, May 20-28, 1957, Amsterdam: North-Holland, and New York: Interscience, 1958, edited by D.J.K. O'Connell., p.41
- [73] SANTOS, J. F. C., Jr.; BICA, E.; DOTTORI, H., Spectral Synthesis Aided by the H-R Diagram - The open cluster M 11, *Astronomical Society of the Pacific*, v. 102, p. 454-462, 1990.
- [74] SANTIAGO, B. X.; STRAUSS, M. A., Large-scale Morphological Segregation in the Center for Astrophysics Redshift Survey, *Astrophysical Journal*, v. 387, p. 9-20, 1992.
- [75] SANTIAGO, B. X.; ELSON, R.; GILMORE, G., HST Photometry of 47 TUC and Analysis of the Stellar Luminosity Function in Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 281, p. 1363-1374, 1996.
- [76] SAHA, P., A Method for Comparing Discrete Kinematic Data and N-Body Simulations, *The Astronomical Journal*, v. 115, p. 1206-1211, 1998.
- [77] SCHLEGEL, D.J.; FINKBEINER, D. P.; DAVIS, M., Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds, *Astrophysical Journal*, v. 500-553, p. 525, 1998.

- [78] SHAPLEY, M.; SHAPLEY, M.B. Studies Based on de Colors and Magnitudes in Stellar Clusters. XIV Further Remarks on the Stellar of Galaxie System, *Astrophysical Journal* v. 50, p. 107-140, 1919.
- [79] SHU, F. H., *The Physical Universe - Introduction to Astronomy*, A Series of Books in Astronomy, Mill Valley, CA: University Science Books, 1982.
- [80] SILVA, D. R.; CORNELL, M. E. A New Library of Stellar Optical Spectra, *Astrophysical Journal Supplement Series*, v.81, p. 865-881, 1992.
- [81] SKRUTSKIE, M.; SCHNEIDER, S.; STIENING, R.; STROM, S. E.; WEINBERG, M. D.; BEICHMAN, C.; CHESTER, T.; CUTRI, R.; LONSDALE, C.; ELIAS, J.; ELSTON, R.; CAPPS, R.; CARPENTER, J.; HUCHRA, J. LIEBERT, J.; MONET, D; PRICE, S; SEITZER, P. The Two Micron Sky Survey (2MASS); Overview and Status, {In *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, eds. F. Garzon et al.}, Kluwer Academic Publishing Company , p. 25, 1997.
- [82] SMARTT, S. J., Abundance Gradients along the Galactic Disk, *The Evolution of the Milky Way: Stars versus Clusters*. Edited by Francesca Matteucci and Franco Giovannelli. Published by Kluwer Academic Publishers, P. O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, ISBN 0-7923-6679-4, p.323.
- [83] STONE, R. P. S.; BALDWIN, J. A. Southem Spectrophotometric Standards for Large Telescopes, *Monthly Notes of Royal Astronomical Society*, v.204, p. 347-353, 1983.
- [84] TAKAHASHI, K.; PORTEGIES, Z. S. F. The Evolution of Globular Clusters in the Galaxy, *Astrophysical Journal*, v. 535, p. 759-775, 2000.
- [85] TERLEVICH, E., Evolution of N-Body Open Clusters, *Monthly Notes of Royal Astronomical Society*, v. 224, p.193-225, 1987.
- [86] TOSI, M., The Chemical Evolution of the Milky Way, *The Evolution of the Milky Way: Stars versus Clusters*. Edited by Francesca Matteucci and Franco Giovannelli. Published by Kluwer Academic Publishers, P. O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, ISBN 0-7923-6679-4, p. 505, 2000.
- [87] VALLS-GABAUD, D.; LASTENNET, E., New Statistical Techniques for Measuring the Initial Mass Function, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, v. 8, p. 111-114, 1999.
- [88] WIELEN, R., The Age Distribution and Total Lifetimes of Galactic Clusters, *Astronomy & Astophysics*, v. 13, p. 309-322, 1971.
- [89] WYSE, R. F. G., Stellar Populations, *Baltic Astronomy*, v.8, p.593-620, 1999.
- [90] ZACHARIAS, N.; URBAN, S. E.; ZACHARIAS, M.; WYCOFF, G. L.; HALL, D. M.; MONET, D. G.; RAFFERTY, T. J. The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2), *Astronomical Journal*, v. 127, p. 3043-3059, 2004.