

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ESTUDO MULTIBANDA DO CONTEÚDO
ESTELAR DE REGIÕES H II
DO HEMISFÉRIO SUL

TESE DE DOUTORADO

Marcio do Carmo Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**ESTUDO MULTIBANDA DO CONTEÚDO
ESTELAR DE REGIÕES H II
DO HEMISFÉRIO SUL**

Marcio do Carmo Pinheiro

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Astronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Física.**

Orientador: Prof. Dr. Marcus V. F. Copetti

Santa Maria, RS, Brasil

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTUDO MULTIBANDA DO CONTEÚDO ESTELAR DE
REGIÕES H II DO HEMISFÉRIO SUL**

elaborada por
Marcio do Carmo Pinheiro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marcus Vinicius Fontana Copetti, Dr.
(Presidente/Orientador)

Zulema Abraham, Dra. (USP)

Elysandra Figueredo, Dra. (USP)

Alex André Schmidt, Dr. (UFSM)

Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 29 de outubro de 2012.

Dedicatória

*À minha família, por ter me ensinado a lutar
e a ter confiança de que os resultados viriam;*

*Aos meus amigos, que às vezes
acreditam mais em mim do que eu mesmo;*

À memória de minha mãe e minhas avós.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho e, em particular,

- ao meu orientador, professor Dr. Marcus V. F. Copetti, pelos ensinamentos não apenas de Astrofísica, mas também de Física Geral, Matemática, Língua Inglesa e Língua Portuguesa. Obrigado por sua amizade;
- aos professores Roberto P. Ortiz e Zulema Abraham pela constante co-orientação do trabalho e por me acolherem durante minha estadia em São Paulo. Obrigado pela amizade e pelos constantes auxílios, tanto logísticos quanto científicos;
- ao meu pai, Enio P. Pinheiro, e aos meus irmãos Roberto, Eliana e Marlizi;
- aos professores do Laboratório de Análise Numérica e Astrofísica;
- aos professores do Curso de Pós-Graduação em Física;
- aos professores do Curso de Física;
- aos amigos e colegas de sala Aline, Diogo, Hélio, Igor, Izabel e Vinicius;
- aos amigos Cristian Haesbaert, Jeferson Coutinho e Ivan Alves;
- aos demais colegas do Curso de Pós-Graduação em Física;
- aos professores e colegas do IAG/USP;
- aos ex-colegas do curso de Física;
- aos ex-colegas de apartamento Edenilson, Josemar, Caitano, Jonas, Rafael, Robson, Marcelo;
- aos novos colegas de trabalho da UFFS.
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro.

*“What do I do when my love is away?
(does it worry you to be alone?)
How do I feel by the end of the day?
(are you sad because you’re on your own?)*

*No, I get by with a little help from my friends,
Mm, I get high with a little help from my friends,
Mm, Gonna try with a little help from my friends.”*

**With a little help from my friends
John Lennon/Paul McCartney – 1 June 1967
Album Sgt. Pepper’s Lonely Hearts Club Band (The Beatles)**

Resumo

Apresentamos aqui um estudo multibanda do conteúdo estelar de onze regiões H II do Hemisfério sul com $10\text{ h} < \alpha(\text{J2000}) < -17\text{ h}$ e $-65^\circ < \delta(\text{J2000}) < -35^\circ$. Em 9 objetos ópticos, com valores de distância discrepantes ou sem nenhuma determinação anterior publicada, visamos identificar as fontes ionizantes e determinar suas distâncias, enquanto que, no estudo de dois outros objetos no infravermelho, buscamos não apenas identificar as fontes ionizantes, mas também objetos estelares jovens (YSOs) em seus campos. Nos primeiros, realizamos espectroscopia no óptico e fotometria UBV de seus conteúdos estelares e determinamos as distâncias das estrelas massivas por meio da paralaxe espectroscópica. A fim de evitar o uso de um valor fixo para a razão entre a extinção total e a seletiva à banda V , R_V , a extinção A_V na direção de cada estrela foi determinada diretamente através no método das diferenças de cor. De um total de 31 estrelas espectroscopicamente estudadas, 24 foram classificadas como tipos O ou B, sendo duas novas estrelas tipo O encontradas em RCW 98 e RCW 99. As estimativas de A_V implicaram um valor médio de $\langle R_V \rangle = 3.44$. Este resultado supera em 10% o valor médio encontrado para estrelas de campo sobre todas as direções da Galáxia. Para as regiões H II NGC 3503, NGC 6334, RCW 55, RCW 87, RCW 98 e RCW 99, distâncias mais precisas foram estimadas como o valor mediano da paralaxe espectroscópica de 2 a 6 diferentes estrelas ionizantes, resultando em uma dispersão interna menor que 5%. Dentre os objetos mais obscurecidos pela extinção interestelar da região de Norma, analisamos o conteúdo estelar da região leste do grande complexo de regiões H II brilhantes em radiofrequências GAL 331.5-00.1. A área estudada engloba os aglomerados infravermelhos [DBS2003] 156 e [DBS2003] 157, respectivamente associados às regiões H II GAL 331.11-00.51 e GAL 331.31-00.34. Observações fotométricas nas bandas J , H e K_s , com mais alta resolução que a fotometria 2MASS, foram realizadas nas direções desses objetos, o que possibilitou isolar as fontes infravermelhas mais brilhantes de estrelas companheiras não resolvidas e selecionar potenciais estrelas ionizantes para subsequente espectroscopia. 47 fontes com excesso de emissão intrínseca na banda K_s , típico em YSOs, foram identificadas seguindo os métodos usuais de análise da fotometria no IR próximo (NIR). Outros 70 YSOs foram identificados no IR médio (Mid-IR) usando dados do *survey* GLIMPSE. A pesquisa por medidas de velocidade radial na direção desses dois objetos e a semelhança das populações estelares indicou que as duas sub-regiões estudadas deveriam estar fisicamente associadas. Esta hipótese foi reafirmada com a determinação da paralaxe espectroscópica de 4 estrelas tipo O e outras 2 tipo B nos dois aglomerados, que retornaram valores de distâncias heliocêntricas bastante compatíveis ($\langle d_{\text{helioc}} \rangle = 3.30 \pm 0.29$ kpc). A contrapartida nos NIR e Mid-IR da fonte IRAS 16085-5138 foi encontrada junto ao aglomerado [DBS2003] 157. Esta fonte apresentou cores típicas de uma região H II Ultracompacta (UCH II) e índice espectral entre 2 e $25\ \mu\text{m}$ de $\alpha = 3.6$, típico de YSO imerso em um envelope protoestelar. Um limite inferior para a luminosidade bolométrica da protoestrela embebida foi estimado em $L = 7.7 \times 10^3 L_\odot$ ($M = 10 M_\odot$), o que corresponde a uma estrela de idade zero na faixa de BO-B1. O aglomerado [DBS2003] 157 mostrou-se estar espalhado sobre toda uma região de $\sim 4' \times 4'$, demarcada por intensa emissão de poeira quente e espacialmente distribuída como uma nuvem em forma de concha.

Palavras-chave: regiões H II – estrelas: estrelas massivas, distâncias, formação, pré-sequência principal – matéria circum-estelar – poeira, extinção – infravermelho: estrelas

Abstract

We present a multi-wavelength study of the stellar content of 11 optical/infrared Southern Galactic H II regions with $10\text{ h} < \alpha(\text{J2000}) < -17\text{ h}$ and $-65^\circ < \delta(\text{J2000}) < -35^\circ$. Nine optical objects with no published or uncertain distances were examined in order to identify their ionising sources and to determine their distances, whereas young stellar objects (YSOs) and main sequence ionising stars were photometrically classified in the two infrared clusters. We carried out optical spectroscopy and *UBV* photometry of the stellar content of these H II regions and obtained the distance of individual stars by spectroscopic parallax. To avoid using a fixed value for the total-to-selective extinction ratio R_V , the reddening A_V was determined directly by the colour-difference method. We classified as types O or B 24 out of the 31 stars for which optical spectra were obtained. In particular, we identified two new O stars in RCW 98 and RCW 99. The values for reddening obtained correspond to a mean $\langle R_V \rangle = 3.44$, which is about 10% higher of the mean value found for field stars over all directions of the Galaxy. For the H II regions NGC 3503, NGC 6334, RCW 55, RCW 87, RCW 98 e RCW 99, we obtained more precise distances calculated as the median of the spectroscopic parallaxes obtained for two to six different stars in each nebulae, with an internal dispersion of less than 5%. Among the objects more obscured in the Norma region, we analysed the stellar content of the East part of the large complex of H II regions GAL 331.5-00.1, which contains eight bright extended radio sources. This study comprises the infrared clusters [DBS2003] 156 and [DBS2003] 157, respectively associated to H II regions GAL 331.11-00.51 and GAL 331.31-00.34. In order to isolate the brightest 2MASS sources of their unresolved companions, we carried out *JHK* photometry with resolution better than 2MASS data. 47 Near-infrared (NIR) sources with K_s -band excess were identified following usual methods. Other 70 YSOs were also identified by using Mid-IR on-line data of the GLIMPSE survey. The search for radial-velocity measurements in the literature and the similarity between the stellar population explored have indicated the two regions as physically associated. With the determination of the spectroscopic parallaxes of four O-type and two B-type stars spread over the both clusters, this hypothesis was verified. The parallaxes of these 6 stars returned very compatible distances ($\langle d_{\text{helio}} \rangle = 3.30 \pm 0.29$ kpc). The Near- and Mid-IR counterparts of the IRAS source 16085-5138 was found close to the field of [DBS2003] 157. This source has showed typical colours of a Ultra-compact II region (UCH II) and spectral index $\alpha = 3.6$ between 2 and $25\ \mu\text{m}$, which is typical of YSOs immersed in protostellar envelopes. A lower limit to the bolometric luminosity of the protostar embedded was computed as $L = 7.7 \times 10^3 L_\odot$ ($M = 10 M_\odot$), which corresponds to a BO-B1 zero-age star. The cluster [DBS2003] 157 was found to be spread over all $\sim 4' \times 4'$ region demarcated by a intense shell-like dust emission, where a secondary massive star formation is going on, likely as a result of the interaction between this dust and stellar winds.

Keywords: H II regions – stars: early-type, distances, formation, pre-main-sequence – circumstellar matter – dust, extinction – infrared: stars

Sumário

1	Introdução	14
2	Classificação espectral e determinação de distâncias de estrelas de nove regiões H II galácticas com $-65^\circ < \delta(J2000) < -35^\circ$	18
2.1	Dados observacionais	18
2.1.1	Fotometria <i>UBV</i>	18
2.1.2	Espectroscopia	19
2.2	Métodos	22
2.2.1	Classificação espectral	23
2.2.2	Correção do avermelhamento e determinação das distâncias	23
2.3	Resultados e discussões	27
2.3.1	Bran 186	29
2.3.2	NGC 2626	30
2.3.3	RCW 32	30
2.3.4	NGC 3503	30
2.3.5	RCW 55	31
2.3.6	RCW 87	32
2.3.7	RCW 98	33
2.3.8	RCW 99	34
2.3.9	NGC 6334	35
3	Estudo do conteúdo estelar do aglomerado infravermelho [DBS2003] 157 associado à região H II GAL 331.31-00.34	36
3.1	Observação e redução dos dados	37
3.1.1	Dados fotométricos	38
3.1.2	Dados espectroscópicos	41
3.2	Resultados	42
3.2.1	Classificação espectral	42
3.2.2	Estimativa de distância via paralaxe espectroscópica	43
3.2.3	Identificação de potenciais estrelas ionizantes e estimativas da luminosidade do contínuo Lyman	45
3.2.4	Identificação e classificação de objetos estelares jovens	47
3.2.5	A fonte IRAS 16085-5138	50
3.2.6	Distribuição espacial do conteúdo estelar	52
4	Análise do conteúdo estelar do aglomerado infravermelho [DBS2003] 156	56
4.1	Estimativa indireta de distância de [DBS2003] 156	57
4.2	Observação e redução dos dados fotométricos	59
4.3	Pré-seleção de fontes ionizantes	61

4.4	Observação e redução dos dados espectroscópicos e classificação espectral .	63
4.5	Paralaxe espectroscópica das estrelas ionizantes de [DBS2003] 156 e cálculo do fluxo de fótons Lyman	64
4.6	Identificação e classificação de YSOs	66
4.7	Distribuição espacial das fontes ionizantes e dos YSOs	69
5	Comentários finais e perspectivas	72
5.1	Principais resultados obtidos no óptico	72
5.2	Principais resultados obtidos no infravermelho	73
5.3	Perspectivas de trabalhos futuros	75
A	Resultado da fotometria IR do aglomerado [DBS2003] 157	84
B	Resultado da fotometria IR do aglomerado [DBS2003] 156	87
C	Espectros de estrelas frias dos campos de [DBS2003] 156 e 157	95

Lista de Figuras

2.1	Espectros combinados e normalizados das estrelas classificadas como tipo O ou B.	24
2.2	Imagem $H\alpha$ de RCW 55.	31
2.3	Diagrama cor-magnitude de RCW 87.	33
2.4	Diagrama cor-cor de RCW 98.	34
3.1	Imagem na banda H do campo observado na direção de DBS2003 157, indicando todas as fontes detectadas na fotometria NIR.	39
3.2	Margens de erro finais da fotometria e correlação linear entre os sistemas CamIV/OPD e 2MASS.	40
3.3	Espectros NIR das estrelas quentes de GAL 331.31-00.34, comparados a espectros de estrelas padrão tipo O.	43
3.4	Variações das larguras equivalentes de linhas do hélio em espectros de estrelas O.	44
3.5	Diagramas cor-cor e cor-magnitude do campo de $\sim 5' \times 4'$ observado na direção de GAL 331.31-00.34.	46
3.6	Diagrama cor-cor de fontes Mid-IR detectadas em uma região de raio $2.5'$, centrada na imagem H da Fig. 3.1.	48
3.7	Distribuições espectrais de energia dos objetos destacados pelo excesso de emissão no Mid-IR (CE), conforme as associações com fontes NIR mostradas na Tabela 3.4.	51
3.8	Distribuição espectral de energia da fonte CE 10, construída com dados dos catálogos 2MASS, GLIMPSE e IRAS.	52
3.9	Histograma das estrelas detectadas na direção de GAL 331.31-00.34.	53
3.10	Combinação RGB de imagens em $8.0 \mu\text{m}$ (R), $5.8 \mu\text{m}$ (G) e $3.6 \mu\text{m}$ (B) do GLIMPSE.	54
3.11	Diagrama de contornos da emissão em $8.0 \mu\text{m}$ sobreposto à imagem H de GAL 331.31-00.34.	54
4.1	Combinação RGB de imagens em $8.0 \mu\text{m}$ (R), $5.8 \mu\text{m}$ (G) e $3.6 \mu\text{m}$ (B) do GLIMPSE.	57
4.2	Imagem na banda H do campo observado na direção de [DBS2003] 156	60
4.3	Margens de erro finais da fotometria e correlação linear entre os sistemas CamIV/OPD e 2MASS.	60
4.4	Diagramas cor-cor e cor-magnitude do campo de $\sim 7.3' \times 7.3'$ observado na direção de [DBS2003] 156.	62
4.5	Espectros das estrelas quentes do campo de GAL 331.11-00.51.	64
4.6	Diagrama cor-cor de fontes Mid-IR detectadas em uma região de raio $5'$, centrada na imagem H da Fig. 4.2.	66

4.7	Imagem H do campo da região H II GAL 331.11-00.51 e sua vizinhança. . .	70
C.1	Espectros de estrelas frias observadas no campo de GAL 331.31-00.34. . . .	96
C.2	Espectros de estrelas frias observadas no campo de GAL 331.11-00.51. . . .	96

Lista de Tabelas

2.1	Lista de observações fotométricas	19
2.2	Lista de observações espectroscópicas	20
2.3	Classificação espectral, dados fotométricos, extinção e distância heliocêntrica de cada estrela selecionada via fotometria	26
2.4	Distâncias Heliocêntricas das regiões H II estudadas	28
2.5	Comparação entre propriedades estelares e nebulares.	28
3.1	Lista de observações espectroscópicas	41
3.2	Estrelas ionizantes de GAL 331.31-00.34	45
3.3	Lista de YSOs conforme a fotometria NIR	49
3.4	Lista de YSOs conforme a fotometria Mid-IR do GLIMPSE	50
4.1	Medidas de velocidade radial na direção de [DBS2003] 156 e 157	58
4.2	Lista de observações espectroscópicas	63
4.3	Estrelas ionizantes de GAL 331.11-00.51	65
4.4	Lista de YSOs conforme a fotometria NIR	67
4.5	Lista de YSOs conforme a fotometria Mid-IR do GLIMPSE	69
5.1	Estrelas ionizantes classificadas espectroscopicamente	74
A.1	Resultado da fotometria do aglomerado [DBS2003] 157.	85
B.1	Resultado da fotometria do aglomerado [DBS2003] 156.	88

Lista de Símbolos e Abreviações

2MASS	<i>Two Micron All Sky Survey;</i>
α	Ascensão reta (coordenada do Sistema Equatorial Celeste);
Å	Angstrom (10^{-10} m);
ADU	<i>Analogic Digital Unit;</i>
A_V	Extinção visual;
CCD	<i>Charge Coupled Device;</i>
CE	<i>Colour excess object;</i>
δ	Declinação (coordenada do Sistema Equatorial Celeste);
d	Distância heliocêntrica;
filtros:	U , ultravioleta, comprimento de onda efetivo de 3 650 Å; B , azul, comprimento de onda efetivo de 4 400 Å; V , visual, comprimento de onda efetivo de 5 500 Å; J , infravermelho próximo, comprimento de onda efetivo de 1.235 μm ; H , infravermelho próximo, comprimento de onda efetivo de 1.662 μm ; K , infravermelho próximo, comprimento de onda efetivo de 2.159 μm ;
Far-IR	<i>Far Infrared;</i>
$FWHM$	<i>Full Width at Half Maximum;</i>
GLIMPSE	<i>Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire</i>
Gum	Catálogo de Gum;
$H\alpha$	Primeira linha espectral da série de Balmer para o átomo de H;
$H\beta$	Segunda linha espectral da série de Balmer para o átomo de H;
IAG	Instituto de Astronomia e Geofísica;
IRAF	<i>Image Reduction and Analysis Facility;</i>
IRS	<i>Infrared source;</i>
LSR	<i>Local Standard of Rest;</i>
M_\odot	Massa solar;
Mid-IR	<i>Mid-wavelength infrared;</i>
N_{Ly}	Fluxo de fótons do contínuo Lyman ;
NIR	<i>Near Infrared;</i>
NGC	<i>New General Catalogue;</i>
OPD	Observatório Pico dos Dias;
pc	Parsec, unidade de distância astronômica;
PSF	<i>Point Spread Function;</i>
pxl	Pixel;
R	Distância galactocêntrica;
R_V	Razão entre a extinção total e a seletiva à banda V ;
RCW	Catálogo de regiões H II (Rodgers et al., 1960);
RMS	<i>Root Mean Square;</i>
SED	<i>Spectral energy distribution;</i>
v_{LSR}	Velocidade radial em relação ao LSR;
W_λ	Largura equivalente de linhas espectrais;
YSO	<i>Young stellar object;</i>

Capítulo 1

Introdução

O disco da Galáxia é constituído por estrelas, gás e poeira. O gás interestelar é composto basicamente por hidrogênio e hélio, predominando o hidrogênio neutro. Somando uma abundância menor que 1%, encontram-se, ainda, os demais elementos químicos, em astronomia, denominados metais. Cerca de 1% da massa interestelar é formada por partículas de poeira congelada, denominadas grãos interestelares.

O imageamento da Via-Láctea nos mais diversos comprimentos de onda do espectro eletromagnético mostra que a matéria congelada não está distribuída uniformemente em seu disco. A maior parte deste material se encontra nos braços espirais, onde também se distribui de forma não-homogênea, acumulando-se de forma mais densa em algumas áreas e formando o que chamamos de nuvem. Quando uma grande nuvem de gás sofre alguma perturbação, parte dessa matéria pode se acumular, tornando a região muito mais densa do que o gás que a circunda. A atração gravitacional faz com que a matéria comece a se concentrar, tornando a nuvem cada vez mais densa e, assim, com o progressivo acúmulo de massa, tanto pressão como temperatura se tornam cada vez mais elevadas, de modo que, se a nuvem de gás possuir massa o bastante, a temperatura dessa região eleva-se a níveis capazes de proporcionar a ignição de reações de fusão no centro dessa massa, formando uma estrela.

Uma mesma nuvem de gás pode gerar várias estrelas e estas irão compor um sistema ligado gravitacionalmente que denominamos aglomerado estelar. Este aglomerado possui estrelas de diferentes massas e, portanto, de diferentes temperaturas superficiais. Contudo, a probabilidade de que uma estrela se forme diminui com a respectiva massa (Salpeter, 1955), fazendo com que a formação de estrelas muito massivas (dezenas de massas solares) seja um evento pouco frequente se comparado com a formação de estrelas como o Sol. Da mesma forma, quanto mais massivo é o objeto, mais rapidamente ele queima seu combustível nuclear e evolui para outros estágios.

As duas considerações acima nos mostram que a primeira dificuldade no estudo de estrelas massivas é simplesmente encontrá-las. Nesse sentido, considerando que essas

estrelas evoluem num intervalo de tempo relativamente curto, a busca por esses objetos costuma ser restrita a regiões de formação estelar. Além disso, como estrelas massivas são também objetos com alta temperatura superficial ($\sim 50\,000\text{ K}$), seu contínuo de emissão é bastante intenso na região ultravioleta do espectro eletromagnético, o que vem a ionizar o gás em seu entorno, formando o que denominamos região H II.

As regiões H II estão entre os principais traçadores da estrutura espiral da Galáxia. O estudo da população estelar de regiões H II gigantes fornece informações sobre função de massa inicial e taxa de formação estelar. As estimativas de distância e velocidade radial desses objetos fornecem informações sobre a estrutura espiral e sobre a cinemática da Galáxia. Finalmente, o estudo das propriedades físicas e químicas do gás, unido às estimativas de distância (e, portanto, estimativas das posições desses objetos no plano galáctico), é essencial para a obtenção dos gradientes galácticos de abundância química.

Nem mesmo o número de braços espirais e a forma dessas estruturas que compõe a Via-Láctea estão bem estabelecidos. O avanço da instrumentação e o conseqüente acréscimo de medidas, bem como o lançamento de novos satélites artificiais, visando completar *surveys* de todo céu em diferentes faixas do espectro eletromagnético, reacenderam essas discussões nos últimos anos, levando a uma nova concepção de estrutura para a Via-Láctea baseada somente em dois braços espirais bastante simétricos, com o Sol habitando uma região bastante rarefeita localizada entre essas estruturas. Esta concepção ainda é bastante recente e pouco discutida. Uma abordagem mais detalhada é encontrada em Dame & Thaddeus (2011).

Diversos estudos ópticos, fotométricos e espectroscópicos, investigando o conteúdo estelar de regiões H II foram publicados nas últimas décadas (Georgelin et al., 1973; Johnson, 1973; Moffat et al., 1979; Lahulla, 1987; Brand & Wouterloot, 1988; Hunter & Massey, 1990; Russeil et al., 2007). No entanto, estudos que investiguem regiões H II relativamente pequenas, ionizadas por uma ou por grupos pouco numerosos de estrelas, estão, ainda, longe de serem suficientemente abrangentes. Muitos objetos têm estimativas de distância altamente discrepantes (e.g. RCW 87, em Georgelin et al., 1987 e Borissova et al., 2006) e, até mesmo, a natureza de algumas dessas nebulosas de emissão ainda não é clara ou não foi confirmada com segurança. De fato, alguns objetos por muitas décadas tratados como regiões H II foram recentemente classificados como remanescentes de supernova (RCW 59, Stupar et al., 2008) ou como nebulosas planetárias (RCW 24 e RCW 69, Frew et al., 2006). Outros tantos objetos permanecem praticamente inexplorados. A região H II NGC 2579, por exemplo, até recentemente era tratada como nebulosa planetária ou nebulosa de reflexão, enquanto que, de fato, é uma região H II de tamanho angular $\sim 1' \times 1'$ que apresenta alto brilho superficial e é ionizada por quatro estrelas anãs do tipo O, conforme foi verificado por Copetti et al. (2007). Estes autores também mostraram que NGC 2579 é um objeto externo à órbita solar, localizado a uma distância galactocêntrica de $12.8 \pm 0.7\text{ kpc}$, sendo, assim, a mais distante região H II Galáctica para a qual se obteve

determinações diretas de abundâncias químicas.

Com o desenvolvimento da instrumentação, objetos mais distantes ou com extinção visual muito elevada, alcançando 10 a 20 magnitudes, puderam finalmente ser explorados através de observações em comprimentos de onda algumas ordens de grandeza maiores que no óptico. Em $\lambda = 2 \mu\text{m}$, por exemplo, a extinção atinge apenas 10% da magnitude da extinção no visual. Por esta razão, nas últimas duas décadas algumas associações estelares ionizantes, fortemente obscurecidas pela extinção do meio interestelar, foram intensamente estudadas através de observações similares no infravermelho próximo (e.g. Hanson et al., 1997; Blum et al., 2000; Deharveng et al., 2000; Figuerêdo et al., 2002; Bik et al., 2003; Borissova et al., 2006; Moisés et al., 2011).

A região de Norma revela-se como uma das mais interessantes e promissoras regiões do plano galáctico para a investigação dessas formações ionizantes, uma vez que a linha de visada intercepta três braços espirais (Sagittarius-Carina, Scutum-Crux e Norma), ocultando diversas associações ionizantes devido à extinção do meio interestelar. Além de algumas dezenas de objetos ópticos identificados por Rodgers et al. (1960), detecções do contínuo rádio de regiões H II realizadas por Caswell & Haynes (1987) indicaram a existência de mais algumas dezenas de objetos nessa direção. Algumas dessas associações estelares obscurecidas foram estudadas em detalhe na última década (Roman-Lopes et al. 2003; Roman-Lopes & Abraham 2004; Russeil et al. 2005; Skinner et al. 2009; Chavarría et al. 2010; Moisés et al., 2011). A extinção visual nessa direção pode alcançar valores tão altos quanto $A_V \sim 20$ magnitudes. Além disso, evidências de formação estelar recente na direção de Norma foram fornecidas quando da detecção de linhas moleculares de CO e CS (e.g. Bronfman et al. 1996), as quais só podem ser observadas em nuvens moleculares de alta densidade. Da mesma forma, masers de metanol oriundos de regiões H II ultra-compactas foram detectados por Ellingsen et al. (1996) e reforçaram essa hipótese.

Neste trabalho, apresentamos um estudo óptico do conteúdo estelar de nove regiões H II Galácticas com distâncias desconhecidas ou com valores publicados discrepantes. Nesse sentido, realizamos fotometria UBV de campos medindo $\sim 11' \times 11'$ centrados nos alvos e, posteriormente, espectroscopia no óptico das estrelas selecionadas por meio da análise do diagrama $(U - B)$ vs. $(B - V)$, com o objetivo de estimar as distâncias da nebulosa ionizada. Estimativas do fluxo de fótons do contínuo Lyman (N_{Ly}) calculadas diretamente do fluxo medido em $H\beta$ e no contínuo rádio são, também, computadas e comparadas com a soma das contribuições de cada estrela ionizante encontrada, a fim de avaliar a completeza da amostra de estrelas massivas classificadas. Entre os objetos mais obscurecidos pela extinção interestelar da região de Norma, apresentamos aqui um estudo do conteúdo estelar da região leste do grande complexo de regiões H II brilhantes em radiofrequências, denominado GAL 331.5-00.1. A área estudada engloba os aglomerados infravermelhos [DBS2003] 156 e [DBS2003] 157, respectivamente associados às regiões H II GAL 331.11-00.51 e GAL 331.31-00.34. Para estas regiões, obtivemos fotometria JHK de todas as

fontes detectadas em campos contendo integralmente cada aglomerado, bem como espectros na faixa de 1.25 a 2.21 μm de amostras de estrelas selecionadas via fotometria como potenciais estrelas ionizantes das regiões H II associadas. Com estes dados, uma primeira estimativa de distância espectrofotométrica pode ser realizada para cada região, o que permitiu determinar outras potenciais fontes ionizantes dos campos observados e verificar se as duas sub-regiões estudadas estão fisicamente associadas ou apenas em direções angulares semelhantes. Por fim, o trabalho também visou identificar e classificar os objetos estelares jovens, brilhantes nos infravermelhos próximo e médio, para assim demarcar regiões de formação estelar recente.

Capítulo 2

Classificação espectral e determinação de distâncias de estrelas de nove regiões H II galácticas com $-65^\circ < \delta(\text{J2000}) < -35^\circ$

Neste capítulo, apresentamos resultados da fotometria UBV e da espectroscopia no óptico de estrelas ionizantes de 9 regiões H II observáveis de março a junho no hemisfério sul, suficientemente brilhantes no óptico, e que, até esta data, não tinham suas distâncias bem determinadas. Classificações espectrais já publicadas na literatura foram também empregadas nesse estudo. A extinção visual A_V foi estimada diretamente pelo método das diferenças de cores, o que possibilitou uma avaliação ponto a ponto da razão entre a extinção total e a seletiva à banda V (R_V), que mostrou grande variação inclusive na direção de alvos de uma mesma nebulosa. As distâncias das regiões H II foram então estimadas como a mediana das paralaxes espectroscópicas de suas estrelas ionizantes. O estudo apresentado neste capítulo é baseado no trabalho publicado em Pinheiro et al. (2010).

2.1 Dados observacionais

2.1.1 Fotometria UBV

Imagens diretas nas bandas U , B e V foram obtidas com o telescópio de 0.6 m, Boller & Chivens, no Observatório Pico dos Dias (OPD), localizado em Brasópolis, MG, Brasil. As observações foram realizadas em abril de 2005, maio de 2007 e março de 2009. Dados de 2005 e 2007, usados no trabalho de mestrado (Pinheiro, 2007), são aqui reanalisados e unidos a dados fotométricos mais completos. Os dados obtidos em 2009 substituíram observações anteriores cujas fotometrias apresentaram valores inconsistentes. Para evitar

Tabela 2.1: Lista de observações fotométricas

Região H II	Exposições (s)			Data
	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	
RCW 55	3 × 500	4 × 90	3 × 60	26/05/2007
NGC 3503		5 × 450	5 × 240	13/04/2005
		5 × 120	5 × 60	16/03/2009
RCW 87		5 × 450	5 × 240	14/04/2005
	9 × 500	5 × 500	3 × 300	24/04/2007
RCW 98	6 × 500	9 × 120	10 × 60	25/05/2007
	6 × 500	5 × 100	7 × 60	26/05/2007
RCW 99	6 × 500	5 × 120	5 × 60	25/05/2007
†Gum 61	9 × 500	5 × 200	5 × 100	24/05/2007
†Gum 64a	4 × 500	5 × 120	5 × 60	25/05/2007

†Parte de NGC 6334.

a saturação das estrelas mais brilhantes dos aglomerados, múltiplas exposições com tempo reduzido foram tomadas em cada filtro. *Flat-fields* de cúpula e exposições de *bias* foram realizadas no início e no final de cada noite. Imagens de campos contendo estrelas padrão indicadas por Landolt (1992) foram tomadas sempre nas três bandas estudadas a fim de realizar a calibração fotométrica. Quando presentes nesses campos, estrelas padrão secundárias medidas por Galadí-Enríquez et al. (2000) também foram usadas.

Uma lista detalhada das observações fotométricas está apresentada na Tabela 2.1. Foram observados campos com tamanho angular $\sim 11' \times 11'$, centrados nas coordenadas dos objetos listados na coluna 1. O *seeing* típico variou de 1.5 a 2.0 segundos de arco. A redução dos dados foi executada com software IRAF e seguiu procedimentos padrão adotados para fotometria de campo rico. Esses procedimentos estão detalhados em Pinheiro (2007).

A fotometria *UBV* foi limitada a estrelas com $V \leq 18$ mag, evitando, assim, a análise de dados com erros fotométricos maiores que 0.5 mag. Estrelas com $13 \leq V \leq 14$ apresentaram erros fotométricos médios de $\sigma_V = 0.019 \pm 0.011$, $\sigma_{B-V} = 0.026 \pm 0.015$ e $\sigma_{U-B} = 0.024 \pm 0.012$. Analisando diagramas cor-cor e cor-magnitude, estrelas detectadas nas três bandas *UBV* foram pré-classificadas e aquelas com $V \leq 14$ mag foram selecionadas para subsequente espectroscopia.

2.1.2 Espectroscopia

Espectros de fenda longa foram obtidos nos anos de 2008 e 2009 usando um espectrógrafo Cassegrain acoplado aos telescópios de 1.6 m, Perkin-Elmer, e de 0.6 m, Boller

Tabela 2.2: Lista de observações espectroscópicas

Estrela	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	Telesc.	Data	Faixa espectral (\AA)	Rede (linhas/mm)	Escala ("'/pxl)	Dispersão $\text{\AA}/\text{pxl}$	Resolução espectral (\AA)	Tempo de exposição (s)
Bran 186-1	08 ^h 48 ^m 43.14 ^s	-42°54'18.3"	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	5.0	2×600
			1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
Bran 186-2	08 48 48.14	-42 54 20.9	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×600
			1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
Bran 186-3	08 48 39.05	-42 53 54.0	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
Bran 186-4	08 48 35.47	-42 54 31.5	1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
Bran 186-5	08 48 43.31	-42 54 33.1	1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
NGC 2626-1	08 35 31.44	-40 40 19.1	1.6 m	2009 Mar 27	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 32-1	08 44 40.33	-41 16 37.9	1.6 m	2009 Mar 27	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×100
RCW 55-1	10 56 38.87	-63 01 02.8	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
RCW 55-2	10 56 40.31	-63 01 04.5	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
RCW 55-3	10 56 32.20	-62 59 58.5	1.6 m	2008 Mar 08	4000–6000	600	0.51	1.05	5.0	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×1200
RCW 55-4	10 56 42.20	-63 01 16.7	1.6 m	2008 Mar 08	4000–6000	600	0.51	1.05	5.0	1×600
			1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 55-5	10 56 40.16	-62 58 46.3	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
RCW 55-6	10 56 27.00	-63 00 00.4	1.6 m	2008 Mar 08	4000–6000	600	0.51	1.05	5.0	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 55-7	10 56 32.28	-63 00 47.5	1.6 m	2008 Mar 08	4000–6000	600	0.51	1.05	5.0	1×1000

Tabela 2.2: *continuação.*

Estrela	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	Telesc.	Data	Faixa espectral (\AA)	Rede (linhas/mm)	Escala ("'/pxl)	Dispersão $\text{\AA}/\text{pxl}$	Resolução espectral (\AA)	Tempo de exposição (s)
RCW 55-7			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
NGC 3503-1	11 01 17.17	-59 51 01.9	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
NGC 3503-2	11 01 17.80	-59 50 30.3	1.6 m	2008 Feb 01	4000–5000	1200	0.51	0.50	2.7	1×1500
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
NGC 3503-3	11 01 18.24	-59 50 57.8	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
NGC 3503-4	11 01 19.25	-59 50 56.6	1.6 m	2009 Mar 24	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
NGC 3503-5	11 00 59.27	-59 50 30.9	1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1200
RCW 87-1	15 05 09.78	-57 32 18.6	1.6 m	2006 Apr 24 [†]	3900–7800	300	0.51	2.26	8.8	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 87-2	15 05 36.05	-57 32 58.8	1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 87-3	15 05 15.28	-57 31 25.1	1.6 m	2009 Mar 29	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
RCW 98-1	15 55 39.56	-54 38 36.5	1.6 m	2008 Mar 07	4000–6000	600	0.51	1.05	5.0	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×1000
RCW 98-2	15 55 40.97	-54 41 13.9	1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×2000
RCW 98-3	15 55 42.64	-54 39 01.8	1.6 m	2009 Mar 26	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	3×2000
RCW 99-1	15 59 38.44	-53 45 15.0	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×1200
			1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×2400
RCW 99-2	15 59 38.74	-53 44 44.1	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1800
RCW 99-3	15 59 54.52	-53 44 46.8	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	2×1800
RCW 99-4	15 59 31.16	-53 44 32.5	1.6 m	2009 Mar 25	4015–4965	1200	0.56	0.50	2.7	1×900
NGC 6334-2	17 19 46.16	-36 05 52.2	0.6 m	2008 Aug 01	3950–4950	1200	0.56	0.50	2.7	2×2000
NGC 6334-5	17 20 05.09	-35 56 41.7	0.6 m	2008 Aug 04	3950–4950	1200	0.56	0.50	2.7	2×2000

[†] Dados de arquivo.

& Chivens, no OPD. A Tabela 2.2 traz uma lista detalhada dessas observações, especificando data de realização, telescópio, rede, faixa espectral, escala espacial, dispersão, resolução e tempo de exposição. O detector usado foi um CCD Marconi de 2048×2048 pixels. Apesar de diferentes configurações instrumentais terem sido utilizadas, procuramos garantir que todos os espectros obtidos cobrissem a faixa de 4000 a 4900 Å, classicamente utilizada para classificação espectral de estrelas OB. Os espectros apresentaram razão sinal-ruído variando de 70 a 400, com valor médio em torno de 200.

A rotina de observações seguiu procedimentos usuais. *Flat-fields* de cúpula e exposições de *bias* foram realizadas no início e no final de cada noite. Dois espectros de lâmpadas de He-Ar usadas para calibração em comprimento de onda foram tomados antes e após cada exposição. A fenda foi orientada na direção Leste-Oeste, com tamanho angular projetado no plano do céu de $\sim 1.5'' \times 320''$, geralmente centrado no alvo. Dessa forma, foi possível a extração simultânea de espectros nebulares em ambos os lados da estrela e, com isso, pôde-se subtrair com segurança a contribuição nebulosa presente no espectro estelar.

Os dados foram reduzidos e analisados com o software IRAF, seguindo procedimentos padrão adotados na redução de espectros de fenda longa no óptico, tais como correções de *bias* e *flat-fields*, extração de raios cósmicos, extração do espectro estelar (1D) e calibração em comprimento de onda. Os espectros foram normalizados utilizando a tarefa **splot** do pacote **onedspec** do IRAF, dividindo-os por uma função spline cúbica com ordem fixada entre 6 e 10. Os espectros normalizados serão apresentados e discutidos na seção 2.2.1.

2.2 Métodos

A paralaxe espectroscópica de estrelas ionizantes e a estimativa de distância via velocidade radial, estimada pelo deslocamento Doppler das linhas de emissão do espectro nebuloso, são as principais técnicas usadas nas determinações de distâncias de regiões H II. A chamada distância fotométrica, obtida do método da paralaxe espectroscópica, é considerada mais confiável que a distância cinemática, uma vez que, para esta última, deve-se adotar um modelo para curva de rotação da Galáxia e assumir que os objetos em estudo seguem órbitas circulares com velocidades coerentes com este modelo. No entanto, já há algumas décadas se têm verificado que vários objetos apresentam grandes desvios do movimento circular (e.g., Brand & Blitz, 1993). Além disso, em caso de expansão assimétrica do gás ionizado, a velocidade radial medida em poucos pontos pode não representar corretamente a verdadeira velocidade radial do complexo de formação estelar. Da mesma forma, para regiões interiores ao raio galactocêntrico, um único valor medido para a velocidade radial pode corresponder a dois objetos diferentes devido a efeitos de projeção (detalhes em Brand & Blitz, 1993; Russeil, 2003).

A primeira dificuldade da aplicação do método da paralaxe espectroscópica é a identificação das estrelas fisicamente associadas à região H II pois, em geral, centenas de estrelas

de campo são encontradas na direção da nebulosa. Por outro lado, uma vez que estrelas massivas raramente são encontradas fora de regiões de formação estelar, as melhores candidatas são certamente as estrelas mais quentes do campo. Nesse sentido, a seleção apropriada dos alvos usando diagramas cor-cor e/ou diagramas cor-magnitude nos garantiu um alto índice de acerto entre os alvos escolhidos. De fato, apenas 3 dos 23 dos alvos selecionados via fotometria UBV não apresentaram características de estrelas quentes.

2.2.1 Classificação espectral

Espectros de estrelas OB são facilmente identificados pela presença de linhas de absorção do He I. A presença de linhas do He II é um indicativo de estrelas tipo O. Estes foram os critérios iniciais utilizados na classificação espectral dos objetos desse trabalho. Em seguida, medimos larguras equivalentes (W_λ) de linhas intensas do He I, do He II (quando presente) e da série de Balmer do H e comparamos com valores compilados por Jaschek & Jaschek (1990), reduzindo a pesquisa a dois ou três subtipos espectrais. As linhas de Balmer têm W_λ crescente em toda a sequência O–B, atingindo valores máximos em estrelas A0. As intensidades das linhas do He I, no entanto, crescem com o subtipo espectral em estrelas tipo O, atingem seu máximo em estrelas B2 e desaparecem nos subtipos mais tardios das estrelas tipo B. Já as linhas do He II são altamente dependentes da temperatura e, portanto, são fortes em estrelas tipo O recentes, desaparecendo em estrelas B0 ou B0.5.

Especificamente para estrelas tipo O, a razão $W_\lambda(\text{He I } \lambda 4471)/W_\lambda(\text{He II } \lambda 4541)$, fortemente decrescente com a temperatura, e o produto $W_\lambda(\text{He I } \lambda 4388) \times W_\lambda(\text{He II } \lambda 4686)$, decrescente com a luminosidade, foram também utilizados de acordo com os trabalhos de Mathys (1988, 1989). Por fim, a classificação foi refinada por comparação direta com espectros do atlas digital de Walborn & Fitzpatrick (1990), observando características específicas de cada subtipo espectral descritas pelos autores. A identificação de estrelas B tardias e estrelas mais frias foi executada com base nas características espectrais listadas por Jaschek & Jaschek (1990). Os espectros finais, combinados e normalizados, estão apresentados na Figura 2.1 em ordem decrescente de temperatura.

2.2.2 Correção do avermelhamento e determinação das distâncias

A maior fonte de erro nas determinações de distância via fotometria UBV está na correção do avermelhamento A_V . Na maioria dos casos, o valor de A_V é estimado do excesso de cor $E(B - V)$, adotando-se um valor médio para a razão entre a extinção total e a seletiva à banda $R_V = A_V/E(B - V)$, geralmente muito próximo a 3.1 (He et al., 1995). Contudo, a lei extinção em regiões de formação estelar pode ser bastante anômala, recaindo em valores de R_V bastante distintos, em geral muito maiores ($\sim 50\%$) que a média (Mathis, 1990; Papaj et al., 1991; Megier et al., 1997; Patriarchi et al., 2001).

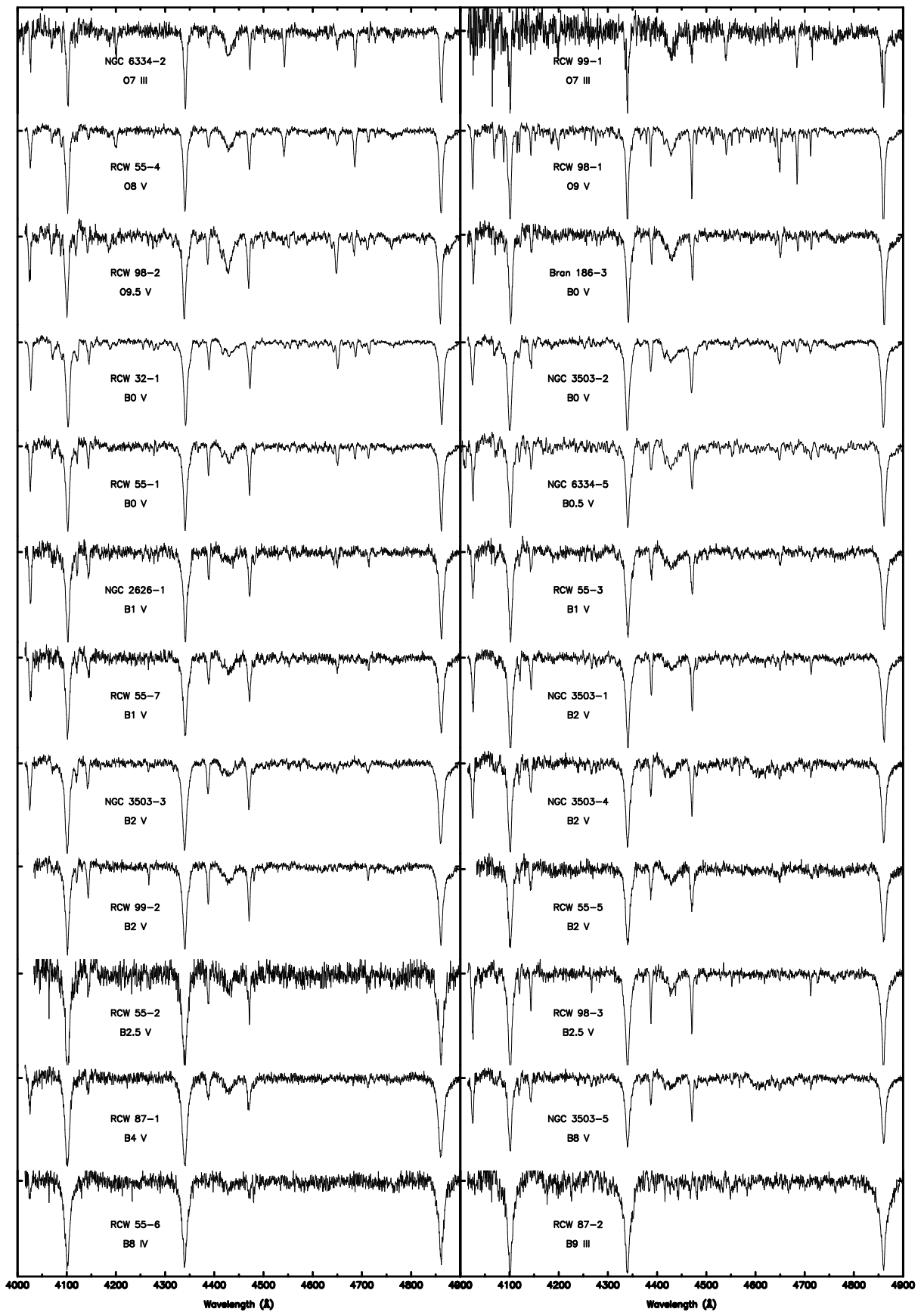


Figura 2.1: Espectros combinados e normalizados das estrelas classificadas como tipo O ou B.

Assim, o uso de um valor “típico” de R_V , bastante adequado para estrelas de campo, pode introduzir grandes erros nas estimativas de distâncias de estrelas de regiões H II.

Nesse trabalho, optamos por avaliar o avermelhamento A_V diretamente pelo método das diferenças de cores, comparando a magnitude aparente V e as magnitudes J , H e K_s do catálogo 2MASS (Cutri et al., 2003) de cada estrela com os índices de cor intrínsecos aos respectivos tipos espectrais. Neste método, parte-se do excesso de cor detectado ao se medir a magnitude aparente de um objeto em uma dada banda centrada em λ e na banda V , expresso por

$$E(\lambda - V) = [(\lambda - V) - (\lambda - V)_0] = A_\lambda - A_V, \quad (2.1)$$

em que $(\lambda - V)$ é o índice de cor medido, $(\lambda - V)_0$ é o índice de cor intrínseco ao tipo espectral da estrela observada, inferido após a classificação espectroscópica, enquanto que A_λ e A_V indicam as magnitudes das extinções nas bandas λ e V . Rearranjando o lado direito da equação, encontra-se

$$E(\lambda - V) = A_V \left[\frac{A_\lambda}{A_V} - 1 \right]. \quad (2.2)$$

A quantidade A_λ/A_V é denominada curva de extinção e representa por $R_L(\lambda)$.

Observando a variação de $E(\lambda - V)$ como função $[R_L(\lambda) - 1]$, ajustamos

$$E(\lambda - V) = A_V [R_L(\lambda) - 1], \quad (2.3)$$

pelo método dos mínimos quadrados, com λ corresponde às magnitudes aparentes nos filtros J , H e K_s do 2MASS e os valores de $R_L(\lambda) = A_\lambda/A_V$ são aqueles tabelados por Rieke & Lebofsky (1985). Já as cores intrínsecas $(J - V)_0$, $(H - V)_0$ e $(K - V)_0$ são aquelas determinadas por Wegner (1994).

A curva de extinção de Rieke & Lebofsky (1985) e outras determinações similares presentes na literatura são pouco divergentes entre si e razoavelmente bem descritas por uma lei de potência do tipo $A(\lambda) \sim \lambda^{-\alpha}$, com expoente α entre 1.5 e 2.0. Contudo, Fitzpatrick & Massa (2009) propuseram que esta pode não ser uma lei de extinção universal mas, pelo contrário, ser dependente da linha de visada. Mesmo assim, a aproximação por lei de potência seria ainda válida, porém com diferentes valores de α de acordo com a direção observada. Baseando-se na dispersão de aproximadamente 20% nos valores de α (c.f. Fitzpatrick & Massa, 2009), nós encontramos que a adoção da curva de extinção usual referida na Equação 2.3 não levaria a erros nas distâncias superiores a aproximadamente 20%.

Tabela 2.3: Classificação espectral, dados fotométricos, extinção e distância heliocêntrica de cada estrela selecionada via fotometria

Denominação dos objetos			Classificação espectral			V	$(B - V)$	$E(B - V)$	A_V	R_V	d (kpc)
Fotometria	2MASS	Simbad	Aqui	Lit.	Referência						
Bran 186-1	J08484314-4254183	Cl* Trumpler 10 STOCK 724	Fria								
Bran 186-2	J08484813-4254208	Cl* Trumpler 10 STOCK 732	Fria								
Bran 186-3	J08483905-4253539	Cl* Trumpler 10 STOCK 711	B0 V			10.80	0.50	0.76	2.28 ± 0.90	3.00	3.05 ± 1.45
Bran 186-4	J08483546-4254315	Cl* Trumpler 10 STOCK 694	F8:								
Bran 186-5	J08484331-4254330		Fria								
NGC 2626-1	J08353144-4040190	CD-40 4427	B1 V	B1 V	Herbst (1975)	9.92	0.47	0.70	2.73 ± 0.37	3.90	1.20 ± 0.34
				B1 IV	Crampton (1971)						
RCW 32-1	J08444032-4116378	HD 74804	B0 V	B0 V	Crampton (1971)	7.32	0.33	0.59	2.10 ± 0.23	3.56	0.67 ± 0.17
				B4 II	Houk (1978)						
				B5 V	Buscombe (1969)						
				B1 V	Georgelin et al. (1973)						
NGC 3503-1	J11011717-5951019		B2 V	B2 V	Herbst (1975)	11.40	0.20	0.41	1.55 ± 0.33	3.75	2.90 ± 0.80
NGC 3503-2	J11011780-5950302		B0 V	B0 V	Herbst (1975)	10.49	0.22	0.48	2.10 ± 0.55	4.37	2.88 ± 0.99
NGC 3503-3	J11011823-5950578	Cl Pismis 17 3	B2 V	B2 V	Herbst (1975)	11.40	0.22	0.43	1.60 ± 0.17	3.73	2.85 ± 0.70
NGC 3503-4	J11011924-5950565	CPD-59 2945s	B2 V	B2 V	Herbst (1975)	11.37	0.23	0.44	1.62 ± 0.06	3.72	2.78 ± 0.65
NGC 3503-5	J11005926-5950308		B8 V			13.03	0.38	0.49	1.55 ± 0.10	3.14	2.17 ± 0.51
RCW 55-1	J10563886-6301028	VdBH 45c	B0 V	B0 V	Avedisova et al. (1984)	11.51	0.44	0.70	2.07 ± 0.35	2.97	4.66 ± 1.31
RCW 55-2	J10564031-6301044	VdBH 45 F	B2.5 V			13.81	0.55	0.75	2.39 ± 0.16	3.19	4.84 ± 1.18
RCW 55-3	J10563219-6259584	VdBH 45 K	B1 V			12.14	0.48	0.71	2.01 ± 0.28	2.83	4.64 ± 1.23
RCW 55-4	J10564220-6301166	VdBH 45d	O8 V	O6	Avedisova et al. (1984)	10.69	0.45	0.73	2.22 ± 0.50	3.03	4.36 ± 1.42
RCW 55-5	J10564016-6258463		B2.5 V			12.36	0.58	0.78	2.10 ± 0.47	2.69	2.84 ± 0.90
RCW 55-6	J10562699-6300003		B8 IV			13.21	0.51	0.61	1.67 ± 0.32	2.73	2.80 ± 0.77
RCW 55-7	J10563227-6300475	VdBH 45b	B1 V	B1 Vp	Herbst (1975)	11.31	0.48	0.71	2.13 ± 0.33	3.00	2.99 ± 0.83
RCW 87-1	J15050977-5732186		B4 V			11.61	0.41	0.57	2.30 ± 0.13	4.04	1.39 ± 0.33
RCW 87-2	J15053604-5732587		B9 III			11.84	0.54	0.61	2.31 ± 0.16	3.81	1.06 ± 0.26
RCW 87-3	J15051528-5731251		Cold								
RCW 98-1	J15560198-5440532	HIP 77994	O9 V	O9.5 IV	Crampton (1971)	10.49	0.47	0.75	2.86 ± 0.11	3.79	2.62 ± 0.62
RCW 98-2	J15554096-5441138	[OM80] 140	O9.5 V			12.41	0.81	1.08	4.52 ± 0.31	4.18	2.61 ± 0.71
RCW 98-3	J15554264-5439018		B2.5 V			12.95	0.57	0.77	2.90 ± 0.12	3.77	2.58 ± 0.61
RCW 99-1	J15593844-5345149		O7 III			13.22	1.69	1.98	6.12 ± 1.30	3.09	3.57 ± 2.29
RCW 99-2	J15593874-5344440		B2 V			12.43	0.47	0.68	2.16 ± 0.51	3.16	3.53 ± 1.17
RCW 99-3	J15595452-5344468		A7: V:								
RCW 99-4	J15593115-5344325		F3 V								
NGC 6334-1	J17194504-3605469	HD 319703B		O6.5 V	Walborn (1982)	11.47	1.10	1.39	5.42 ± 1.00	3.89	1.62 ± 0.84
NGC 6334-2	J17194616-3605522	HD 319703A	O7 III	O7.5 III	Walborn (1982)	10.73	1.02	1.31	5.13 ± 0.26	3.92	1.79 ± 0.47
NGC 6334-3	J17205268-3604206	HD 156738		O6.5 III	Walborn (1982)	9.37	0.86	1.15	3.94 ± 0.24	3.41	1.70 ± 0.44
NGC 6334-4	J17193042-3542362	HD 319699		O5 V	Walborn (1982)	9.63	0.77	1.07	3.66 ± 0.45	3.42	1.88 ± 0.59
NGC 6334-5	J17200509-3556416	LS 4087	B0.5 V			11.22	1.18	1.42	3.79 ± 0.53	2.67	1.69 ± 0.56
NGC 6334-6	J17205061-3551459	HD 319702		O8 III	Walborn (1982)	10.13	0.90	1.17	4.00 ± 0.10	3.42	2.19 ± 0.52

A distância fotométrica d foi calculada adotando a calibração de magnitude absoluta M_V como função dos respectivos tipos espectrais e luminosidades dada por Russeil (2003). Os erros nessas distâncias foram estimados pela equação

$$\sigma_d = \frac{\ln 10}{5} d \sqrt{\sigma_V^2 + \sigma_{M_V}^2 + \sigma_{A_V}^2}, \quad (2.4)$$

em que σ_V , σ_{M_V} e σ_{A_V} são as incertezas nas magnitudes aparentes, absolutas e no avermelhamento. Os valores de σ_{M_V} e σ_{A_V} são as fontes de erro dominantes, uma vez que $\sigma_{M_V} \approx 0.5$ (Russeil, 2003) e, na maioria dos casos, $0.1 < \sigma_{A_V} < 1.0$, enquanto que σ_V se mantém inferior a 0.05 magnitudes.

2.3 Resultados e discussões

A Tabela 2.3 apresenta os resultados da fotometria e da espectroscopia de cada estrela selecionada. Nas colunas 1, 2 e 3 é feita a correspondência entre a identificação adotada neste trabalho, os identificadores do catálogo 2MASS¹ e as nomenclaturas da base de dados do Simbad². As colunas 4, 5 e 6 comparam a classificação estelar deste trabalho com classificações encontradas na literatura. Nas colunas 7 e 8 são listadas as magnitudes aparentes na banda V e as cores ($B - V$) de cada estrela. O dados fotométricos de Bran 186, NGC 2626 e RCW 32 foram extraídos de Stock (1984), Denoyelle (1977) e Corben et al. (1972), respectivamente. Nas próximas três colunas, listamos os valores de excesso de cor, avermelhamento calculado segundo a Equação 2.3 e o R_V correspondente. As distâncias heliocêntricas estelares são dadas na coluna 12.

A Tabela 2.4 apresenta a distância fotométrica de cada região H II, valor calculado como a mediana dos valores obtidos para as n estrelas individualmente. Se mais de uma estrela de um mesmo objeto tiveram suas distâncias calculadas, o erro associado foi estimado por $\sqrt{\sum \sigma_i^2 / n(n-1)}$, em que σ_i é o erro na paralaxe espectroscópica de cada estrela. As margens de erro calculadas desse modo retornaram valores na faixa de 13% a 50%, variando em torno de 15% para objetos com três ou mais estrelas estudadas. Por outro lado, os desvios padrão dos valores de distância de diferentes estrelas de uma mesma nebulosa são muito menores, variando entre 1% e 13%. Margens de erro dessa ordem não representam estimativas realísticas, pois não incluem erros sistemáticos, mas denotam a consistência entre as estimativas de distâncias das estrelas de um mesmo aglomerado. Nas seções seguintes, os resultados encontrados para cada objeto serão comparados com dados encontrados na literatura.

Embora estrelas ionizantes de regiões H II ópticas sejam, em geral, bastante destacadas de outras estrelas da sequência principal, algumas vezes essas estrelas encontram-se

¹Two Micron All Sky Survey

²<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Tabela 2.4: Distâncias Heliocêntricas das regiões H II estudadas

Regiões H II	n	d (kpc)	
		Este trabalho	Literatura
Bran 186	1	3.05 ± 1.45	
NGC 2626	1	1.20 ± 0.34	0.95 [1], 1.25 [2]
RCW 32	1	0.67 ± 0.17	0.72 [2], 0.70 [3], 0.77 [4]
NGC 3503	5	2.85 ± 0.37	2.6 [1], 3.5 [5], 4.2 [6]
†RCW 55	7	4.36 ± 0.46	4.3 [7], 3.08 [8]
RCW 87	2	1.23 ± 0.30	7.6 [8]
RCW 98	3	2.61 ± 0.46	2.87 [2], 3.0 [7], 2.8 [9]
RCW 99	2	3.55 ± 1.82	3.54 [7]
NGC 6334	6	1.75 ± 0.26	2.10 [7], 2.3 [10], 1.74 [11]

Referências:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| [1] Herbst (1975), | [2] Crampton & Fisher (1974), |
| [3] Georgelin et al. (1973), | [4] Vogt & Moffat (1975), |
| [5] Kharchenko et al. (2005), | [6] Moffat & Vogt (1975), |
| [7] Avedisova et al. (1984), | [8] Borissova et al. (2006), |
| [9] Yamaguchi et al. (1999), | [10] Walborn (1982), |
| [11] Neckel (1978), | †Veja nota na seção 2.3.5 |

“escondidas” ou altamente obscurecidas por acúmulos locais de poeira. Como exemplo, enquanto as estrelas ionizantes da nebulosa de Órion são facilmente identificadas, na região H II clássica M 17, algumas das estrelas quentes estão ocultadas por uma extinção visual maior que 10 magnitudes (Hanson & Conti, 1995). Com o objetivo de verificar a completeza da amostra de estrelas ionizantes identificadas em cada nebulosa, compilamos os dados mostrados na Tabela 2.5. As colunas 3, 4 e 5 desta tabela comparam estimativas do coeficiente de extinção $C(\text{H}\beta)$ (logaritmo da extinção em $\text{H}\beta$), calculado da fotometria estelar por $C(\text{H}\beta) = 1.5 E(B - V)$, da razão de linhas de emissão nebulares $\text{H}\gamma/\text{H}\beta$ e da comparação entre a densidade de fluxo do contínuo rádio e o fluxo em $\text{H}\beta$. As colunas 6, 7 e 8 comparam o fluxo de fótons do contínuo Lyman N_{Ly} , obtido do fluxo observado em $\text{H}\beta$ e da densidade de fluxo do contínuo rádio em 2.7 GHz (Paladini et al., 2003), com o valor obtido ao se somar as contribuições individuais de cada estrela, conforme

Tabela 2.5: Comparação entre propriedades estelares e nebulares.

Reg. H II	d_{kpc}	$C(\text{H}\beta)$			$\log N_c$ (fótons s^{-1})			$F(\lambda 4959)$	Tipos espec.
		Stars	$\text{H}\gamma/\text{H}\beta$	2.7GHz	Stars	$\text{H}\beta$	2.7GHz	$\text{H}\beta$	
Bran 186	3.05	1.14	1.57		48.02	47.2:	0.16	B0 V	
NGC 3503	2.85	0.67	0.58	2.95	48.03	46.56	48.83	0.04	B0 V, 3×B2 V
RCW 55	4.36	1.07	0.74		48.90	46.82		0.17	B1 V
RCW 87	1.23	2.70	2.89	3.34	45.16	47.44	48.08	0.31	B4 V
RCW 99	3.55	2.97	1.56	2.70	49.36	49.25	48.98	0.28	O7 III, B2.5 V
Gum 64a	1.75	2.13			47.77	47.81			B0.5 V

o trabalho de Schaerer & de Koter (1997). Fluxos integrados da linha $H\beta$, dados por Copetti (2000), foram adotados para todos os objetos, a exceção de Bran 186, para o qual foram usados valores de Acker et al. (1991). Uma comparação entre os tipos espectrais das estrelas ionizantes identificadas em cada região H II e a razão das linhas de emissão $[O III]\lambda 4959/H\beta$, a qual é uma aproximação razoável para o grau de excitação nebular, também é mostrada nas últimas colunas.

Com exceção de RCW 87, as estrelas ionizantes identificadas são capazes de manter a ionização das respectivas regiões H II. As razões $[O III]\lambda 4959/H\beta$ observadas são típicas de nebulosas ionizadas por estrelas tipo B recentes ou tipo O tardias. Nas próximas seções, cada objeto estudado será discutido individualmente.

2.3.1 Bran 186

Bran 186 é um objeto de forma aparentemente circular, com baixo brilho superficial e tamanho angular de $\sim 3'$. Este objeto foi descoberto por Kohoutek (1971) no *Palomar Sky Survey*, quando foi denominado PN K 2-15 e classificado como possível nebulosa planetária ou nebulosa difusa. Bran 186 também aparece como possível nebulosa planetária (ESO 260-8) no ESO/Uppsala *survey* e no *Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae* (PN G263.2+00.4) de Acker et al. 1992.

Com base em uma análise espectroscópica, Kohoutek & Pauls (1994) incluíram PN K 2-15 entre objetos confirmados com nebulosa planetária. Por outro lado, a condição de região H II desse objeto foi fortemente indicada quando da descoberta de um sítio de formação estelar recente na borda leste da região de emissão nebular óptica, a $1.8'$ do centro e contra a fonte IRAS 08470-4243, cujas cores são típicas regiões H II ultracompactas. Detecções de emissão de CO (Wouterloot & Brand, 1989) e *masers* de Metanol e OH (Schutte et al., 1993; Walsh et al., 1998; Caswell, 1998) também indicam formação de estrelas de alta massa. Por fim, Dutra et al. (2003) identificaram um aglomerado estelar embebido na direção de IRAS 08470-4243 e, naquele trabalho, o denominaram [DBS2003] 23.

Entre as cinco estrelas observados no campo de Bran 186, a estrela Bran 186-3 foi classificada como B0 V, sendo, possivelmente, a única fonte de ionização de Bran 186. Uma estrela com este tipo espectral é bastante compatível com o baixo grau de excitação da nebulosa e com a taxa de fótons ionizantes listada na Tabela 2.5. A análise do espectro nebular obtido neste trabalho mostrou $[O III]\lambda 4959/H\beta < 0.17$ e ausência de linhas do hélio, indicando que a maior parte do oxigênio é uma vez ionizado e que o hélio é basicamente neutro. A distância heliocêntrica de 3.05 ± 1.45 kpc obtida para a única estrela ionizante encontrada é compatível com a distância cinemática de 2.5 kpc estimada para a região de formação estelar acima citada, assumindo o valor médio das medidas de velocidade radial na direção objeto $\langle v_{LSR} \rangle = +12.0 \text{ km s}^{-1}$ e usando o modelo de Brand &

Blitz (1993) para a curva de rotação da Galáxia. Observações recentes (veja Deharveng et al., 2005, e referências lá citadas) indicam formação estelar massiva induzida na borda de regiões H II, o que parece ser o caso de Bran 186.

2.3.2 NGC 2626

NGC 2626 é uma nebulosa de reflexão localizada a sudoeste da região H II RCW 27 e iluminada pela estrela CD-40 4427, cuja distância foi aqui estimada em 1.20 ± 0.34 kpc. Para a estrela CPD-40 2663, localizada a $\sim 4'$ do centro de NGC 2626, Gahm & Malmort (1980) encontraram uma distância de 1.26 kpc. Já para HD 73882, estrela ionizante de RCW 27 (tipo espectral O8 V), Georgelin & Georgelin (1970a) estimaram uma distância de 1.13 kpc, enquanto que Crampton & Fisher (1974) encontraram 1.04 kpc.

Ao norte de CD-40 4427, há uma área de formação estelar recente, possivelmente disparada pela expansão de RCW 27 (Mueller & Graham, 2000, Urquhart et al., 2009), cuja nuvem molecular associada aparentemente encobre parte de NGC 2626. A semelhança entre os valores encontrados para as três estrelas indica que RCW 27, NGC 2626 e a região de formação estelar vizinha fazem parte de um mesmo sistema.

2.3.3 RCW 32

Diversas classificações espectrais encontradas na literatura para a estrela HD 74804, principal fonte ionizante de RCW 32, são mostradas na Tabela 2.3. Com base em um espectro combinado com razão sinal/ruído de ~ 350 , nós classificamos esta estrela como B0 V, mesmo resultado encontrado por Crampton (1971). Não foram encontradas na literatura medidas de fluxo em $H\beta$ ou do contínuo rádio que nos permitissem comparar os valores de N_{Ly} previstos para uma estrela B0 V.

2.3.4 NGC 3503

As principais fontes ionizantes de NGC 3503 são três estrelas B2 V e uma estrela B0 V encontradas no centro do compacto aglomerado aberto Pismis 17. As distâncias fotométricas dessas estrelas mostraram-se muito semelhantes, com desvio médio menor que 2%. Os valores de N_{Ly} somados por essas estrelas são bastante compatíveis com os valores esperados. Uma quinta estrela, localizada fora da nebulosidade e observada simultaneamente em uma das exposições de fenda longa, foi classificada como B8 V. A distância desta estrela difere em 24% do valor médio das outras fontes, assim como o valor de $R_V = 3.14$ estimado na sua direção é típico de estrelas de campo e menor que $R_V \geq 3.7$ encontrado na direção da nebulosidade, indicando que esta estrela B pode não estar associada à região H II NGC 3503.

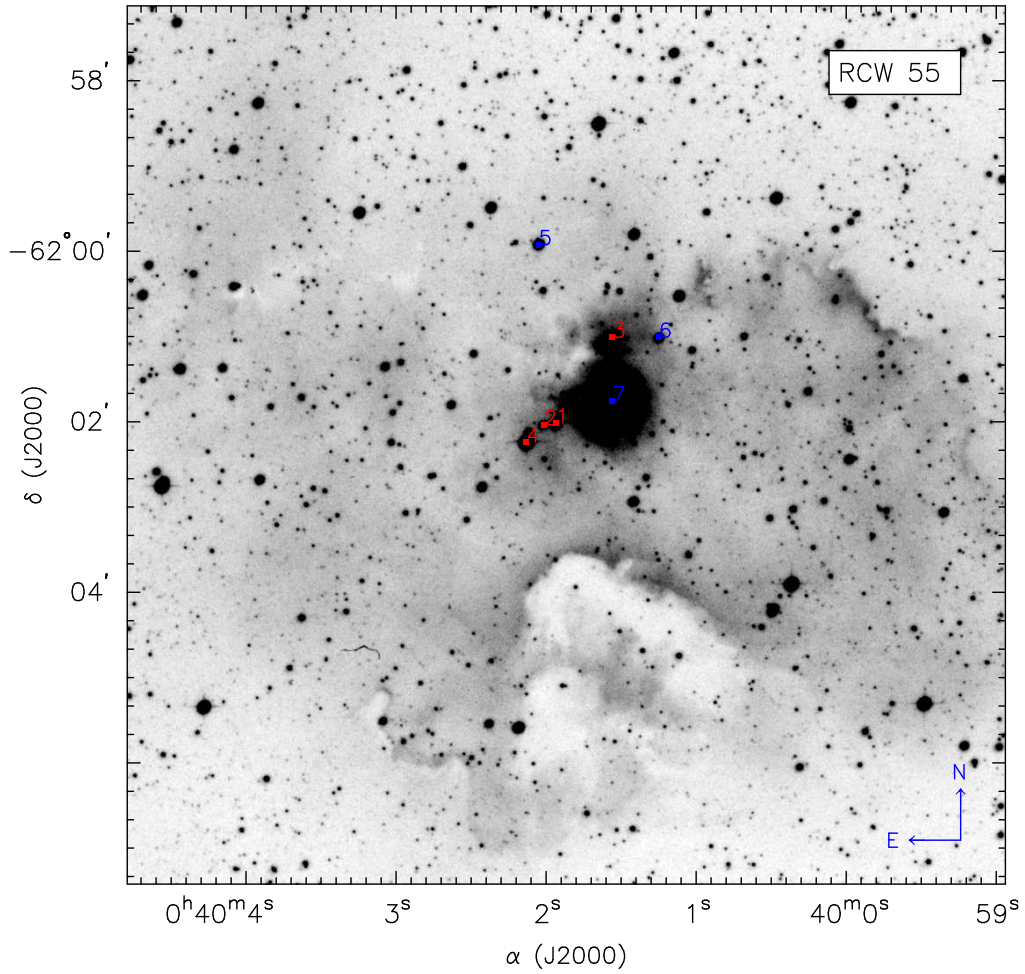


Figura 2.2: Imagem $H\alpha$ de RCW 55. As sete estrelas quentes classificadas neste campo estão numeradas conforme Tabela 2.3. Duas associações ionizantes, sobrepostas e a distâncias heliocêntricas de 2.87 ± 0.59 kpc e 4.65 ± 0.74 kpc, não podem ser descartadas. As estrelas em azul pertenceriam ao grupo mais próximo e aquelas dispostas em vermelho pertenceriam ao grupo mais distante do Sol.

2.3.5 RCW 55

Em RCW 55, encontramos uma estrela O8 V e outras seis estrelas tipo B. Apesar das estimativas de distância para estas estrelas serem, dentro das margens de erro, compatíveis entre si, nós ressaltamos que a existência de dois grupos de estrelas sobrepostos não pode ser descartada. Um desses grupos estaria a uma distância heliocêntrica de 4.65 ± 0.74 kpc, enquanto o outro estaria a 2.87 ± 0.59 kpc. Por outro lado, esta hipótese não é suportada pelos valores de excesso de cor $E(B - V)$, que indicam extinção interestelar bastante similar.

O valor de N_{Ly} somado para todas as estrelas OB identificadas na direção de RCW 55 é superior (duas ordens de magnitude, c.f. Tabela 2.5) ao necessário para manter a ionização da nebulosa. Esta discrepância pode ser causada por altas taxas de fótons do contínuo Lyman escapando da nebulosa ou, até mesmo, por valores de N_{Ly} subestimados. De fato,

o fluxo integrado em $H\beta$ usado nestas estimativas foi integrado numa abertura circular de $1'40''$ de diâmetro centrado em RCW 55-7, localizada no centro da região de maior emissão nebulosa, enquanto que a área total alcança aproximadamente $10'$. Uma extrapolação bastante rudimentar para o fluxo de fótons ionizantes integrado sob toda a nebulosa, com base em numa imagem do AAO/UKST $H\alpha$ survey (Parker et al., 2005) mostrada na Figura 2.2, ainda leva a um valor de N_{Ly} uma ordem de magnitude inferior ao esperado. É possível que algumas das estrelas quentes identificadas na direção de RCW 55 não sejam fontes ionizantes da nebulosa, apesar de pertencerem a mesma associação estelar. É bastante nítido que a parte mais brilhante da nuvem ionizada corresponde as duas estrelas B1 V RCW 55-3 e RCW 55-7 e não a estrela tipo O RCW 55-4. Estas duas estrelas B1 V já seriam suficientes para manter a radiação ionizante estimada.

2.3.6 RCW 87

Duas estrelas da região H II RCW 87, com magnitudes visuais de 11.61 e 11.84, foram classificadas como B4 V e B9 III, resultando numa distância média de 1.19 ± 0.16 kpc. Nenhuma delas se localiza contra a parte mais brilhante da nebulosa e, conforme a Tabela 2.5, essas estrelas não são as suas principais fontes ionizantes.

A Figura 2.3 mostra o diagrama $(B - V)$ vs. V para RCW 87. O conjunto de pontos correspondentes às estrelas observadas na direção de RCW 87 é bastante compatível com a sequência principal projetada usando os valores de avermelhamento e distância calculados para RCW 87-1 e RCW 87-2. Já as estrelas na direção do aglomerado infravermelho [BDB2003] G320.15+00.79 (Bica et al., 2003), localizado contra a região nebulosa de maior emissão, estão destacadas à direita. Por outro lado, assumindo que as estrelas mais obscurecidas são também estrelas da sequência principal, o diagrama cor-cor indica um avermelhamento $A_V = 6.8$ mag, o que coloca estes objetos a mesma distância das estrelas classificadas espectroscopicamente. Sob esta mesma hipótese, a classificação fotométrica indica uma estrela B1 e três estrelas B3 em [BDB2003] G320.15+00.79, o que seria compatível com o valor de N_{Ly} estimado.

Borissova et al. (2006) apresentaram um estudo infravermelho do aglomerado [BDB2003] G320.15+00.79 e, baseando-se na paralaxe espectroscópica da estrela mais brilhante detectada na banda K_s , classificada como K0.5 II, determinaram uma distância de 7.6 kpc para RCW 87. Nós usamos os valores de distância e avermelhamento ($A_V = 10.9$ mag) desse estudo para avaliar a taxa de fótons ionizantes e encontramos $N_{Ly} = 10^{51.5}$ fótons s^{-1} . Este valor é irrealisticamente elevado, pois colocaria RCW 87 entre as regiões H II mais brilhantes da Galáxia, o que, conseqüentemente, exigiria maior emissão em radiofrequências.

Diversas medidas de velocidade radial na direção de RCW 87 são encontradas na literatura. A observação de linhas de recombinação do hidrogênio presentes no óptico retornou $v_{LSR}(H\alpha) = -39.9$ km s^{-1} (Georgelin et al., 1987) e em radiofrequências resultou

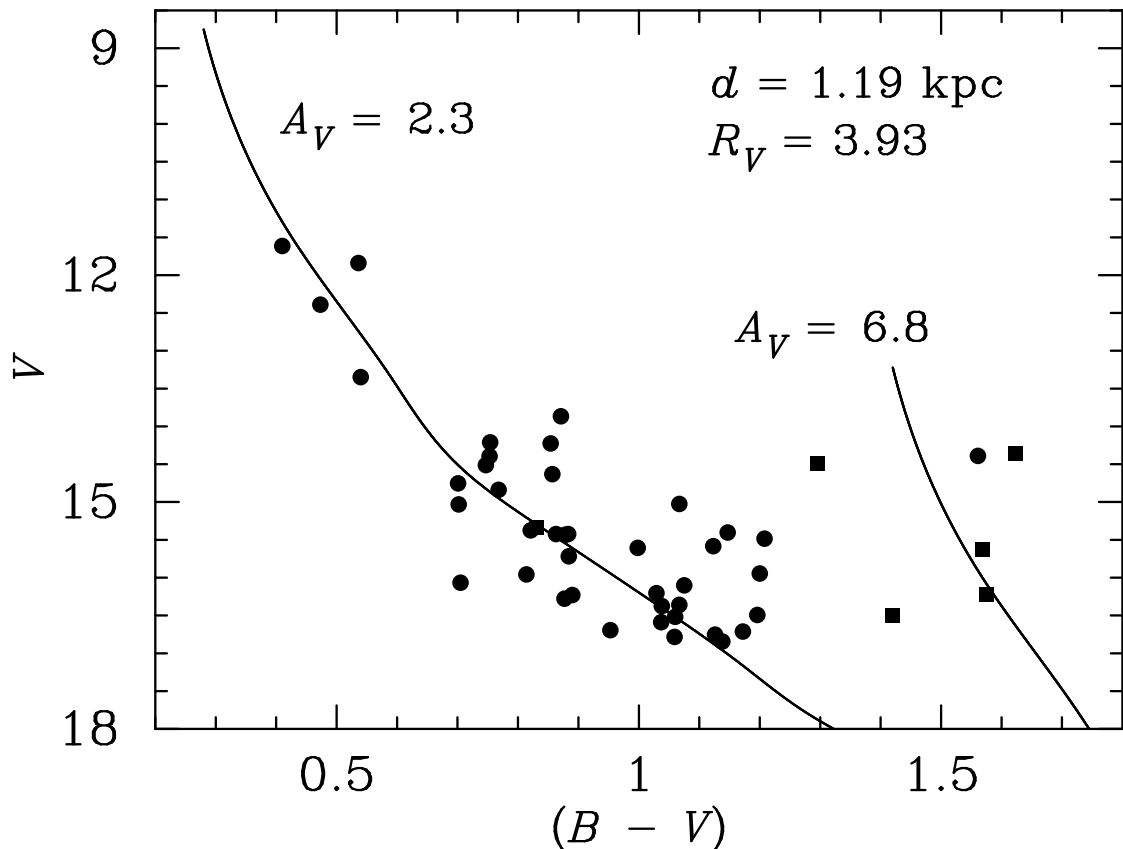


Figura 2.3: Diagrama cor-magnitude de RCW 87. Os quadrados correspondem a estrelas localizadas na direção da região mais brilhante da nebulosa e os círculos correspondem às outras estrelas do campo. As curvas indicam seqüências principais que correspondem a uma distância de 1.19 ± 0.16 kpc e a dois valores de extinção visual.

em $v_{\text{LSR}}(\text{H } 109\alpha) = -36.0 \pm 3.2 \text{ km s}^{-1}$ (Wilson et al., 1970). Já a observação de linhas de absorção do formaldeído em 4.8 e 14.5 GHz (Whiteoak & Gardner, 1974; Gardner & Whiteoak, 1984) retornou $v_{\text{LSR}}(\text{H}_2\text{CO}) = -40.1, -40.6 \text{ km s}^{-1}$. Assim como as observações acima citadas, medidas de linhas de emissão molecular também retornaram valores compatíveis de velocidade radial: $v_{\text{LSR}}(\text{NH}_3) = -32 \text{ km s}^{-1}$ (Vilas-Boas & Abraham, 2000), $v_{\text{LSR}}(\text{CO}) = -39.5 \text{ km s}^{-1}$ (Gillespie et al., 1977) e $v_{\text{LSR}}(\text{CS}) = -36.3 \text{ km s}^{-1}$ (Bronfman et al., 1996). Todas essas medidas indicam que há um único sistema de velocidades na direção de RCW 87. As duas possíveis distâncias cinemáticas correspondentes a $v_{\text{LSR}} = -40 \text{ km s}^{-1}$ são 2.7 kpc e 10.4 kpc, as quais discordam com a distância fotométrica deste trabalho e com aquela encontrada por Borissova et al. (2006), requerendo novas observações deste objeto a fim de fixar um valor de distância com melhores margens de segurança.

2.3.7 RCW 98

As distâncias estimadas para as três estrelas classificadas em RCW 98 são notavelmente semelhantes. Por outro lado, não foi possível verificar a completeza da amostra, uma vez

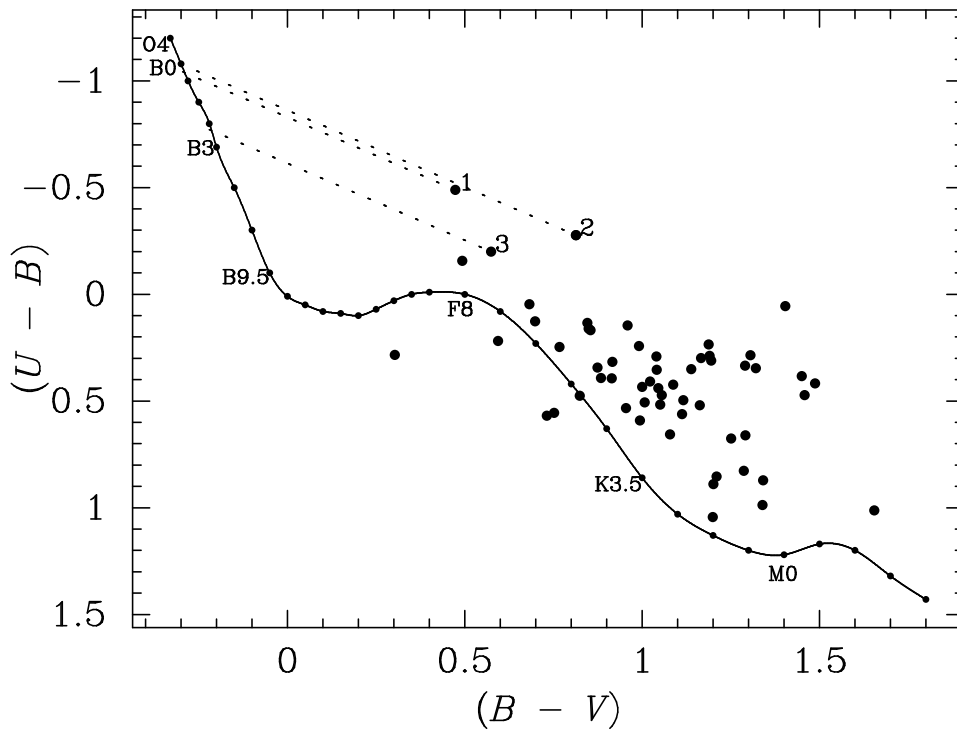


Figura 2.4: Diagrama cor-cor das estrelas detectadas no campo de RCW 98. As estrelas quentes em similar extinção foram todas classificadas espectroscopicamente.

que não foram encontrados dados em rádio ou no óptico necessários para o cálculo da taxa de fótons ionizantes para este objeto. No entanto, o diagrama cor-cor mostrado na Figura 2.4 indica somente outras duas estrelas B tardias em similar extinção às três classificadas, sugerindo que a amostra estaria completa. Desse modo, outras possíveis fontes ionizantes estariam fortemente obscurecidas pela poeira e, somente no infravermelho, poderiam ser observadas espectroscopicamente.

2.3.8 RCW 99

RCW 99 é uma região H II com tamanho angular $\sim 4' \times 4'$ e alto brilho superficial no óptico. Avedisova & Kondratenko (1984) atribuíram a este objeto uma distância de 3.54 kpc ao estudar cinco estrelas distantes de $28'$ a $40'$ de seu centro. Estudando estrelas localizadas na direção da nuvem ionizada, nós encontramos o valor bastante similar $d_{\text{helioc}} = 3.55 \pm 1.82$ kpc. A semelhança entre esses valores não deve ser apenas uma simples coincidência e, sim, um indicativo de que os dois conjuntos de estrelas estudados pertencem a mesma associação estelar.

Nenhuma estrela quente imersa na nebulosidade havia sido previamente identificada. Nós identificamos uma estrela O7 III (RCW 99-1) e uma B2 V (RCW 99-2) nessa região, as quais reproduzem o valor de N_{Ly} requerido (veja Tab. 2.5). O diagrama cor-cor para este objeto indica até sete outras estrelas tipo B mais tardias, as quais não teriam contribuição significativa à taxa de fótons ionizantes de RCW 99.

2.3.9 NGC 6334

NGC 6334 (também denominada Sh 2-8 ou RCW 127) é um grande complexo de regiões H II de $\sim 50'$, as quais recebem designações individuais de Gum 61, Gum 62, Gum 63, Gum 64a, Gum 64b e Gum 64c no catálogo de Gum (1955). Neste trabalho, identificamos a estrela LS 4087, aqui classificada como B0.5 V, como a fonte ionizante de Gum 64a, única componente sem estudos espectroscópicos anteriores.

Walborn (1982) determinou distâncias espectrofotométricas de cinco estrelas distribuídas em todo o complexo (HD 319703A e HD 319703B em Gum 61, HD 156738 em Gum 62, HD 319699 em Gum 63 e HD 319702 em Gum 64b) e encontrou um valor médio de 2.3 ± 0.1 kpc, usando a razão $R_V = 3.0$ fixa para as estimativas de A_V . Além da determinação do tipo espectral de LS 4087 em Gum 64a, nós reobservamos uma dessas estrelas e reanalisamos seus dados, avaliando A_V pelo método das diferenças de cores (veja Seç. 2.2.2).

As distâncias estimadas para as seis estrelas apresentaram uma dispersão de apenas 3.8%, contra 12.4% encontrada com o valor fixo de R_V , confirmando que as diferentes componentes de NGC 6334 estão realmente associadas. A distância média encontrada foi de 1.75 ± 0.26 kpc. Este valor é 24% menor que o valor obtido por Walborn (1982) e é uma consequência direta dos valores superiores de R_V ($\langle R_V \rangle = 3.5$) e A_V aqui encontrados. Com base em fotometrias $UBVRI$ e $H\beta$ de estrelas em NGC 6334 e NGC 6357 (outro complexo de regiões H II, localizado 2° a nordeste de NGC 6334), Neckel (1978) encontrou um valor comum de 1.74 ± 0.31 kpc para as distâncias desses objetos.

Capítulo 3

Estudo do conteúdo estelar do aglomerado infravermelho [DBS2003] 157 associado à região H II GAL 331.31-00.34

Neste capítulo, apresentamos um estudo do conteúdo estelar do aglomerado [DBS2003] 157 associado à região H II GAL 331.31-00.34 e à fonte IRAS 16085-5138. GAL 331.31-00.34 está localizada na parte leste de um grande complexo de regiões H II situado na direção do braço espiral de Norma. Esse complexo, que inclui oito regiões H II brilhantes em radiofrequências, recebe o nome de GAL 331.5-00.1, nome dado à região H II mais brilhante nessa faixa espectral (Amaral & Abraham, 1991). Associações de estrelas OB destas regiões podem explicar alguns dos picos de emissão em altas energias (da ordem de TeV) da fonte HESS J1614-518 estudada por Aharonian et al. (2006). Estes autores não identificaram nenhuma contrapartida “plausível” em outras faixas do espectro eletromagnético para os picos de alta energia detectados, mas enfatizaram que um pequeno número de estrelas B, pertencentes a alguma associação estelar poucos quiloparsecs distante do Sol, poderia fornecer ventos estelares suficientes para acelerar partículas até energias da ordem de TeV.

Diversos estudos dando indicativos de formação estelar massiva na direção da região H II GAL 331.31-00.34 foram publicados nas últimas décadas. A detecção de masers de Metanol (Ellingsen et al., 1996; Kuchar & Clark, 1997; Walsh et al., 1998; Caswell et al., 2000) e Hidroxila (Caswell et al., 1980) denota a existência de uma região de formação estelar compacta (Walsh et al., 1997). Estas evidências estão de acordo com detecções de linhas moleculares de CS(2-1) e SiO por Bronfman et al. (1996) e Harju et al. (1998), respectivamente, que requerem densidades mais altas que 10^4 cm^{-3} . Esses autores também

publicaram valores de velocidade radial entre -70 e -60 km s^{-1} , tipicamente $v_{LSR} \sim -65 \text{ km s}^{-1}$, os quais correspondem a distâncias cinemáticas de 4.2 kpc e 10.7 kpc quando aplicados ao modelo de Brand & Blitz (1993) para a curva de rotação da Galáxia.

Este é o primeiro estudo detalhado do conteúdo estelar de [DBS2003] 157 e da região H II a ele associada. De fato, não há na literatura nenhuma outra classificação espectral de estrelas desse aglomerado, seja ela fotométrica ou espectroscópica. Adotando um valor de distância heliocêntrica compatível com a distância cinemática mais próxima ($d_{\text{helioc}} = 4 \text{ kpc}$), Simpson & Rubin (1990) estimaram uma taxa de fótons ionizantes de $N_{\text{Ly}} \approx 10^{49.08} \text{ fótons s}^{-1}$, usando medidas de densidade de fluxo do contínuo rádio. Conforme o trabalho de Hanson et al. (1997), seriam necessárias sete estrelas O9-O9.5 V ou uma estrela O6 V para manter valores de N_{Ly} dessa ordem. Por outro lado, em um estudo que explorou regiões H II gigantes, Conti & Crowther (2004) adotaram o maior valor de distância cinemática e obtiveram $N_{\text{Ly}} \approx 10^{50.28} \text{ fótons s}^{-1}$, valor que requer um grupo de dez a vinte estrelas O6 V ou algo como cinco estrelas O3 V.

Neste trabalho, apresentamos a fotometria *JHK* de todas as fontes detectadas em um campo de $\sim 5' \times 4'$, obtida com o dobro da resolução espacial dos dados do catálogo 2MASS, e espectros na faixa de 1.25 a $2.21 \mu\text{m}$ de uma amostra de potenciais estrelas ionizantes, visando realizar uma primeira estimativa de distância espectrofotométrica para GAL 331.31-00.34 e, com isso, determinar outras potenciais fontes ionizantes. Diagramas cor-cor com dados do infravermelho próximo (NIR) e médio (Mid-IR) também são construídos com o objetivo de identificar objetos estelares jovens (YSOs) com excessos de emissão infravermelha devido a discos protoplanetários ou envelopes protoestelares. Os resultados aqui apresentados estão publicados em Pinheiro et al. (2012).

3.1 Observação e redução dos dados

De acordo com o catálogo de aglomerados estelares infravermelhos de Dutra et al. (2003, daqui em diante DBS2003), o aglomerado [DBS2003] 157 possui tamanho angular de $2.1' \times 1.5'$ e está centrado em $\text{RA}(\text{J2000}) = 16^{\text{h}}12^{\text{m}}20^{\text{s}}$, $\text{Dec.}(\text{J2000}) = -51^{\circ}46'14''$. Com o objetivo de incluir todas as potenciais estrelas ionizantes e todos os objetos estelares jovens da vinhança da região H II associada ao aglomerado IR, construímos diagramas cor-cor e cor-magnitude usando a fotometria *JHK* do catálogo 2MASS correspondente a uma região circular de raio $2'$, centrada nas coordenadas de DBS2003, e selecionamos a fonte infravermelha (IRS) 2MASS J16122002-5146262 para subsequente espectroscopia.

Margens de erro demasiadamente elevadas ou, até mesmo, não estimadas foram identificadas na fotometria 2MASS da fonte IR selecionada e de grande parte das estrelas da vizinhança, tornando, também, necessária a obtenção de dados fotométricos no NIR com mais alta resolução e razão sinal/ruído.

Os novos dados fotométricos foram unidos aos resultados da espectroscopia a fim de

realizar uma estimativa de distância espectrofotométrica preliminar e, assim, selecionar uma amostra maior de potenciais fontes ionizantes a serem observadas na sequência. A observação dos dados fotométricos e os respectivos processos de redução estão descritos na Seção 3.1.1, enquanto que os processos referentes aos dados espectroscópicos são descritos na Seção 3.1.2. A classificação dos espectros obtidos está detalhada na Seção 3.2.1.

3.1.1 Dados fotométricos

Observações fotométricas no infravermelho próximo foram realizadas no OPD usando a câmera infravermelha CamIV, acoplada ao telescópio de 0.60 m, Boller & Chivens. Com este conjunto, foram obtidos *frames* de $8' \times 8'$ e escala de placa de $0.48'' \text{ pixel}^{-1}$. A CamIV contém um detector CCD Hawaii de 1024×1024 pixels e um conjunto de filtros¹ nas bandas J , H e K_s . Em nossas observações, utilizamos filtros largos J e H , centrados em $1.25 \mu\text{m}$, e $1.65 \mu\text{m}$, respectivamente, e o filtro estreito na banda K (K_s), denominado $C1$, centrado em $2.138 \mu\text{m}$. A escolha do filtro estreito $C1$ (FWHM $\sim 0.023 \mu\text{m}$) garantiu que as exposições não saturassem mesmo com o tempo de exposição mínimo oferecido pelo instrumento e evitou a contaminação pela emissão nebulosa Brackett- γ , detectada por Roman-Lopes & Abraham (2006a) em regiões de formação estelar, permitindo, assim, melhor subtração do contínuo. Para evitar a saturação das estrelas mais brilhantes nas bandas J e H e, também, devido ao alto ruído térmico detectado na banda K_s , um conjunto de exposições curtas foi tomado em cada filtro. Cada série foi distribuída em cinco subconjuntos deslocados de $90''$ a $120''$ a fim de remover pixels defeituosos e raios cósmicos. Foi garantido que, a cada novo subconjunto, o tamanho angular mínimo do deslocamento fosse maior que o tamanho angular da região de emissão nebulosa ($\sim 1.5'$ to $2'$), a fim de evitar a contaminação das imagens de céu, construídas tomando a mediana de todo o conjunto. Os tempos totais de integração nos filtros J , H e $C1$ somaram, respectivamente, 1260, 1575 e 5250 s. O *seeing* variou de $1.1''$ a $1.5''$. Para remoção das características instrumentais e da emissão infravermelha do próprio conjunto de instrumentos, imagens *dark* e *flat-fields* de cúpula foram tomadas no início e no final de cada noite.

Procedimentos padrão para redução de dados fotométricos de campos estelares ricos, no infravermelho, foram realizados com o *software* IRAF. As imagens *dark* foram combinadas e subtraídas de cada *frame* individualmente. As imagens resultantes desse processo foram, então, divididas pelo *flat-field* combinado. Uma imagem de céu foi então obtida da mediana de todo o conjunto de exposições de cada filtro e subtraída dos *frames* corrigidos. Em seguida, cada conjunto foi alinhado e a região simultânea as três bandas foi recortada, o que gerou *frames* J , H e K_s de $\sim 5' \times 4'$, centrados em $\text{RA}(J2000) = 16^{\text{h}}12^{\text{m}}24^{\text{s}}$, $\text{Dec.}(J2000) = -51^{\circ}47'27''$. As imagens finais foram geradas calculando a mediana de

¹<http://www.lna.br/opd/instrum/Camiv/filtros.htm>

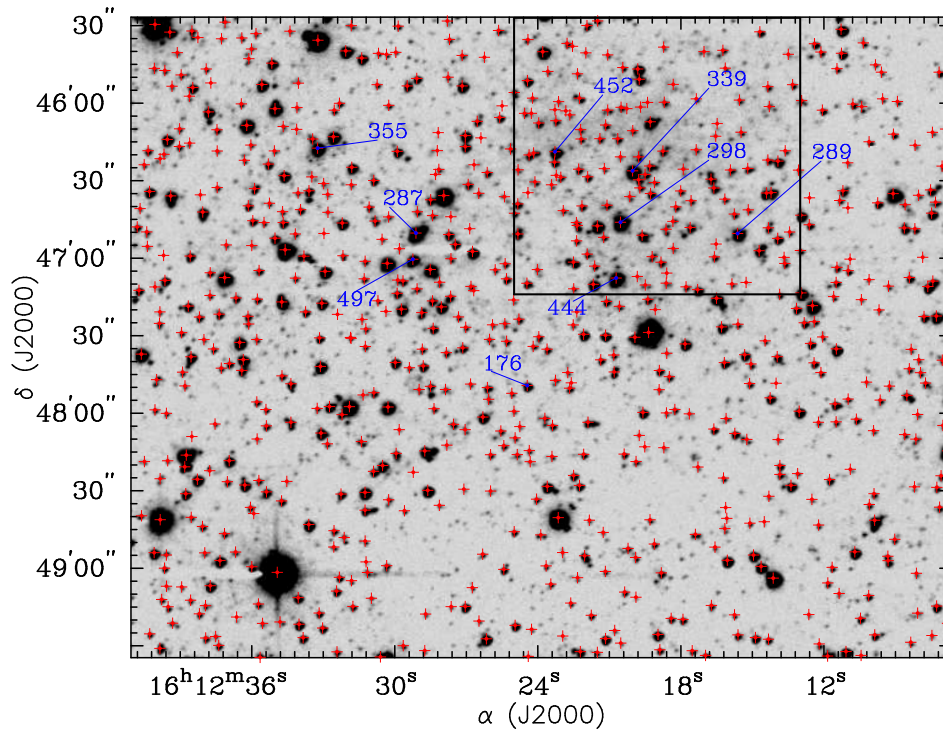


Figura 3.1: Imagem na banda H do campo observado na direção de [DBS2003] 157. O retângulo preto engloba a região ocupada pelo aglomerado identificado por DBS2003. Os sinais em vermelho apontam todas as fontes detectadas ao menos em uma das bandas fotométricas desse estudo. As fontes selecionadas para a espectroscopia estão enumeradas em azul.

todas as exposições obtidas em cada filtro.

A Figura 3.1 mostra a imagem H final, obtida no processo acima descrito. A tarefa **daofind** do IRAF foi usada na determinação das coordenadas das estrelas em cada imagem, detectando fontes com contagens 4σ acima das contagens de fundo. Tal procedimento detectou dezenas de novas fontes IR não resolvidas na fotometria do 2MASS. Isto é uma consequência direta do valor médio $\langle FWHM \rangle \sim 1.5''$ dos perfis das fontes detectadas nas imagens da CamIV, o que equivale a metade do valor medido em exposições do 2MASS. Na vizinhança de IRS 339, primeira estrela selecionada para espectroscopia, estão agora resolvidas quatro novas fontes. Estas quatro estrelas são as prováveis fontes de erro da fotometria J e H do 2MASS para IRS 339, indicada no catálogo como “fonte não resolvida de forma consistente nas três bandas”.

As magnitudes instrumentais das estrelas detectadas foram extraídas usando rotinas do pacote **daophot**. Em cada banda, um modelo fixo para as funções de espalhamento pontual (PSFs) foi obtido com a rotina **psf** e, simultaneamente, ajustado a cada uma das estrelas detectadas pelo **daofind** através da tarefa **allstar**, mantendo o raio de ajuste da ordem da $FWHM$ e um raio limite para extrapolação do modelo em até 3.5 vezes este valor.

A calibração fotométrica foi realizada por comparação com dados do catálogo 2MASS.

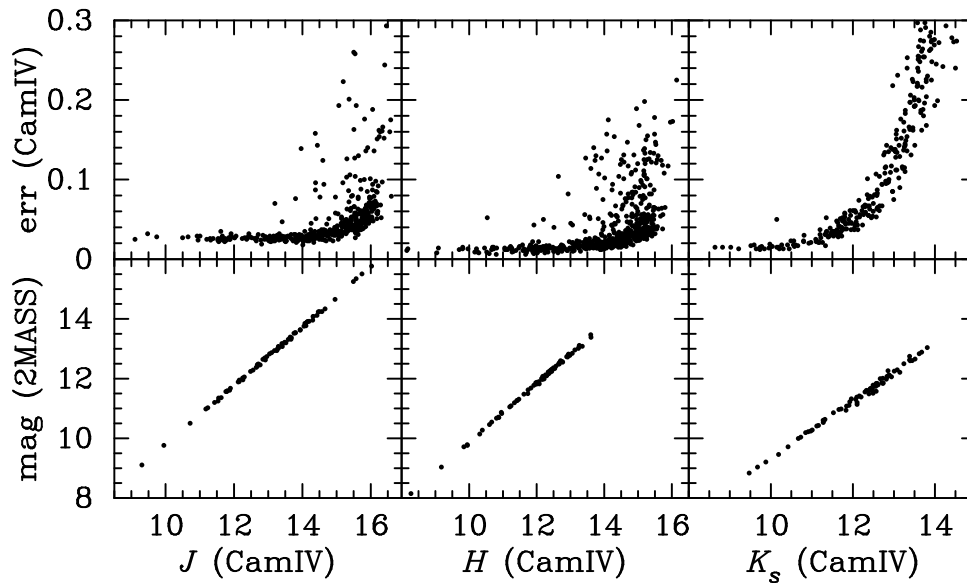


Figura 3.2: Topo: Variação das margens de erro finais da fotometria. Base: Correlação linear entre os sistemas CamIV/OPD e 2MASS. As margens de erro nas magnitudes de ponto zero são 0.007, 0.006 e 0.010 mag para os filtros J , H e K_s , respectivamente.

Setenta e três estrelas relativamente isoladas e externas à região retangular de $\sim 3' \times 2'$ centrada nas coordenadas de DBS2003 (veja Fig. 3.1) foram selecionadas e associadas às respectivas fontes 2MASS. A Figura 3.2 (base) evidencia a correlação linear entre as magnitude medidas com os sistemas CamIV/OPD e 2MASS. Esta correlação foi determinada com a tarefa **evalfit**, usando o método dos mínimos quadrados. Tal procedimento resultou em ajustes com desvios padrão de 0.034, 0.026 e 0.036 para as bandas J , H e K_s , respectivamente. Desde que a construção e o ajuste das PSFs sejam razoavelmente precisos, a correlação linear mostrada na Figura 3.2 é esperada, já que nenhum termo de cor foi encontrado entre os sistemas 2MASS e CamIV (Roman-Lopes & Abraham, 2006b). Os erros fotométricos finais obtidos após a calibração estão no topo da mesma figura. Nas bandas J e H , a maioria das fontes apresentam margens de erro menores que 0.02 mag.

Analisando histogramas de $\log(N)$ vs. m , o limite de completeza dessa fotometria, definido como o ponto em que cessa o crescimento linear de $\log(N)$ com m , foi estimado em $J = 15.5$ mag, $H = 15.2$ mag, e $K_s = 13.5$ mag. A Tabela A.1 (Apêndice A) apresenta os resultados da fotometria de todas as estrelas que serão citadas na discussão dos resultados da seção 3.2 ou cujos pontos sejam identificados em diagramas cor-cor ou cor-magnitude. As colunas 1, 2 e 3 fornecem o identificador atribuído a cada estrela e as coordenadas J2000 dessas estrelas no Sistema Equatorial. Essas coordenadas foram obtidas ao se converter com a rotina **ccmap** as coordenadas em pixels determinadas com o **daofind**. As colunas 4, 5 e 6 listam as magnitudes J , H e K_s e seus erros propagados.

3.1.2 Dados espectroscópicos

Dados espectrais no NIR de nove estrelas do campo de GAL 331.31-00.34 foram adquiridos com o Ohio State Infrared Imager/Spectrometer (OSIRIS²) acoplado ao telescópio de 4.1 m do Southern Observatory for Astrophysical Research (SOAR), localizado em Cerro Pachon, Andes chilenos, nos anos de 2008 e 2011. Os espectros J , H e K foram obtidos no modo dispersão cruzada, em que as três bandas são observadas simultaneamente, com resolução $R \sim 1200$, aproximadamente $1/3$ da resolução do modo clássico. Neste modo de observação, o instrumento opera com câmera $f/2.8$ e fenda de tamanho angular projetado no plano do céu de $\sim 1'' \times 27''$ orientada na direção Leste-Oeste.

As observações seguiram o procedimento padrão de *dithering* AB. As exposições individuais de curta duração foram tomadas em cada posição, somando de 8 a 20 espectros bidimensionais e um tempo de exposição acumulado que variou entre 12 e 40 minutos. A Tabela 3.1 lista o conjunto de estrelas-alvo da espectroscopia. Nas colunas 1 e 2, o identificador adotado na fotometria descrita na Seção 3.1.2 é associado aos respectivos nomes do catálogo 2MASS. Tempos de exposição individual e número de exposições obtidas para cada estrela estão listados nas Colunas 3 e 4. A última coluna fornece a data da observação.

Estrelas padrão espectroscópicas A e G foram observadas em massas de ar semelhantes, antes ou depois das exposições da estrela alvo, visando remover linhas de absorção telúricas. Os espectros crus da estrela IRS 339 foram reduzidos com o pacote CIRRED³ instalado no IRAF. Os demais espectros foram reduzidos somente com as tarefas já disponíveis no IRAF, seguindo procedimentos usuais de correção da não-linearidade

²OSIRIS é um projeto colaborativo entre a Ohio State University e o Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO).

³A sequência de procedimentos aplicados está indicada pelos desenvolvedores do pacote de redução no *website* http://www.ctio.noao.edu/instruments/ir_instruments/cirred/cirred.html

Tabela 3.1: Lista de observações espectroscópicas

CamIV	ID 2MASS	T. exp. indiv. (s)	Nº de exp.	Data
IRS 339	J16122002-5146262	120	16	2008/07/10
IRS 298	J16122053-5146460	75	12	2011/05/08
IRS 287	J16122911-5146503	75	12	2011/05/08
IRS 497	J16122925-5147004	120	12	2011/06/02
IRS 355	J16123324-5146173	100	8	2011/06/02
IRS 176	J16122445-5147492	120	12	2011/06/03
IRS 444	J16122071-5147075	90	8	2011/06/03
IRS 289	J16121561-5146504	75	20	2011/06/12
IRS 452	J16122326-5146188	120	20	2011/06/12

da resposta do CCD (tarefa **irlincor**, com parâmetros disponibilizados no *website* do SOAR/OSIRIS), subtração do céu (subtração de espectros tomados na posição A por espectros obtidos na posição B de *dithering* com a tarefa **imarith**), divisão (com a tarefa **ccdproc**) pelo *flat-field* normalizado com tarefa **apflatten**, extração dos espectros unidimensionais com as rotinas integradas ao pacote **apall** e calibração em comprimento de onda, computada com as rotinas **identify** e **reidentify** e aplicada com a tarefa **dispcor**. Os espectros finais foram combinados e divididos pelo espectro da estrela padrão A0V, já livre de linhas de absorção fotosféricas removidas por interpolação nas bandas *J* e *K* e, especificamente na banda *H*, por divisão pelo espectro da padrão tipo G, seguindo procedimentos descritos por Blum et al. (1997), aplicados com a rotina **telluric**.

3.2 Resultados

3.2.1 Classificação espectral

Espectros de estrelas tipo O ou B são facilmente identificados no óptico pela presença de linhas de absorção do He I (cf. Walborn & Fitzpatrick, 1990). Quando linhas do hélio ionizado também estão presentes, temos um indicativo substancial de estrelas tipo O (veja Seç. 2.2.1, no Cap. 2). Considerando que linhas destes íons também aparecem no infravermelho próximo (Hanson et al., 1996), a presença dessas linhas ainda deve ser o principal critério observado na classificação de estrelas quentes nessa faixa espectral. Da mesma forma, linhas da série de Brackett do H I também podem ser utilizadas, embora isso exija especial atenção quanto à contaminação pela emissão nebular (Bik et al., 2005), que deve ser cuidadosamente subtraída.

Segundo os critérios listados acima, seis dos espectros listados na Tabela 3.1 mostraram linhas características de estrelas frias. Esses espectros foram classificados visualmente por comparação com dados do atlas espectral de Rayner et al. (2009) e estão dispostos na Figura C.1 (Apêndice C), com os resultados dessa classificação junto aos seus respectivos IDs. Possivelmente, essas são estrelas de campo e, por consequência, não serão incluídas nas discussões que seguem.

A Figura 3.3 apresenta espectros no NIR de três estrelas identificadas neste trabalho como prováveis fontes ionizantes de GAL 331.31-00.34. A detecção de linhas do He II em $1.693 \mu\text{m}$ e $2.188 \mu\text{m}$ indica ambas IRS 298 e IRS 339 como estrelas do tipo O9 ou mais recentes (em baixa resolução, este limite pode ser O8, c.f. Hanson et al., 2005). Por outro lado, quando comparamos as intensidades relativas dessas linhas com linhas da série de Brackett do H I e, também, com linhas do He I em $1.279 \mu\text{m}$, $1.700 \mu\text{m}$ e $2.112 \mu\text{m}$, observamos boa correspondência de IRS 339 com estrelas tipo O tardias e de IRS 298 com estrelas tipo O ainda mais massivas. A detecção de N III $\lambda 2.115 \mu\text{m}$ em emissão junto ao largo perfil de He I $\lambda 2.112\text{-}3 \mu\text{m}$, bem como o perfil alargado de Br γ descartam a

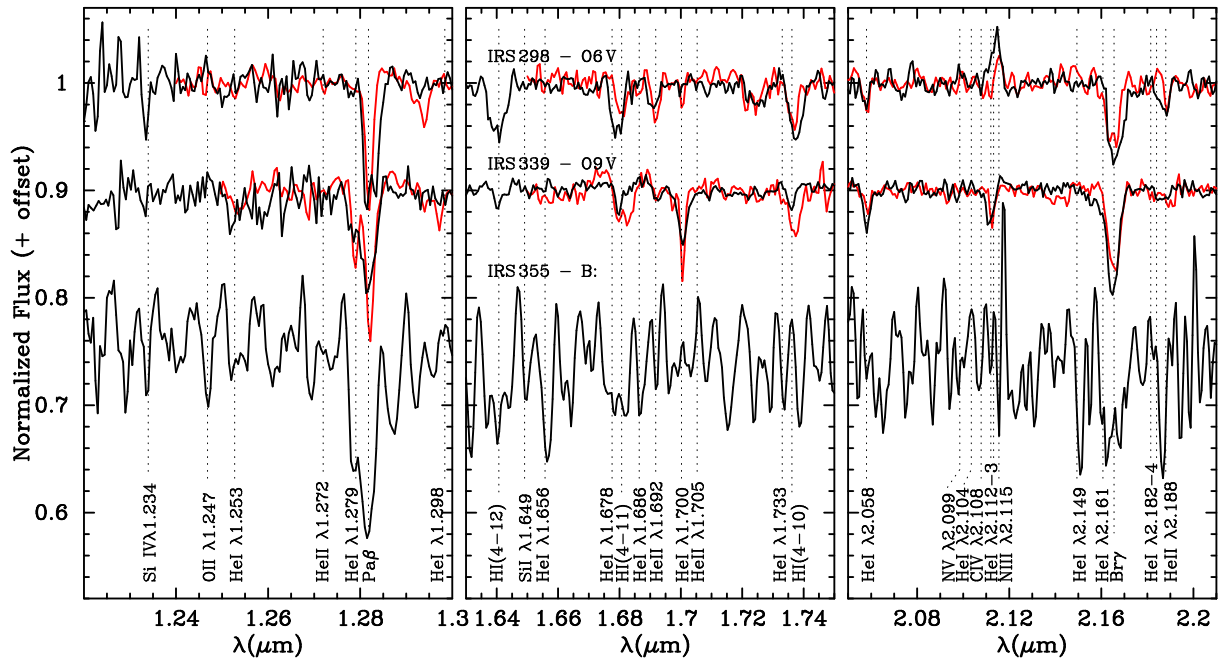


Figura 3.3: Espectros das estrelas tipo O IRS 298 e IRS 339, em preto, identificadas no campo de GAL 331.31-00.34, comparados a espectros NIR de estrelas padrão para os tipos O6 V (HD 1011990) e O9 V (HD 93028), sobrepostos em vermelho.

possibilidade de uma estrela supergigante, mas não garantem IRS 339 como uma estrela anã, uma vez que a distinção entre classes de luminosidade, em muitos casos, pode ser bastante dúbia no NIR, devido à escassez de linhas adequadas nessa faixa espectral e devido à incerteza nas medidas de larguras equivalentes (Hanson et al., 1996, 2005).

Assumindo classe V, construímos o esquema apresentado na Figura 3.4 a fim de comparar variações de larguras equivalentes (W_{λ}) de linhas do hélio de espectros de estrelas padrão, variando de O6 a O9.5 V, com os valores medidos nos espectros de IRS 298 e IRS 339. Foram incluídas somente linhas do He com perfis bem determinados e descartadas linhas do H I, possivelmente contaminadas pela emissão nebular. Com base no esquema da Figura 3.4 e na comparação visual com espectros dos atlas de Hanson et al. (1996, 2005) e Bik et al. (2005), classificamos IRS 298 como O6 V e IRS 339 como O9 V.

O terceiro espectro apresentado na Figura 3.3 não pôde ser classificado com precisão devido ao baixo sinal/ruído. Contudo, as intensidades das linhas de He I e a aparente detecção de Si, C, N e O indicam IRS 335 como uma estrela tipo O9-B1.

3.2.2 Estimativa de distância via paralaxe espectroscópica

Com base na classificação espectral das estrelas IRS 298 e IRS 339 e nas magnitudes aparentes J e H listadas na Tabela A.1, uma estimativa de distância via paralaxe espectroscópica para o aglomerado [DBS2003] 157 pôde ser realizada. Para isso,

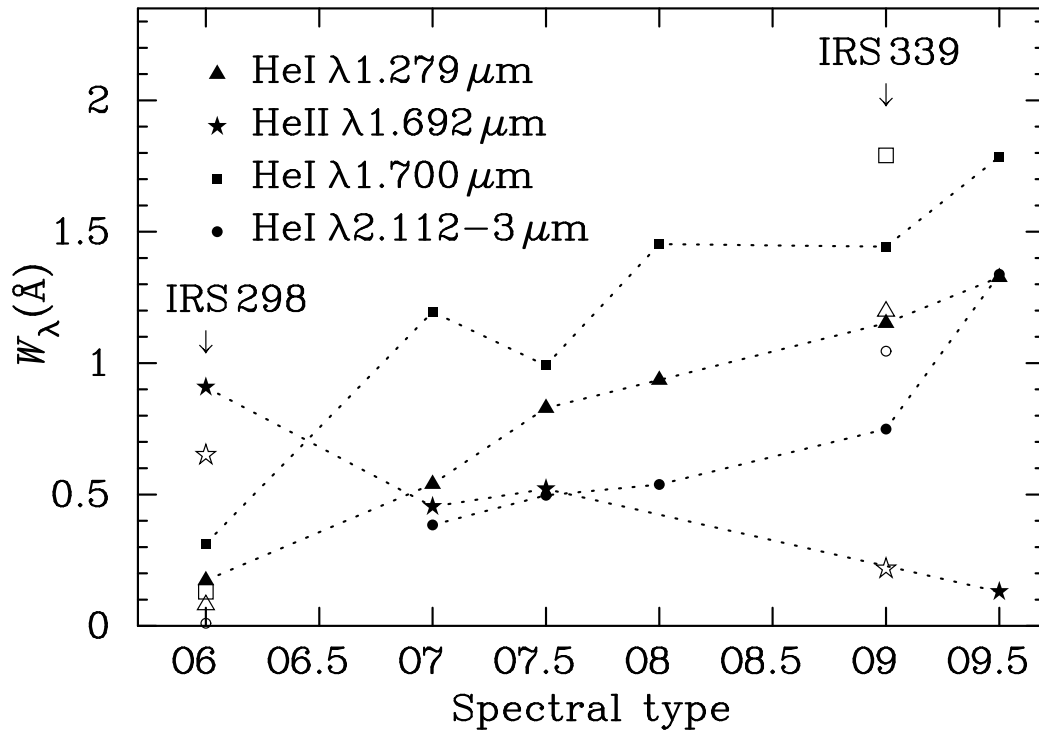


Figura 3.4: Variações das larguras equivalentes de linhas do hélio, medidas em espectros de estrelas padrão (símbolos cheios), comparadas às medidas correspondentes efetuadas nos espectros de IRS 298 e IRS 339 (símbolos vazios).

adotamos magnitudes absolutas compiladas por Vacca et al. (1996) e cores intrínsecas obtidas por Koornneef (1983), todas transformados para o sistema 2MASS usando as relações de Carpenter (2001). Para correção da extinção, adotamos os parâmetros estimados Stead & Hoare (2009) para objetos também intenos ao raio galactocêntrico, os quais resultam $E(J - H)/E(H - K) \cong 1.91$. Nessas bases, obtivemos as distâncias de $d = 3.24 \pm 0.56$ kpc ($A_J = 3.03, A_V = 10.44$) para IRS 339 e $d = 3.35 \pm 0.61$ kpc para IRS 298 ($A_J = 3.51, A_V = 12.10$). Adotando a distância média dessas duas estrelas, estimamos a distância heliocêntrica para a região H II GAL 331.31-00.34 em $d = 3.29 \pm 0.58$ kpc e a extinção visual em $\langle A_V \rangle \sim 11$ mag.

Caswell & Haynes (1987), medindo linhas de recombinação em radiofrequências, encontraram o valor de $V_{\text{LSR}} = -64 \text{ km s}^{-1}$ para a velocidade radial de GAL 331.31-00.34 com relação ao LSR. Aplicando este resultado ao modelo de Brand & Blitz (1993) para a curva de rotação da Galáxia, encontramos $d_{<} = 4.2$ kpc e $d_{>} = 10.7$ kpc como dois possíveis valores de distância heliocêntrica. Observando a distância encontrada via paralaxe espectroscópica, concluímos que a menor distância $d_{<}$ é a estimativa mais apropriada de distância cinemática.

3.2.3 Identificação de potenciais estrelas ionizantes e estimativas da luminosidade do contínuo Lyman

Visando classificar as fontes infravermelhas do campo de GAL 331.31-00.34, construímos a Figura 3.5, que apresenta os diagramas cor-cor (CC) e cor-magnitude (CM) contendo dados de todas as estrelas detectadas nas respectivas bandas. As sequências principais de idade zero (ZAMSs) traçadas foram construídas com cores intrínsecas de Koornneef (1983) e magnitudes absolutas de Vacca et al. (1996) para estrelas tipo O e Wegner (2007) para os demais tipos espectrais, todas convertidas para o sistema 2MASS usando as equações de Carpenter (2001). Já os vetores de avermelhamento foram traçados conforme a lei de extinção compilada por Stead & Hoare (2009). Dados referentes a T Tauri clássicas foram extraídos de Meyer et al. (1997), enquanto que a região onde recaem estrelas Herbig Ae/Be é demarcada conforme os resultados de Lada & Adams (1992).

Os valores de magnitude absoluta que descrevem a ZAMS da Figura 3.5 foram deslocados por uma constante, a fim de corresponder à distância de 3.29 kpc obtida na Seção 3.2.1, visando identificar outras potenciais estrelas ionizantes além daquela classificada espectroscopicamente. No diagrama cor-cor, assumimos que o espalhamento em torno do vetor de avermelhamento das estrelas tipo O, devido às margens de erro nas cores aparentes e intrínsecas, não supera 0.1 mag e, no diagrama cor-magnitude, consideramos apenas estrelas indicadas como B0-V ou mais massivas. Nessas bases, contabilizamos duas estrelas do tipo B0 V (uma delas a IRS 355) e uma outra B1 V, além das duas estrelas tipo O espectroscopicamente classificadas. Uma lista com estas cinco estrelas, junto aos seus IDs do catálogo 2MASS (Col. 2) é apresentada na Tabela 3.2, onde se compara as classificações fotométricas e espectroscópicas (Col. 3 e 4).

Visando testar a completeza do conjunto de estrelas ionizantes associado à região H II GAL 331.31-00.34, comparamos a luminosidade dos fótons do contínuo Lyman N_{Ly} (fótons s^{-1}) capaz de ser emitida por estas estrelas com aquela necessária para suprir o fluxo observado no contínuo em rádio. As estrelas listadas na Tabela 3.2 somam $N_{Ly} = 10^{49.07}$ fótons s^{-1} , segundo calibração de Hanson et al. (1997), ou $N_{Ly} = 10^{49.28}$ fótons s^{-1} ,

Tabela 3.2: Estrelas ionizantes de GAL 331.31-00.34

Estrela		Classificações	
CamIV	2MASS	Fotométrica	Espectroscópica
IRS 298	J16122053-5146460	mid-O	O6 V
IRS 339	J16122002-5146262	late-O	O9 V
IRS 355	J16123324-5146173	B0:	B0:
IRS 114	J16123539-5148304	B1:	...
IRS 446	J16120863-5146482	B0:	...

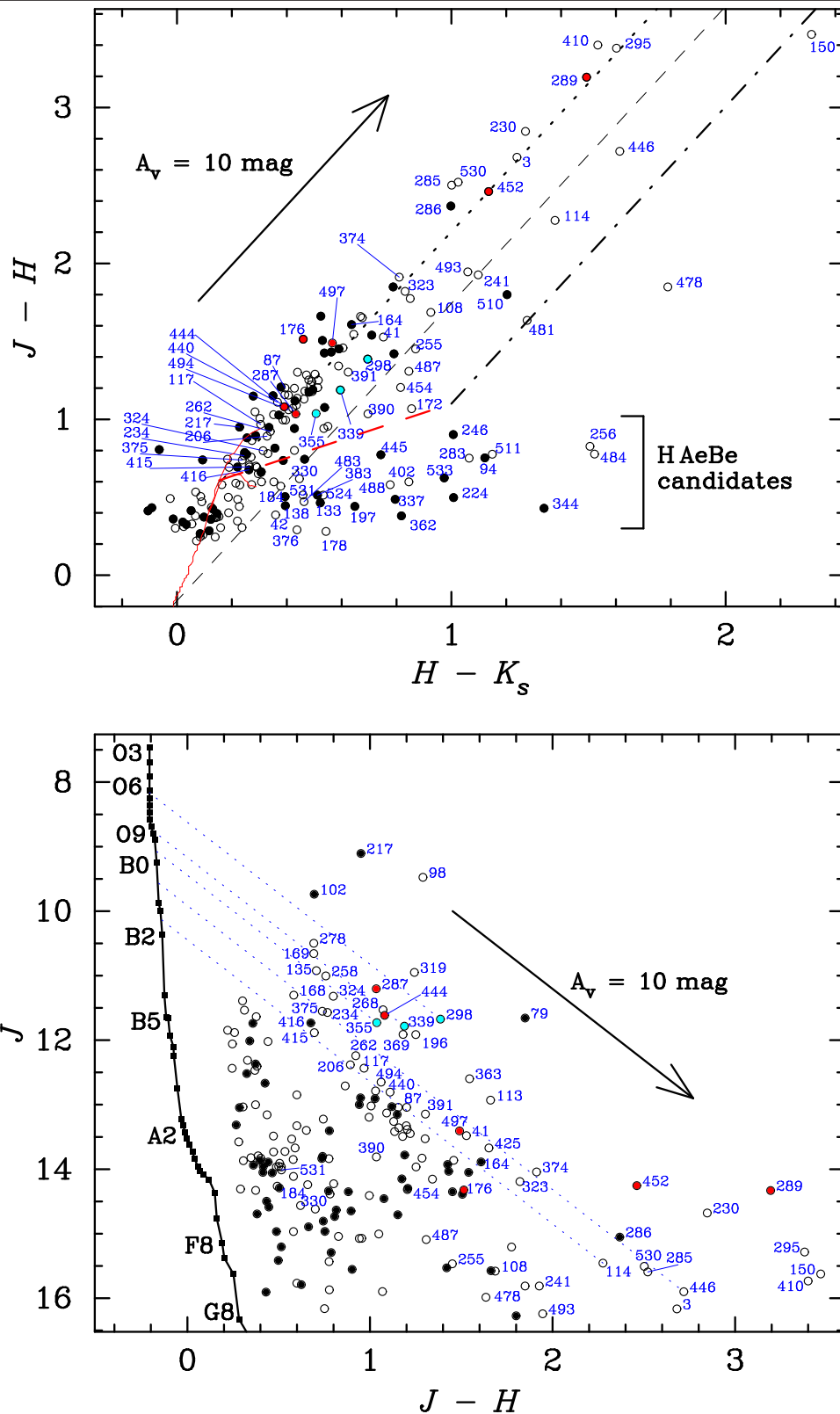


Figura 3.5: Topo: diagrama CC das fontes IR detectadas no campo de $\sim 5' \times 4'$. A linha vermelha sólida traça as cores intrínsecas de estrelas anãs, enquanto a tracejada demarca T Tauri clássicas. Linhas pretas pontilhada, tracejada e ponto-tracejada indicam os vetores A_V para estrelas tipo M, O e T Tauri clássicas. Base: diagrama CM. A linha preta traça a ZAMS, com M_V correspondentes a $d_{\text{helioc}} = 3.29$ kpc. Círculos cheios representam estrelas internas ao retângulo da Fig. 3.1, enquanto os abertos se referem às outras estrelas do campo. As estrelas espectroscopicamente classificadas são representadas por pontos azuis (recentes) e vermelhos (tardias). As 5 potenciais estrelas ionizantes tem seus vetores A_V traçados.

ao se adotar os valores dados por Schaerer & de Koter (1997).

A avaliação da luminosidade no contínuo Lyman de GAL 331.31-00.34 através de medidas de densidade de fluxo do contínuo rádio é calculada usando a expressão

$$N_{\text{Ly}} = \frac{5.59 \times 10^{48}}{1 + f_i \langle \text{He}^+ / (\text{H}^+ + \text{He}^+) \rangle} \left(\frac{\nu}{5 \text{ GHz}} \right)^{0.1} T_e^{-0.45} S_\nu D^2 \quad (3.1)$$

baseada no trabalho de Rubin (1968), assumindo que a razão He/H é aproximadamente 0.1 e que o volume de He^+ é, em média, metade do volume de H^+ . A quantidade f_i é a fração dos fótons de recombinação do hélio que são energéticos o bastante para ionizar o hidrogênio, tipicamente $f_i \approx 0.65$. Adotando uma temperatura eletrônica típica $T_e = 8000 \text{ K}$ e densidade de fluxo do contínuo rádio S_ν , medidas em 22 GHz por Amaral & Abraham (1991), encontramos $N_{\text{Ly}} = 10^{48.74}$ fótons s^{-1} .

Independentemente da calibração tipo espectral *versus* N_{Ly} adotada, os valores de N_{Ly} somados pelo conjunto de potenciais estrelas ionizantes são bastante compatíveis com os valores derivados da densidade de fluxo do contínuo em rádio. Da mesma forma, foi também verificado que as medidas de S_ν em 5 GHz de Caswell & Haynes (1987) e de Kuchar & Clark (1997), utilizadas nas estimativas de N_{Ly} que listamos no início deste capítulo, retornam basicamente os mesmos valores de N_{Ly} ($10^{48.66}$ e $10^{48.62}$ fótons s^{-1} , respectivamente), ambos próximos àqueles que acabamos de estimar, desde que usemos o mesmo valor de distância heliocêntrica, indicando que essas medidas são, de fato, coerentes entre si.

3.2.4 Identificação e classificação de objetos estelares jovens

O excesso de cor intrínseco encontrado na fotometria IR de algumas estrelas é uma evidência de discos de acreção ou envelopes circunstelares acretando matéria (*infalling envelopes*) em um núcleo central denso, o que denota regiões de recente formação estelar. Estas regiões revelam-se como os mais promissores lugares para a pesquisa por objetos estelares pré-sequência principal. A construção de diagramas CC com dados dos infravermelhos próximo e médio nos permite apontar essas fontes e inferir algumas de suas características. Conforme Allen et al. (2004), objetos com discos de acreção são denominados YSOs classe II e, no diagrama CC do NIR, habitam a região demarcada pelos vetores de avermelhamento de T Tauri clássicas. Já aqueles objetos cuja emissão é dominada por *infalling envelopes* se colocam em valores elevados de $H - K$ e são denominados YSOs classe I. YSOs com fraco ou nenhum excesso de emissão são nomeados classe III, mas não se distinguem nestes diagramas, uma vez que se colocam junto às estrelas que já entraram na sequência principal de idade zero.

A análise do diagrama CC no NIR já mostrado na Figura 3.5 indica 36 fontes candidatas a YSOs, todas elas listadas na Tabela 3.3 junto a uma pré-classificação que as

separa em estrelas T-Tauri (T Tau) ou Herbig Ae/Be (H AeBe). Nesta lista, IRS 446 e IRS 114 também podem ser classificadas como estrelas O ou B altamente obscurecidas pela poeira interestelar. IRS 150 é o objeto mais obscurecido da lista, indicando $A_V \geq 20$ mag. Considerando as margens de erro da fotometria e as flutuações comuns à lei de extinção, IRS 150 tem cores coerentes com uma estrela T Tauri clássica altamente obscurecida pela poeira. IRS 478 é a única fonte NIR que mostrou cores típicas de YSO classe I. Um terceiro grupo de estrelas aparece abaixo da região das T Tauri clássicas com $(H - K_s) \geq 0.4$ mag. Nesta região, estrelas Herbig Ae/Be, as quais são estrelas mais massivas que T Tauri clássicas, podem ser confundidas com YSOs classe I (Lada & Adams, 1992), galáxias e objetos de fundo, o que torna a classificação puramente fotométrica bastante incerta.

Um diagrama cor-cor usando dados no Mid-IR do catálogo de fontes pontuais do GLIMPSE/*Spitzer*⁴ *survey* foi também construído a fim de encontrar e classificar YSOs mais obscurecidos e, por isso, não detectados em alguma das bandas da fotometria NIR. Numa região de $2.5'$ de raio e centro correspondente ao *frame* obtido na banda *H*, um total de 58 fontes foram detectadas simultaneamente nas quatro bandas do *survey* e seus dados fotométricos estão dispostos na Figura 3.6.

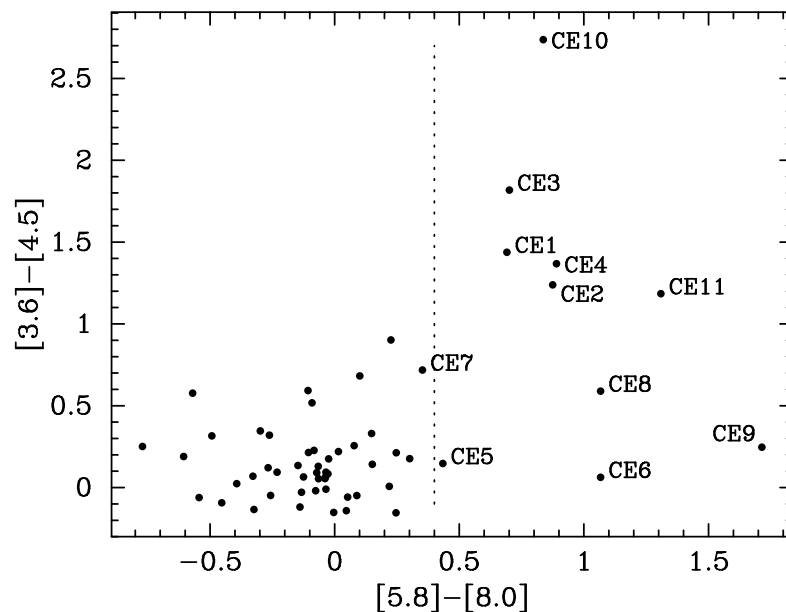


Figura 3.6: Diagrama cor-cor de fontes Mid-IR detectadas em uma região de raio $2.5'$, centrada na imagem *H* da Fig. 3.1. Pontos representando objetos com excesso de cor intrínseco no Mid-IR recaem à direita da linha pontilhada. YSOs classe III e outros objetos do campo habitam o *clump* no entorno do ponto (0, 0).

Objetos de baixa massa podem ser classificados nesse diagrama de acordo com o esquema proposto por Allen et al. (2004). Segundo este esquema, YSOs classe III e outros objetos de campo se colocam no entorno do ponto (0, 0) do diagrama cor-cor

⁴<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/GLIMPSE/>

Tabela 3.3: Lista de YSOs conforme a fotometria NIR

CamIV	Identificador		Classif. fotom.
	2MASS	GLIMPSE	
IRS 42	J16123385-5149269	G331.3195-00.3979	H AeBe
IRS 94	J16122500-5148459	...	H AeBe
IRS 114	J16123539-5148304	G331.3330-00.3892	T Tau [†]
IRS 133	J16121385-5148204	G331.2944-00.3491	H AeBe
IRS 138	J16122037-5148157	G331.3076-00.3597	H AeBe
IRS 150	J16123309-5148076	G331.3331-00.3806	T Tau
IRS 172	J16120964-5147550	...	T Tau
IRS 178	J16123437-5147487	G331.3391-00.3790	H AeBe
IRS 184	J16121891-5147434	G331.3110-00.3506	H AeBe
IRS 197	J16121395-5147382	G331.3025-00.3409	H AeBe
IRS 224	J16121561-5147255	...	H AeBe
IRS 246	J16121386-5147139	G331.3071-00.3357	H AeBe
IRS 256	J16122966-5147088	...	H AeBe
IRS 283	J16123053-5146525	...	H AeBe
IRS 330	J16122692-5146314	...	H AeBe
IRS 337	...	...	H AeBe
IRS 344	J16122121-5146255	...	H AeBe
IRS 362	J16122064-5146136	...	H AeBe
IRS 376	J16121207-5146026	...	H AeBe
IRS 383	J16121868-5145597	...	H AeBe
IRS 390	J16123848-5145538	G331.3687-00.3630	T Tau
IRS 402	J16123964-5145474	...	H AeBe
IRS 445	J16122483-5146507	...	H AeBe
IRS 446	J16120863-5146482	G331.3022-00.3213	T Tau [†]
IRS 454	J16122704-5146168	G331.3427-00.3474	T Tau
IRS 478	J16122996-5148154	G331.3258-00.3766	H AeBe
IRS 481	J16122752-5148042	G331.3232-00.3700	T Tau
IRS 483	J16121153-5147565	G331.2947-00.3402	H AeBe
IRS 484	J16122607-5147546	G331.3223-00.3655	H AeBe
IRS 487	J16122611-5147500	G331.3232-00.3646	T Tau
IRS 488	J16120772-5147483	G331.2891-00.3319	H AeBe
IRS 510	J16122112-5146395	G331.3274-00.3416	T Tau
IRS 511	J16120732-5146382	...	H AeBe
IRS 524	J16123883-5148207	G331.3413-00.3932	H AeBe
IRS 531	J16120752-5146336	G331.3028-00.3164	H AeBe
IRS 533	...	...	H AeBe

[†]Veja Sec. 3.2.3.

Tabela 3.4: Lista de YSOs conforme a fotometria Mid-IR do GLIMPSE

Este trabalho		<i>Surveys</i>	
MIR	NIR	GLIMPSE	2MASS
CE 1	...	G331.2999-00.3784	J16122314-5149240
CE 2	...	G331.3093-00.3762	J16122521-5148551
CE 3	...	G331.3205-00.3817	...
CE 4	IRS 552	G331.3131-00.3653	J16122341-5148167
CE 5	IRS 168	G331.3298-00.3735	J16123029-5147575
CE 6	IRS 176	G331.3203-00.3615	J16122445-5147492
CE 7	...	G331.3341-00.3619	J16122844-5147163
CE 8	IRS 645	G331.3541-00.3664	J16123527-5146387
CE 9	IRS 355	G331.3543-00.3585	J16123324-5146173
CE 10	...	G331.3416-00.3464	J16122648-5146177
CE 11	...	G331.3497-00.3497	...

no Mid-IR da Figura 3.6, enquanto que YSOs classe II mostram cores nos intervalos $0.0 \geq [3.6] - [4.5] \geq 0.8$ e $0.4 \geq [5.8] - [8.0] \geq 1.1$. Por fim, espera-se que objetos classe I apresentem as cores típicas $[3.6] - [4.5] \geq 0.7$ e $[5.8] - [8.0] \geq 1.0$ ou, então, $0.2 \leq [3.6] - [4.5] \leq 1.0$ e $[5.8] - [8.0] \geq 1.3$, nos casos em que o núcleo protoestelar está imerso em envelopes de baixa densidade ($\rho_{\text{env}} \sim 10^{-14} \text{ g cm}^{-3}$). Contudo, como não se pode separar os objetos de baixa massa apenas com dados fotométricos, optamos por não separá-los em classes, detendo-se apenas em identificar aqueles em que se detecta excesso de cor intrínseco.

A Tabela 3.4 associa objetos com excessos de cor intrínseco no Mid-IR com as respectivas contrapartidas no NIR. Alguns desses objetos são tão obscurecidos que não foram detectados em nenhuma das bandas do NIR. Como resultado dessas associações, distribuições espectrais de energia (SEDs) das fontes listadas são mostradas na Figura 3.7 e, com base nessas SEDs, a avaliação do índice espectral no infravermelho, definido como

$$\alpha \equiv \frac{d \log \lambda F_{\lambda}}{d \log \lambda}, \quad (3.2)$$

nos permitiu caracterizar objetos estelares jovens classe I. As fontes CE 1 e CE 10 apresentam valores de α bastante elevados em $\lambda \sim 2 \mu\text{m}$, o que caracteriza objetos protoestelares em seus primeiros estágios de evolução. Isto reafirma o que se infere via diagrama CC no Mid-IR, indicando que estas fontes são objetos embebidos em um envelope espesso, com densidades maiores que $10^{-13.35} \text{ g cm}^{-3}$ (veja Figura 1 de Allen et al., 2004).

3.2.5 A fonte IRAS 16085-5138

A construção das SEDs da Figura 3.7 nos permitiu associar um objeto detectado no

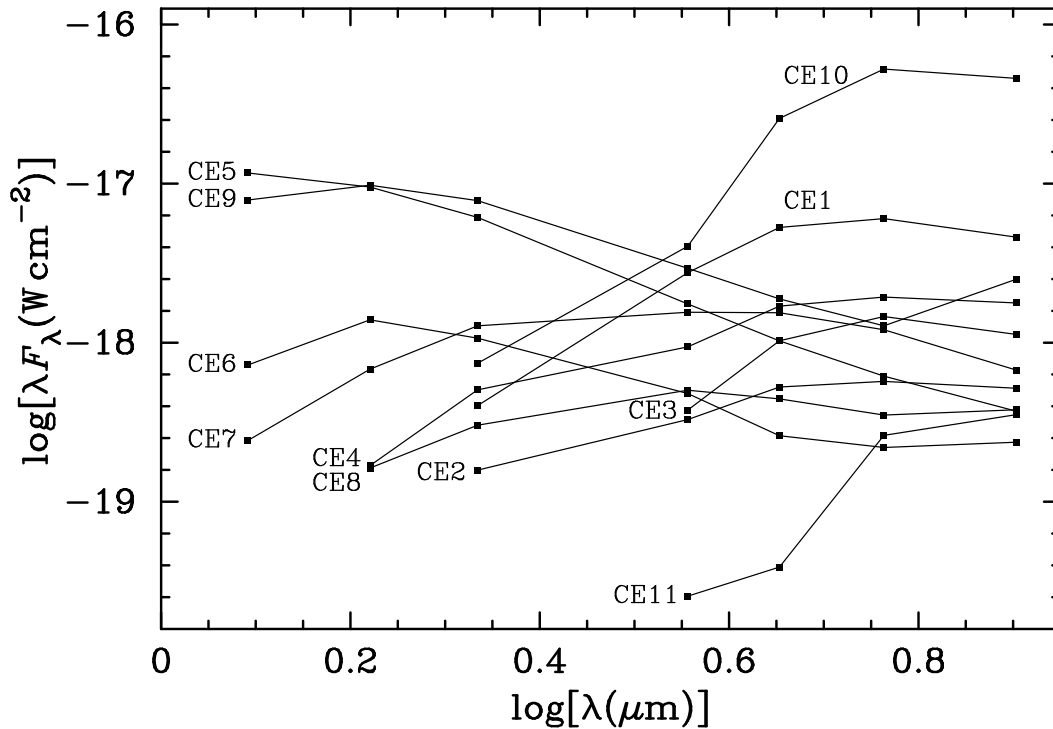


Figura 3.7: Distribuições espectrais de energia dos objetos destacados pelo excesso de emissão no Mid-IR (CE), conforme as associações com fontes NIR mostradas na Tabela 3.4.

Mid-IR à fonte IRAS 16085-5138. CE10 é a fonte Mid-IR mais próxima ($\sim 38''$) à fonte IRAS e aquela que apresenta o maior índice espectral entre os objetos identificados no diagrama CC como YSO classe I.

A Figura 3.8 associa dados dos catálogos do 2MASS, GLIMPSE e IRAS para construir a distribuição espectral de energia desta fonte entre 2 e $100 \mu\text{m}$. Conforme trabalho de Lada (1987), distribuições espectrais de energia crescentes com o comprimento de onda em torno de $\lambda = 2 \mu\text{m}$ são características de classe I. Nesse sentido, avaliamos o índice espectral α da SED mostrada na Figura 3.8 entre 2 e $25 \mu\text{m}$ (veja linha vermelha pontilhada) e encontramos $\alpha \cong 3.6$, valor típico de YSOs imersos em envelopes protoestelares, o que confirma a classificação via diagrama CC (Mid-IR).

Considerando que a maior parte da energia desses objetos é irradiada no IR, um limite inferior para a luminosidade bolométrica da protoestrela embebida pôde ser estimado. Adotando-se a distância de 3.29 kpc e $A_V = 10 \text{ mag}$, a SED da Figura 3.8 foi integrada entre 2 e $100 \mu\text{m}$, de onde obtivemos que $L_* \geq 7.7 \times 10^3 L_\odot$. Da mesma forma, um limite inferior para a massa estelar pode ser obtido diretamente desta estimativa, uma vez que os modelos para objetos pré-sequência principal (e.g., Iben, 1965) indicam que estrelas massivas evoluem com luminosidade constante desde a trajetória de Hayashi até entrarem na ZAMS. Nessas bases, estimamos $M_* \geq 10 M_\odot$, valor que independe do estágio evolucionário pré-sequência principal e corresponde a uma estrela de idade zero do tipo

BO-B1V (cf. Hanson et al., 1997). De fato, conforme esquema de classificação de Wood & Churchwell (1989), todas as cores IRAS desse objeto indicam uma região H II Ultracompacta (UCH II), o que requer uma estrela suficientemente massiva como única fonte ionizante.

3.2.6 Distribuição espacial do conteúdo estelar

Conforme mencionamos na seção 3.1, o catálogo de DBS2003 indica que o aglomerado infravermelho [DBS2003] 157 tem tamanho angular $2.1' \times 1.5'$ e está centrado em $RA(J2000) = 16^h 12^m 20^s$, $Dec.(J2000) = -51^\circ 46' 14''$, o que limita seu conteúdo estelar à região demarcada pelo retângulo preto na Figura 3.1. Contudo, uma análise preliminar da região de $\sim 5' \times 4'$, observada com a CamIV nesse trabalho, indica que esse aglomerado parece se estender por um campo de ao menos $4'$ de diâmetro.

Nos dois diagramas da Figura 3.5, os pontos referentes às estrelas detectadas na região retangular demarcada na Figura 3.1 são representados por círculos cheios, destacando-se, assim, daqueles referentes às outras estrelas do campo observado. Como pode ser verificado, estrelas pertencentes ao aglomerado [DBS2003] 157 e demais estrelas do campo aparecem homoganeamente distribuídas, o que parece indicar um único complexo estelar de tamanho angular $\sim 4' \times 4'$. O histograma apresentado na Figura 3.9 foi construído visando testar essa hipótese, comparando-se o número de fontes detectadas com determi-

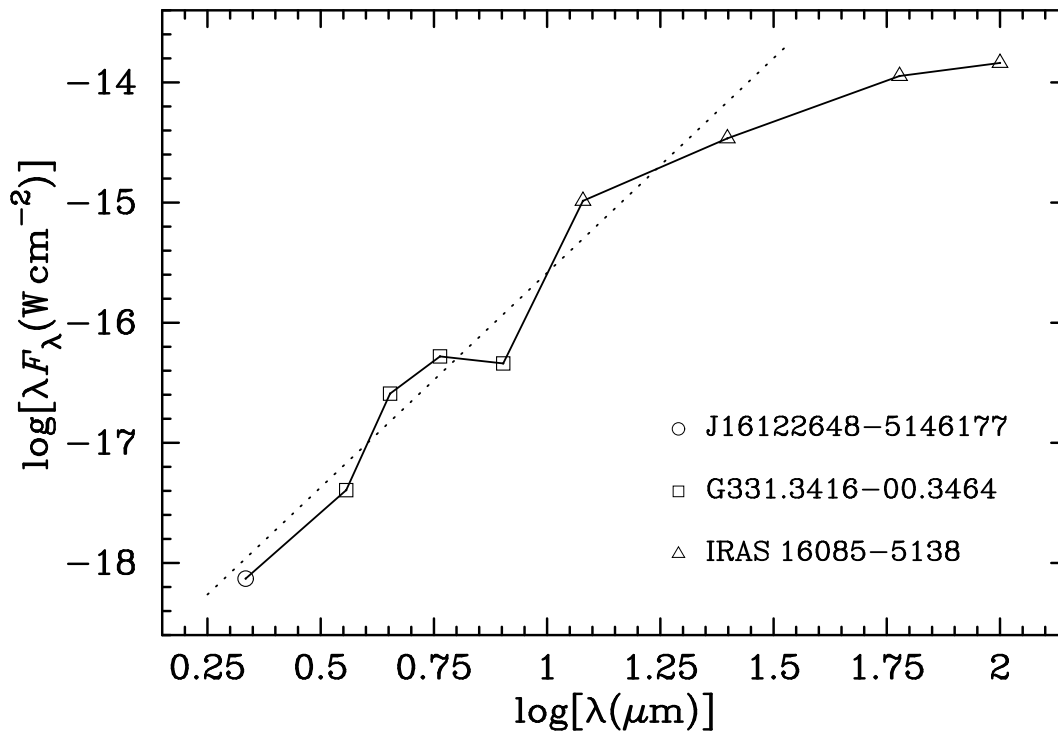


Figura 3.8: Distribuição espectral de energia da fonte CE 10, construída com dados dos catálogos 2MASS, GLIMPSE e IRAS. A linha pontilhada, com índice espectral $\alpha \approx 3.6$, representa o ajuste aos pontos da SED entre 2 e $25 \mu\text{m}$.

nado intervalo de $(H - K_s)$ em cada uma das regiões citadas. Assim como observamos nos diagramas CC e CM, não se pode distinguir entre duas populações estelares, de modo que a presença de um único sistema, estendido por uma região de diâmetro maior ou igual a $4'$, deve ser considerada.

Uma análise de imagens no infravermelho médio acessadas na base de dados do GLIMPSE *survey* dá suporte à hipótese acima discutida. A Figura 3.10 apresenta uma imagem RGB resultante da combinação de imagens em $8.0 \mu\text{m}$ (R), $5.8 \mu\text{m}$ (G) e $3.6 \mu\text{m}$ (B) do GLIMPSE. Nessa combinação, fica bastante evidente que uma estrutura em forma de concha descrita pela emissão de poeira quente, com diâmetro de $\sim 4'$, distribui-se praticamente por todo o campo. As onze fontes com cores de objetos estelares jovens, selecionadas via diagrama CC no Mid-IR, também estão indicadas nessa figura. Essas fontes distribuem-se numa faixa Norte-Sul de $\sim 1.5'$ de largura, externa maior parte da região de mais alto brilho em $8.0 \mu\text{m}$, mas coincidente com o pico que contém a fonte identificada como CE 10.

Visando comparar a região demarcada pela emissão de poeira com a posição das estrelas no campo observado no NIR, a Figura 3.11 traz um diagrama de contornos da emissão em $8.0 \mu\text{m}$ sobreposto à imagem H obtida com a CamIV. YSOs e potenciais estrelas ionizantes selecionados através da análise dos diagramas da Figura 3.5 também aparecem identificados. A distribuição desses objetos sobre todo o campo sugere que uma formação estelar recente deve estar em curso em toda essa região. Da mesma forma, os objetos que recaem na região de estrelas Herbig Ae/Be do diagrama cor-cor no NIR se distribuem de forma relativamente homogênea sob a estrutura observada, assim como no

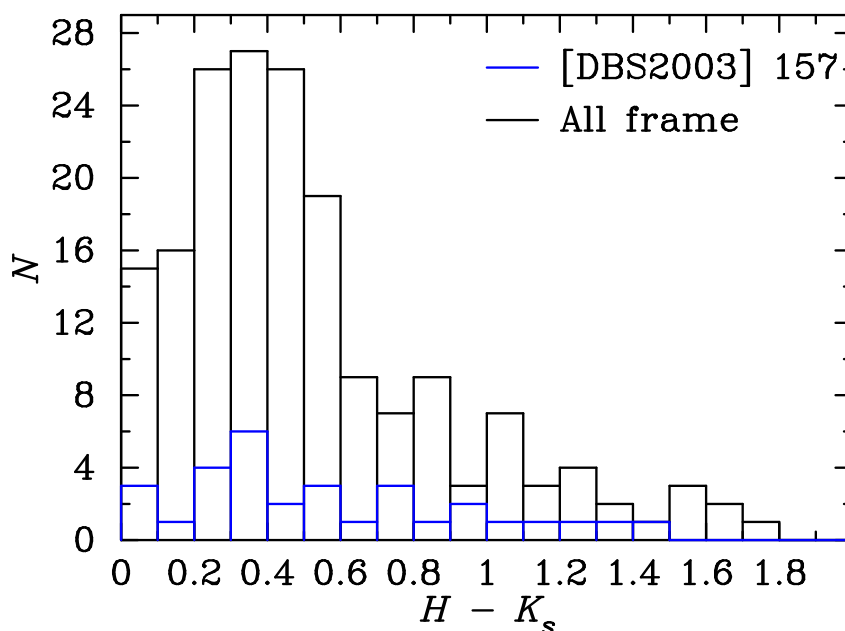


Figura 3.9: Número de estrelas detectadas em cada região como função do índice de cor $H - K$. A região denominada [DBS2003] 157 inclui somente estrelas detectadas no retângulo da Fig. 3.1.

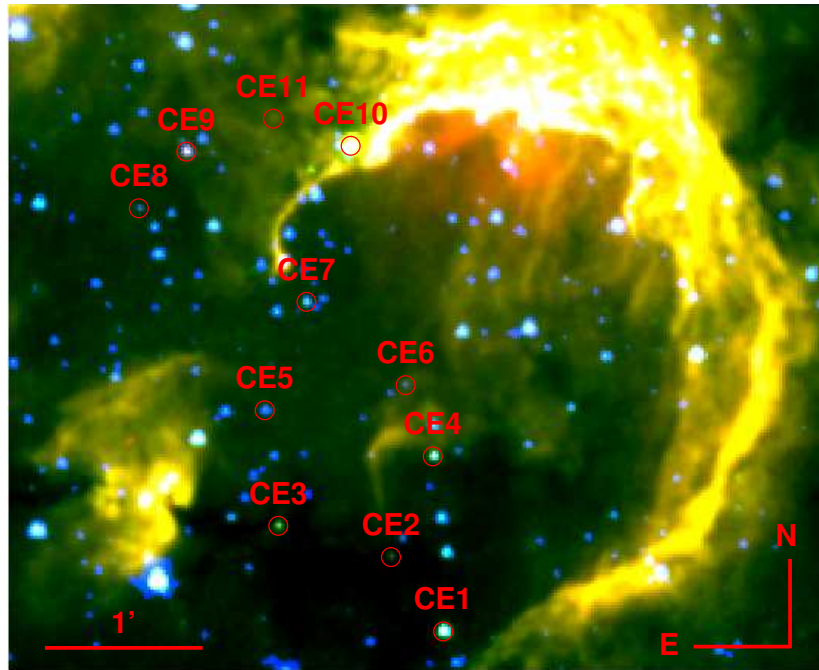


Figura 3.10: Combinação RGB de imagens em $8.0 \mu\text{m}$ (R), $5.8 \mu\text{m}$ (G) e $3.6 \mu\text{m}$ do GLIMPSE. Objetos com excesso de emissão Mid-IR são identificados em acordo com a Tab. 3.4. O pico de emissão em $8.0 \mu\text{m}$ coincide com CE 10 e é identificado como a fonte IRAS 16085-5138.

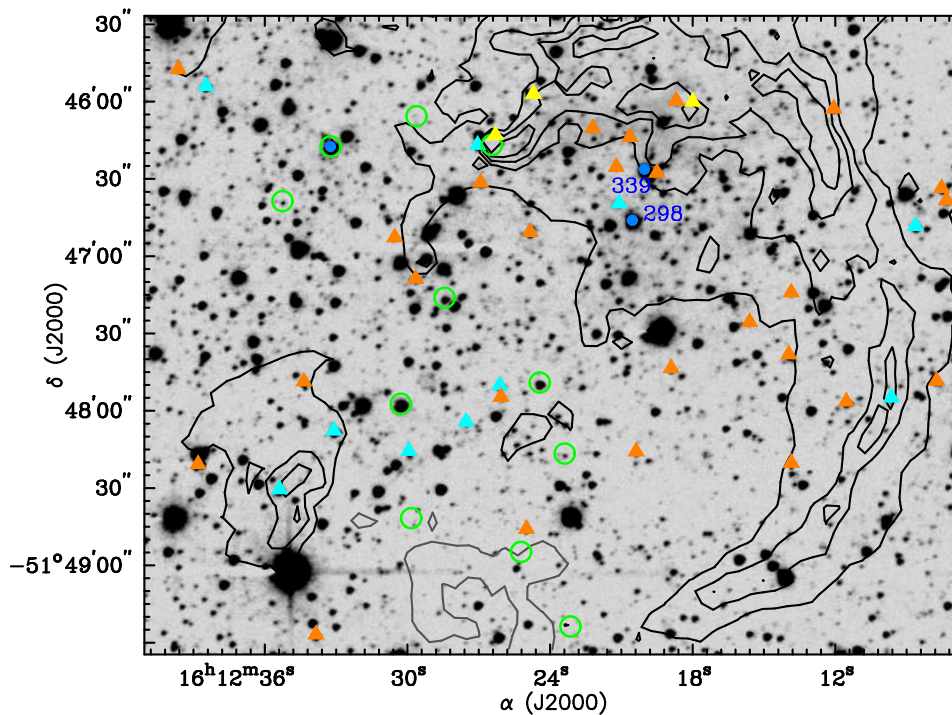


Figura 3.11: Diagrama de contornos da emissão em $8.0 \mu\text{m}$ (IRAC) sobreposto à imagem H de GAL 331.31-00.34. Triângulos amarelos indicam as fontes de masers de metanol e hidroxila. Triângulos em ciano e em laranja localizam YSOs de baixa e alta massa. Círculos verdes denotam as fontes com excesso de cor no Mid-IR.

diagrama CM da Figura 3.5, sugerindo que a maior parte dessas fontes deve pertencer ao aglomerado.

Como resultado da discussão acima, é possível inferir que o aglomerado infravermelho [DBS2003] 157 estende-se, na verdade, por um campo de tamanho angular $\sim 4' \times 4'$ e tem suas estrelas imersas em uma concha de gás e poeira quente associada à região H II GAL 331.31-00.34.

Capítulo 4

Análise do conteúdo estelar do aglomerado infravermelho [DBS2003] 156

[DBS2003] 156 foi identificado por DBS2003 como um aglomerado estelar infravermelho de dimensões $3.0' \times 2.4'$, centrado em $RA(J2000) = 16^h 12^m 15^s$, $Dec.(J2000) = -52^\circ 02' 47''$. Num raio menor que $1'$, associa-se este aglomerado à região H II GAL 331.11-00.51 e à infravermelha fonte IRAS 16083-5154. No texto que segue, analisamos o conteúdo estelar de um campo de $\sim 8' \times 8'$, centrado no aglomerado [DBS2003] 156, e buscamos mostrar que este conjunto de objetos está fisicamente associado ao aglomerado [DBS2003] 157, situado ao norte de [DBS2003] 156, e ao leste da fonte de VHE (Very High Energy) HESS J1614-518, discutidos no Capítulo 3.

Alguns estudos indicando formação estelar massiva na direção de GAL 331.11-00.51 foram publicados nas últimas décadas (Chan et al., 1995; Kuchar & Clark, 1997; Schutte et al., 2000; Walsh et al., 1998). Assim como é observado na direção de [DBS2003] 157, detecções de masers de metanol e hidroxila, bem como linhas moleculares de CS(2-1) (c.f. Bronfman et al., 1996), indicam formação estelar massiva também na direção de [DBS2003] 156, sugerindo uma associação estelar jovem estendida por uma região ainda maior que aquela apresentada no Capítulo 3, distribuindo-se sobre uma faixa Norte-Sul de dezenas de minutos de arco quadrados.

O estudo detalhado dessas associações obscurecidas busca revelar objetos jovens de alta massa, bem como formação estelar sequenciada na borda de nuvens moleculares, cuja ignição é creditada à interação dessas nuvens com ventos de estrelas massivas de uma geração anterior. Em Pinheiro et al. (2012), detectamos um YSO de massa $M_\star = 10 M_\odot$ imerso em uma região com $A_V \sim 20$ e outros 35 objetos pré-sequência principal, cujas formações podem ser atribuídas à interação entre os ventos provindos das estrelas tipo O identificadas e à nuvem molecular que tangencia a região H II GAL 331.11-00.51 associada.

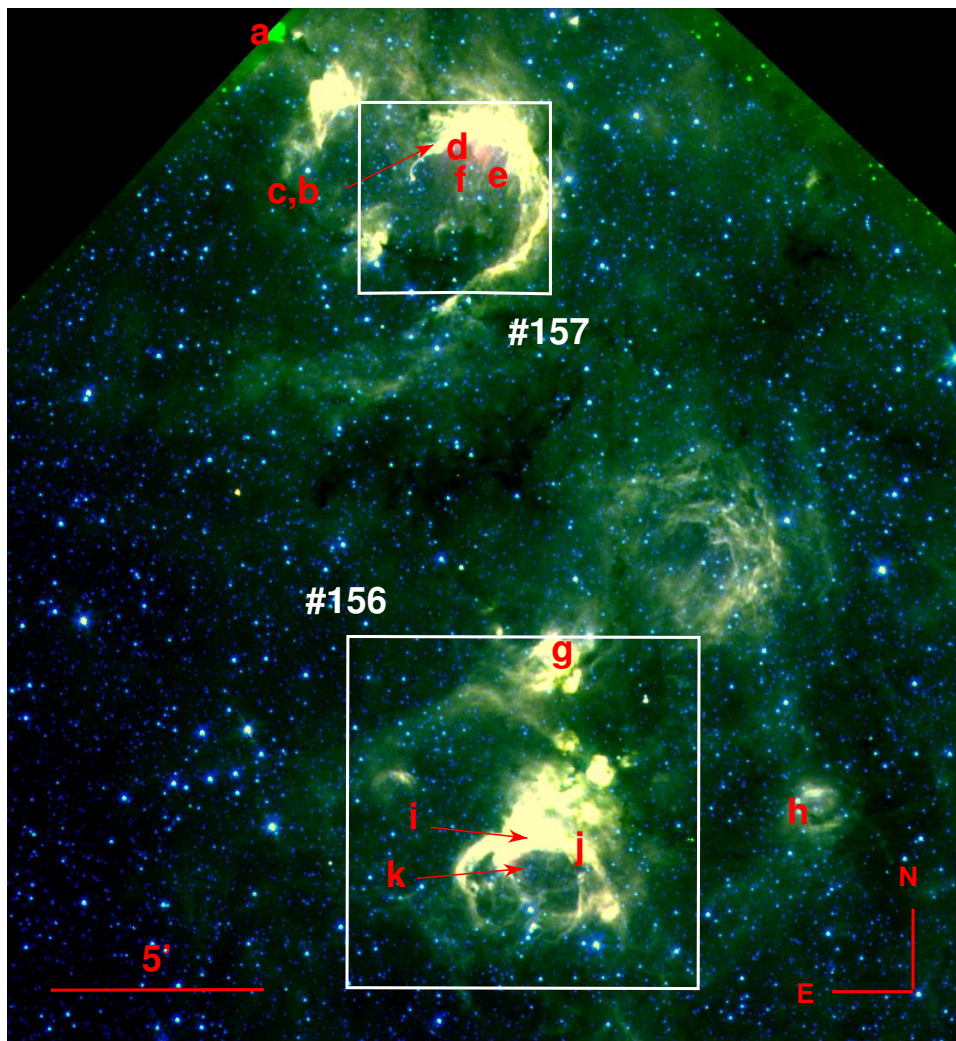


Figura 4.1: Combinação RGB de imagens em $8.0\ \mu\text{m}$ (R), $5.8\ \mu\text{m}$ (G) e $3.6\ \mu\text{m}$ do GLIMPSE. Os campos que contém os aglomerados IR [DBS2003] 156 (ao sul) e 157 (ao norte) estão demarcados pelos retângulos brancos. As letras que variam de “a” até “k” marcam as medidas listadas na Tab. 4.1.

4.1 Estimativa indireta de distância de [DBS2003] 156

Não há na literatura nenhum estudo detalhado do conteúdo estelar da região H II GAL 331.11-00.51 ou do aglomerado IR associado. Dessa forma, uma estimativa de distância indireta teve que ser adotada para possibilitar a análise do diagrama HR e, desse modo, selecionar as principais fontes ionizantes para posterior espectroscopia e comparar os resultados obtidos com estimativas do fluxo de fótons do contínuo Lyman detectado nesta direção. Para isso, tomamos como hipótese inicial que os aglomerados [DBS2003] 156 e 157, pertencentes ao grande complexo GAL 331.5-00.1 (Amaral & Abraham, 1991), estão fisicamente associados e, assim, em distâncias heliocêntricas semelhantes. A figura e a tabela a seguir buscam fundamentar esta hipótese.

A Figura 4.1 apresenta uma combinação RGB da fração do complexo GAL 331.5-00.1

que contém os dois aglomerados citados. A emissão da poeira quente, continuamente espalhada sobre a região, sugere tal associação. A Tabela 4.1 lista medidas de velocidade radial dessas duas regiões com relação ao padrão local de repouso (LSR). Na Coluna 1, indicamos o aglomerado próximo à região a que foi direcionada a medida, enquanto que as coordenadas referentes a cada uma dessas observações são listadas nas Colunas 2 e 3. Todas as medidas listadas na Tabela 4.1 estão também marcadas na Figura 4.1, conforme os índices definidos na Coluna 5. Mesmo sendo obtidas com instrumentações diferentes, as medidas de velocidade radial são muito semelhantes entre si, com média de -65.6 km s^{-1} e desvio padrão de 1.9 km s^{-1} . De fato, flutuações dessa ordem estão dentro do esperado para diferentes regiões de um mesmo objeto.

Ao se aplicar o modelo de Brand & Blitz (1993) para curva de rotação da Galáxia, os dados da Tabela 4.1 retornam rigorosamente os mesmos valores de distância cinemática, $d_{<} = 4.2 \text{ kpc}$ ou $d_{>} = 10.7 \text{ kpc}$. O valor $d_{<}$ é 30% maior que aquele encontrado na Seção 3.2.1 para [DBS2003] 157 via paralaxe espectroscópica. Nas análises das próximas seções, adotaremos a distância espectrofotométrica de 3.29 kpc obtida no capítulo anterior e faremos um primeiro censo de possíveis estrelas ionizantes da região H II GAL 331.11-00.51. Deste censo, selecionamos um conjunto de estrelas-alvo para a espectroscopia no NIR e realizamos uma primeira estimativa de distância direta para [DBS2003] 156, o que nos permitiu verificar a hipótese de que este objeto estaria associado ao aglomerado vizinho [DBS2003] 157. Seguindo a mesma metodologia do Capítulo 3, via fotometria nos infravermelhos próximo e médio, também identificamos objetos com excesso de cor intrínseco, característica que pressupõe objetos estelares jovens.

Tabela 4.1: Medidas de velocidade radial na direção de [DBS2003] 156 e 157

Aglomerado	Coordenadas		$^{\dagger}v_{\text{LSR}}$ (km/s)	ID	Referências
	α (J2000)	δ (J2000)			
[DBS2003] 157 ^E	16 12 52	-51 43 36	-62.6	a	Bronfman et al. (1996)
[DBS2003] 157	16 12 26	-51 46 12	-65.0	b	Walsh et al. (1997)
[DBS2003] 157	16 12 26.3	-51 46 13	-65.0	c	Xu et al. (2003)
[DBS2003] 157	16 12 22	-51 46 18	-64.8	d	Bronfman et al. (1996)
[DBS2003] 157	16 12 15.9	-51 46 58	-66.0	e	Caswell & Haynes (1987)
[DBS2003] 157	16 12 21.8	-51 47 05	-64.4	f	Kuchar & Clark (1997)
[DBS2003] 156 ^N	16 12 06	-51 58 06	-69.4	g	Bronfman et al. (1996)
[DBS2003] 156 ^W	16 11 30	-52 01 54	-63.5	h	Bronfman et al. (1996)
[DBS2003] 156	16 12 12	-52 02 30	-66.5	i	Bronfman et al. (1996)
[DBS2003] 156	16 12 03.7	-52 02 43	-66.4	j	Caswell & Haynes (1987)
[DBS2003] 156	16 12 12.7	-52 03 13	-67.7	k	Kuchar & Clark (1997)

^{W,N} Regiões a oeste e ao norte de [DBS2003] 156.

^E Região a leste de [DBS2003] 157.

[†] $\langle v_{\text{LSR}} \rangle \pm \sigma = (-65.6 \pm 1.9) \text{ km s}^{-1}$.

4.2 Observação e redução dos dados fotométricos

DBS2003 indicaram o aglomerado IR #156 na direção $RA(J2000) = 16^h12^m15^s$, $Dec(J2000) = -52^\circ02'47''$ e com dimensões $\sim 3.0' \times 2.4'$. Visando incluir todas as fontes situadas na direção indicada por estes autores, bem como as fontes distribuídas na vizinhança desta região sob forte emissão no IR médio, optamos por obter dados fotométricos de um campo bem mais extenso, englobando desde a parte sul do aglomerado, até a fonte IRAS 16082-5150, $\sim 4.5'$ ao norte de [DBS2003] 156.

Os dados fotométricos no IR próximo foram obtidos no OPD usando a câmera infravermelha CamIV, acoplada ao telescópio de 0.60 m, Boller & Chivens. As características instrumentais são aquelas apresentadas na Seção 3.1.1. Para evitar a saturação das estrelas mais brilhantes nas bandas J e H e, devido ao alto ruído térmico detectado na banda K_s , um conjunto bastante numeroso de exposições curtas foi obtido em cada filtro. Cada série foi dividida em cinco subconjuntos deslocados, neste caso, por aproximadamente $20''$ entre si. Com este deslocamento, pixels defeituosos e eventuais raios cósmicos têm seu efeito eliminado ao se tomar a mediana das imagens de todo o conjunto. Os tempos totais de integração nos filtros J , H e K_s somam 1750, 1750 e 4200 s, respectivamente.

A remoção da assinatura instrumental e a construção das imagens combinadas em cada filtro, bem como os processos de extração das magnitudes instrumentais seguiram os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.1.1. A combinação das imagens gerou *frames* de $\sim 7.3' \times 7.3'$ centrados em $RA(J2000) = 16^h12^m15^s$, $Dec(J2000) = -52^\circ01'56''$. A Figura 4.2 traz uma imagem H do campo resultante, em que se marca todas as fontes para as quais se obteve magnitudes instrumentais nas três bandas, o que soma 307 pontos.

A calibração fotométrica foi realizada usando dados do catálogo 2MASS (Cutri et al., 2003). Para isto, sessenta estrelas relativamente isoladas, tanto nas imagens do 2MASS (menor resolução) quanto nos dados da CamIV, e externas à região de intensa emissão em $8.0 \mu\text{m}$ foram selecionadas. Este conjunto de estrelas distribui-se sobre uma faixa vertical a leste de [DBS2003] 156, conforme indicado na Figura 4.2. A correlação linear $\text{mag}(\text{CamIV}) \times \text{mag}(2\text{MASS})$, mostrada na Figura 4.3 (base), foi determinada usando o método dos mínimos quadrados. Os desvios padrão dos ajustes foram de 0.048, 0.045 e 0.050 para as bandas J , H e K_s , respectivamente, todos gerados pela tarefa **evalfit**. Analisando histogramas de $\log(N)$ vs. m , em que N é o número de fontes detectas num dado intervalo de magnitudes centrado em m , o limite de completeza dessa fotometria, definido como o ponto em que cessa o crescimento linear de $\log(N)$ com m , foi estimado em $J = 15.9$ mag, $H = 15.6$ mag, e $K_s = 13.8$ mag.

A Tabela B.2 (Apêndice B) apresenta o resultado final da fotometria para todas as estrelas em que se obteve magnitudes aparentes nas três bandas do infravermelho próximo. As colunas 1, 2 e 3 fornecem o identificador atribuído a cada estrela dessa fotometria e as coordenadas J2000 dessas estrelas no Sistema Equatorial. Tais coordenadas foram

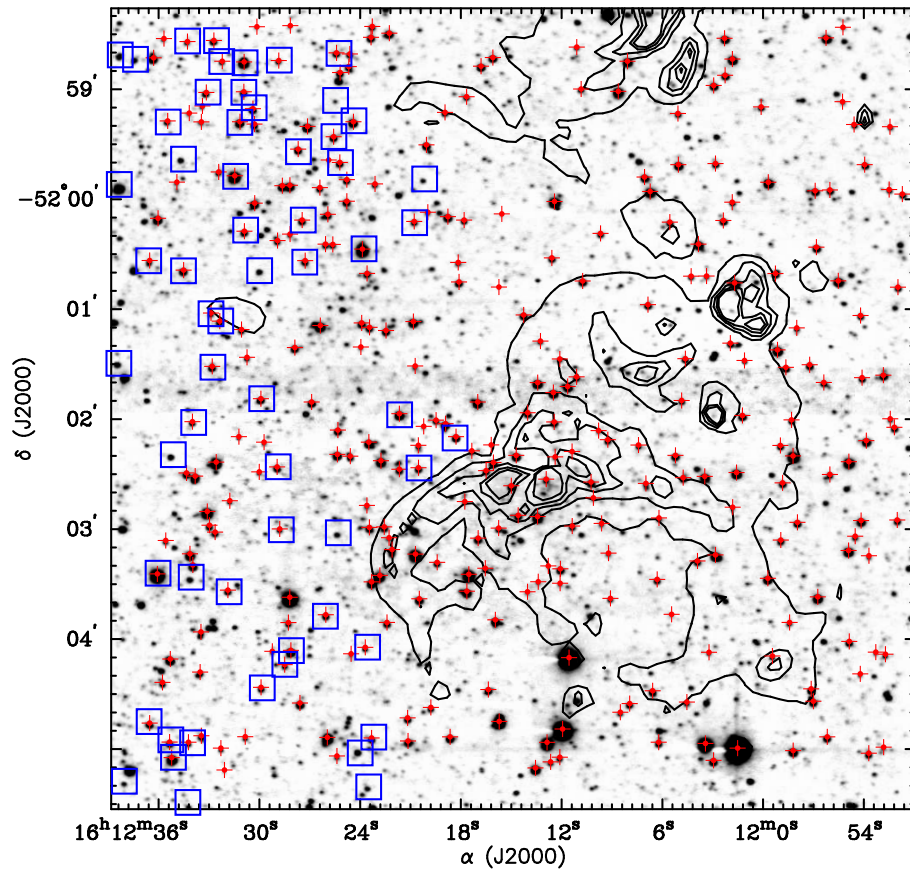


Figura 4.2: Imagem na banda H do campo observado na direção de [DBS2003] 156, com os contornos da emissão em $8.0\ \mu\text{m}$ (GLIMPSE) sobrepostos. O símbolo “+” indica cada uma das fontes detectas simultaneamente nas três bandas do infravermelho próximo, enquanto que os quadrados azuis denotam as estrelas selecionadas para calibração fotométrica.

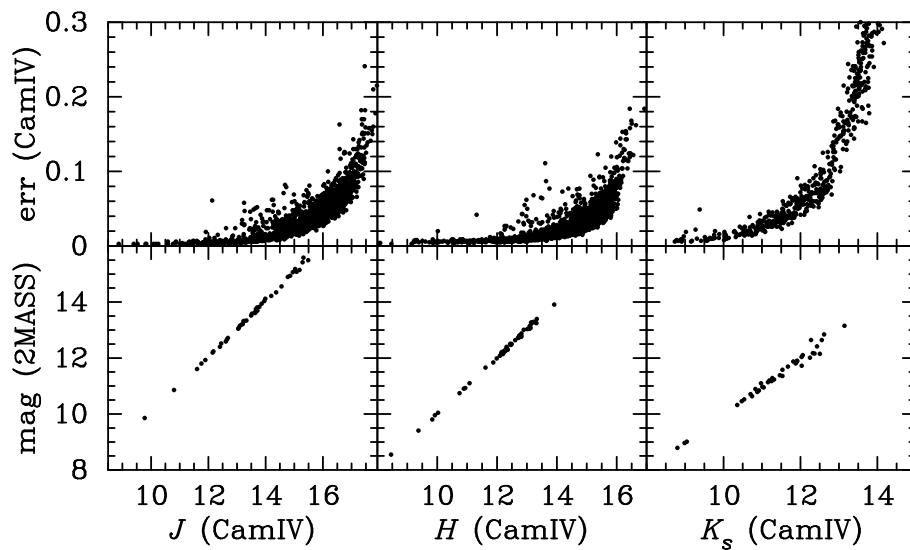


Figura 4.3: Topo: Variação das margens de erro finais da fotometria. Base: Correlação linear entre os sistemas CamIV/OPD e 2MASS. Os desvios dos ajustes foram de 0.048, 0.045 e 0.050 para as bandas J , H e K_s , respectivamente.

obtidas ao se converter com a rotina **ccmap** as coordenadas em pixels determinadas com o **daofind**. As colunas 4, 5 e 6 listam as magnitudes J , H e K_s e seus erros propagados. Os erros fotométricos finais foram estimados por soma quadrática dos erros das equações de transformação e das magnitudes instrumentais, calculados pela tarefa **allstar** ao se aplicar essas equações no conjunto de dados. No topo da Figura 4.3, mostramos a dependência desses erros com a magnitude fotométrica em cada banda. Nas bandas J e H , respectivamente, 67% e 82% das medidas têm erros finais menores que 0.05 mag, enquanto que na banda K_s este número cai para 31%. Dentro da amostra de estrelas listadas na Tabela B.2, esses percentuais sobem para 94%, 99% e 52%.

4.3 Pré-seleção de fontes ionizantes

Visando obter uma primeira estimativa de distância espectrofotométrica para o aglomerado [DBS2003] 156 e para a região H II associada, uma seleção preliminar de possíveis estrelas ionizantes de GAL 331.11-00.51 se fez necessária. Uma vez que este tipo de seleção também depende da precisão de distância assumida, tomamos como base a hipótese levantada no início deste capítulo e adotamos o valor de 3.29 kpc encontrado para o aglomerado vizinho.

A Figura 4.4 apresenta os diagramas CC e CM que contém os dados de todas as estrelas listadas na Tabela B.2. As sequências principais de idade zero dispostas nestes diagramas foram construídas com cores intrínsecas de Koornneef (1983) e magnitudes absolutas de Vacca et al. (1996) para estrelas tipo O e de Wegner (2007) para os demais tipos espectrais, todas transformadas para o sistema fotométrico do 2MASS usando as equações de Carpenter (2001). Dados intrínsecos para estrelas T Tauri clássicas foram extraídos de Meyer et al. (1997), enquanto que a região onde se identifica candidatas a estrelas Herbig Ae/Be foi definida com base nos dados de Lada & Adams (1992). Os vetores de avermelhamento traçados nos dois diagramas seguem a lei de extinção compilada por Stead & Hoare (2009). Os valores de magnitude absoluta que descrevem a ZAMS da Figura 4.4 foram transformados para a distância de 3.29 kpc adotada. Na análise do diagrama cor-cor, assumimos que o espalhamento em torno do vetor de avermelhamento das estrelas tipo O, devido às margens de erro nas cores aparentes e intrínsecas, não supera 0.1 mag. Já no diagrama cor-magnitude, consideramos apenas estrelas indicadas como B0-B0.5 V ou de maiores temperaturas. Nessas bases, um conjunto de 12 estrelas (enumeradas na Fig. 4.4) apresentaram cores e magnitudes coerentes com o esperado para potenciais estrelas ionizantes de GAL 331.11-00.51.

Na próxima seção, apresentamos dados espectroscópicos de uma amostra de cinco estrelas desse conjunto e de uma sexta estrela tangente à região observada com a CamIV, cujos dados fotométricos foram tomados no catálogo 2MASS.

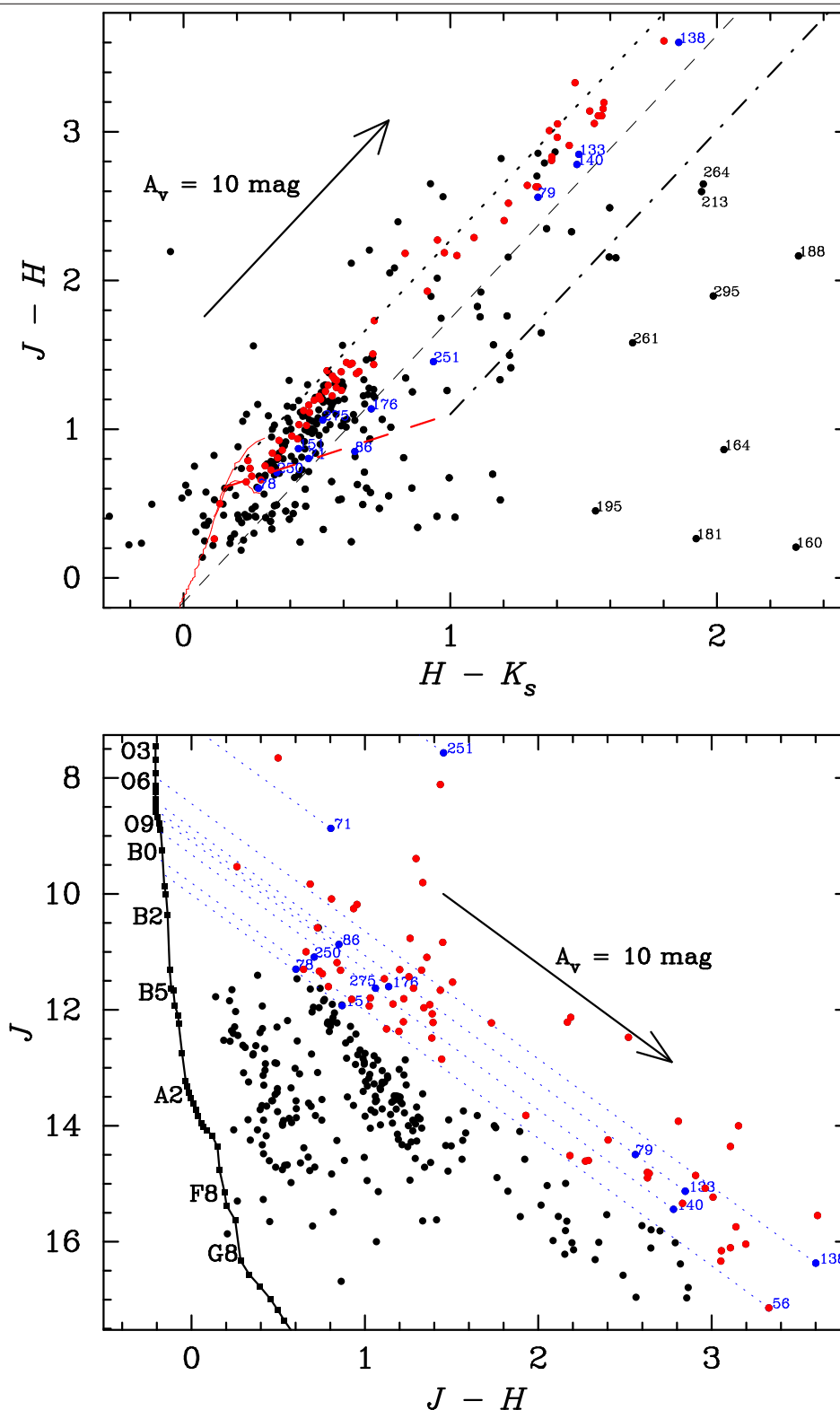


Figura 4.4: Topo: diagrama CC das IRS detectadas no campo de $7.3' \times 7.3'$. A linha vermelha sólida traça cores intrínsecas de estrelas anãs, enquanto a tracejada demarca T Tauri clássicas. Linhas pretas pontilhada, tracejada e ponto-tracejada indicam os vetores A_V para estrelas tipo M, O e T Tauri clássicas. Base: diagrama CM. A linha preta traça a ZAMS com M_V transformadas para $d_{\text{helioc}} = 3.29 \text{ kpc}$. Pontos localizados acima do vetor A_V de estrelas B0-B0.5 V são postos em vermelho nos dois diagramas, a exceção daqueles cujos índices de cor indicaram estrelas massivas no diagrama CC, os quais estão marcados em azul.

Tabela 4.2: Lista de observações espectroscópicas

ID		Exp. indiv. (s)		Nº de Exp.		Data da observação
CamIV	2MASS	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	
IRS 71	J16122818-5203370	20	20	08	08	07/04/2012
IRS 86	J16122595-5204533	50	50	08	08	03/05/2012
IRS 151	J16121764-5203337	75	75	12	12	03/05/2012
IRS 176	J16121344-5202530	70	70	08	08	07/04/2012
IRS 251	J16120153-5204594	10	10	04	04	03/05/2012
...	J16122876-5206018	50	50	08	08	03/05/2012

4.4 Observação e redução dos dados espectroscópicos e classificação espectral

Dados espectroscópicos no NIR de seis estrelas observadas no campo de GAL 331.11-00.51 foram adquiridos com o espectrógrafo OSIRIS, acoplado ao telescópio de 4.1 m do SOAR, nos meses de abril e maio de 2012. Os espectros foram obtidos nas bandas *H* e *K*, usando o modo clássico de fenda longa com resolução $R \sim 3000$. A fenda, com tamanho angular projetado no plano do céu de $\sim 0.42'' \times 72''$, foi orientada na direção Leste-Oeste.

As observações seguiram o procedimento padrão de *dithering* AB. O tempo total de exposição em cada banda foi dividido em um conjunto de até 12 exposições curtas alternadas entre as posições A e B. Os tempos de integração em cada filtro (Col. 3 e 4) e os respectivos números de exposições (Cols. 5 e 6) estão listados na Tabela 4.2, juntamente com a enumeração correspondente a fotometria deste trabalho (Col. 1) e do *survey* 2MASS (Col. 2). Estrelas padrão espectroscópicas A e G foram observadas em massas de ar semelhantes e no mesmo bloco das exposições da estrela alvo, visando remover linhas de absorção telúricas.

Os espectros crus foram reduzidos com *software* IRAF, seguindo procedimentos usuais de subtração do céu, divisão por *flat-field* normalizado, extração dos espectros unidimensionais e calibração em comprimento de onda. Os espectros finais foram combinados e divididos pelo espectro da estrela padrão A0V, já livre de linhas de absorção fotosféricas removidas por interpolação na banda *K* e, na banda *H*, por divisão pelo espectro da padrão tipo G, seguindo procedimentos descritos por Blum et al. (1997). A normalização dos espectros foi realizada com a rotina **splot** (**onedspec**/IRAF), dividindo-os por um polinômio spline cúbico ajustado aos pontos do espectro com ordem fixada entre 6 e 10.

As Figuras 4.5 e C.2 mostram os espectros finais, normalizados, das seis estrelas listadas na Tabela 4.2. Seguindo os procedimentos de classificação listados na seção 3.2.1, classificamos as estrelas IRS 86 e IRS 251 (Apêndice C) como tipos tardios K5, o que as coloca em posições mais próximas ao Sol que o aglomerado de interesse e nos faz excluí-las

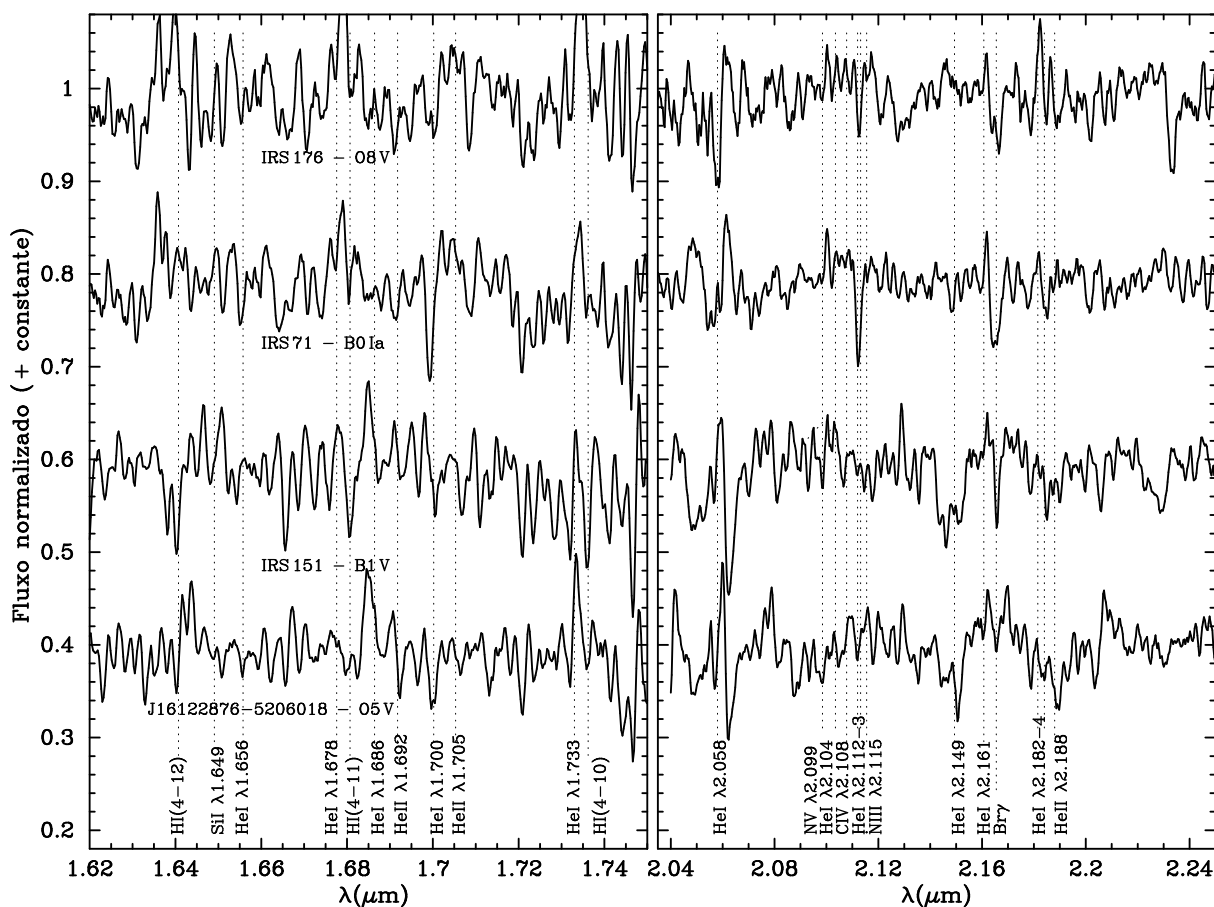


Figura 4.5: Espectros das estrelas quentes do campo de GAL 331.11-00.51. Os espectros estão identificados pelo nome da estrela (conforme a Tabela B.2) seguido de sua classificação espectral.

da análise que segue. Já os quatro espectros apresentados na Figura 4.5, por outro lado, mostraram características de estrelas massivas, revelando-se assim como prováveis fontes ionizantes da região H II GAL 331.11-00.51.

4.5 Paralaxe espectroscópica das estrelas ionizantes de [DBS2003] 156 e cálculo do fluxo de fótons Lyman

As distâncias das estrelas IRS 71, IRS 151, IRS 176 e 2MASS 16122876-5206018, classificadas respectivamente como B0 Ia, B1 V, O8 V e O5 V, foram calculadas por paralaxe espectroscópica, obtendo-se, dessa forma, uma estimativa de distância para o aglomerado [DBS2003] 156 independente dos dados do aglomerado vizinho [DBS2003] 157. A lei de extinção adotada é aquela compilada por Stead & Hoare (2009), unida a cores intrínsecas de Koornneef (1983), magnitudes absolutas de Vacca et al. (1996) para as estrelas tipo O e de Wegner (2007) para os demais tipos espectrais, todas transformadas

para o sistema 2MASS usando as relações de Carpenter (2001). Nessas bases, obtivemos $d = 3.24 \pm 0.51$ kpc ($A_J = 2.03, A_V = 6.99$) para IRS 71, $d = 2.85 \pm 0.46$ kpc ($A_J = 2.24, A_V = 7.72$) para IRS 151, $d = 3.38 \pm 0.58$ kpc ($A_J = 2.96, A_V = 10.21$) para IRS 176 e $d = 3.75 \pm 0.63$ kpc ($A_J = 2.82, A_V = 9.71$) para 2MASS J16122876-5206018¹. Adotando o valor médio dessas distâncias como distância heliocêntrica da região H II GAL 331.11-00.51, temos $d_{\text{helioc}} = 3.31 \pm 0.55$ kpc e extinção visual média $\langle A_V \rangle$ da ordem de 9 mag.

A distância acima encontrada é muito próxima daquela determinada na Seção 3.2.2 para duas estrelas do aglomerado [DBS2003] 157 ($d_{\text{helioc}} = 3.29 \pm 0.58$ kpc). Com isso, o censo inicial de potenciais estrelas ionizantes com base na análise dos diagramas CC e CM da Figura 4.4 não se altera, à exceção daquelas estrelas identificadas como estrelas frias na classificação espectral. Atendo-se àquelas estrelas fotometricamente indicadas como B0-B0.5 V ou mais recentes, listamos na Tabela 4.3 o conjunto de potenciais fontes ionizantes da região H II GAL 331.11-00.51, junto a suas classificações fotométricas e espectroscópicas (Cols. 3 e 4).

Seguindo a calibração de Schaerer & de Koter (1997), encontramos que as estrelas listadas na Tabela 4.3 somam $N_{\text{Ly}} = 10^{49.94}$ fótons s^{-1} . Uma estimativa de N_{Ly} via densidade de fluxo do contínuo rádio foi realizada para testar a completeza da amostra de fontes ionizantes identificadas. Para isso, adotamos os parâmetros descritos na Seção 3.2.3 e a expressão 3.1, bem como as medidas de S_ν de Caswell & Haynes (1987), obtidas em 5 GHz com feixe de tamanho $4.1' \times 4.4'$, e obtivemos $N_{\text{Ly}} = 10^{48.68}$ fótons s^{-1} . Este valor está

¹Esta estrela está localizada $30''$ ao sul do limite do campo observado. Com isso, as magnitudes usadas nessa estimativa foram tomadas no catálogo 2MASS.

Tabela 4.3: Estrelas ionizantes de GAL 331.11-00.51

Estrela		Classificações	
CamIV	2MASS	Fotométrica	Espectroscópica
IRS 56	J16123001-5202286	B0:	...
...	J16122876-5206018	mid-O	O5 V
IRS 71	J16122818-5203370	...	B0 Ia
IRS 78	J16122713-5159203	B0.5:	...
IRS 79	J16122688-5201506	mid-O	...
IRS 133	J16122053-5202263	mid-O	...
IRS 138	J16121979-5204370	mid-O	...
IRS 140	J16121941-5203179	late-O	...
IRS 151	J16121764-5203337	B0.5:	B1 V
IRS 176	J16121344-5202530	late-O	O8 V
IRS 250	J16120159-5202290	B0:	...
IRS 275	J16115675-5203368	O9.5:	...

uma ordem de grandeza abaixo daquele somado pelas estrelas indicadas como prováveis fontes ionizantes. O fato das estrelas selecionadas somarem N_{Ly} maior que aquele medido de forma indireta pode indicar, em primeira análise, que uma fração de fótons do contínuo Lyman escapa da nebulosa antes de serem absorvidos e reemitidos em fótons menos energéticos. Contudo, grande parte do “excesso” encontrado pode ser uma simples consequência da imprecisão da classificação fotométrica, em especial no tocante daquelas estrelas com $A_V \sim 20$ mag, ou devido ao tamanho limitado do feixe do instrumento utilizado, nesse caso, com $1/3$ da área do campo em que se espalham as estrelas incluídas no cálculo, o que exclui a principal fonte ionizante espectroscopicamente classificada. De fato, independentemente dessas imprecisões, $N_{Ly}^{stars} > N_{Ly}^{S_V}$ indica que, mesmo superestimada, a lista de estrelas que mantém a ionização da região H II GAL 331.11-00.51 pode estar completa, contendo as principais fontes ionizantes do campo.

4.6 Identificação e classificação de YSOs

O diagrama CC da Figura 4.4 aponta dezenas de objetos com excesso de cor-intrínseco, característica discutida na Seção 3.2.4 como evidência fotométrica de discos ou envelopes circumstelares acretando matéria, o que classifica essas fontes IR como YSOs. A detecção desses objetos vem ao encontro da hipótese de que o campo observado cobriria uma região de intensa formação estelar, uma vez que, nessa direção, detectou-se emissão de masers e linhas moleculares só passíveis de serem geradas em regiões de altas densidades de matéria.

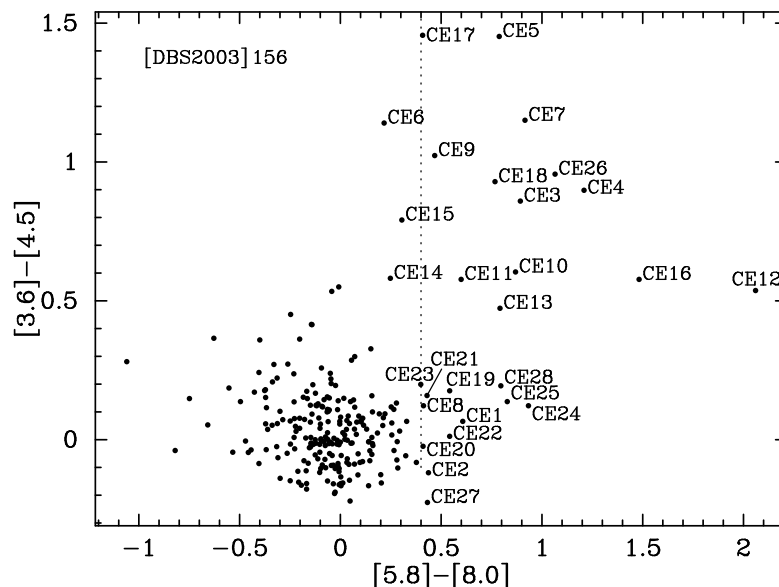


Figura 4.6: Diagrama cor-cor de fontes Mid-IR detectadas em uma região de raio $5'$, centrada na imagem H da Fig. 4.2. Pontos representando objetos com excesso de cor intrínseco no Mid-IR recaem à direita da linha pontilhada. YSOs classe III e outros objetos do campo povoam o entorno do ponto $(0, 0)$.

Tabela 4.4: Lista de YSOs conforme a fotometria NIR

CamIV	Identificador		Classif. fotom.
	2MASS	GLIMPSE	
1	J16123654-5200336	G331.1977-00.5377	H AeBe
2	J16123657-5204456	G331.1497-00.5887	T Tau
8	J16123939-5159174	G331.2175-00.5272	H AeBe
13	J16123491-5159508	...	H AeBe
17	J16123420-5159130	G331.2085-00.5172	T Tau
20	J16123401-5202012	G331.1762-00.5509	T Tau
25	J16123355-5204178	G331.1494-00.5778	T Tau
36	J16123239-5159448	G331.1992-00.5207	H AeBe
40	...	...	H AeBe
45	J16123123-5202095	G331.1695-00.5477	T Tau
63	J16122893-5202261	G331.1621-00.5470	T Tau
67	J16122814-5158252	G331.2064-00.4969	H AeBe
69	J16122817-5200190	G331.1848-00.5200	H AeBe
84	J16122593-5200082	G331.1826-00.5139	T Tau
85	J16122580-5200582	G331.1729-00.5238	H AeBe
95	J16122480-5159494	G331.1841-00.5080	H AeBe
102	J16122396-5201206	G331.1652-00.5251	H AeBe
106	J16122357-5200404	G331.1722-00.5164	T Tau
107	J16122360-5202469	G331.1481-00.5419	T Tau
118	J16122256-5202586	G331.1439-00.5425	H AeBe
122	J16122227-5158294	...	H AeBe
127	J16122114-5204554	...	H AeBe
130	J16122072-5201311	G331.1571-00.5216	T Tau
132	J16122053-5202143	G331.1486-00.5299	H AeBe
135	J16122021-5202038	G331.1500-00.5272	H AeBe
137	J16121997-5200071	G331.1717-00.5032	H AeBe
139	J16121948-5202004	G331.1492-00.5253	H AeBe
149	J16121777-5202447	G331.1377-00.5313	T Tau
160	J16121621-5202140	...	H AeBe
164	...	...	H AeBe
167	J16121556-5200079	...	T Tau
173	J16121404-5203340	G331.1213-00.5347	T Tau
177	J16121339-5203287	G331.1211-00.5325	T Tau
178	J16121325-5201173	G331.1457-00.5055	H AeBe
179	J16121292-5202329	...	T Tau
181	J16121278-5203200	G331.1218-00.5298	H AeBe
183	J16121266-5205069	G331.1011-00.5511	H AeBe
187	J16121240-5202206	...	H AeBe
188	J16121211-5201271	G331.1417-00.5056	H AeBe
195	J16121139-5202177	...	H AeBe

Tabela 4.4: *continuação.*

CamIV	Identificador		Classif. fotom.
	2MASS	GLIMPSE	
196	J16121137-5202583	G331.1231-00.5228	T Tau
202	J16121011-5202428	...	H AeBe
203	J16120980-5202062	G331.1301-00.5095	H AeBe
207	J16120921-5203130	G331.1162-00.5221	H AeBe
210	J16120851-5204398	G331.0985-00.5384	H AeBe
213	J16120742-5202141	G331.1241-00.5069	H AeBe
216	J16120686-5200574	G331.1376-00.4904	H AeBe
220	J16120620-5202538	G331.1143-00.5128	H AeBe
235	J16120338-5200419	G331.1340-00.4811	H AeBe
237	J16120322-5204071	G331.0948-00.5225	H AeBe
257	J16115945-5204091	...	T Tau
261	J16115895-5203058	G331.0985-00.5026	H AeBe
264	J16115843-5203507	G331.0889-00.5108	H AeBe
269	J16115795-5202562	G331.0984-00.4989	H AeBe
280	J16115603-5202298	G331.0998-00.4901	H AeBe
282	J16115525-5159067	G331.1369-00.4476	H AeBe
283	J16115525-5158260	G331.1446-00.4393	H AeBe
295	J16115370-5203145	G331.0870-00.4951	H AeBe
297	J16115330-5204069	G331.0763-00.5051	T Tau
299	J16115284-5204590	G331.0655-00.5148	H AeBe
302	J16115243-5159204	G331.1290-00.4454	T Tau
303	J16115242-5201597	G331.0988-00.4777	T Tau

Considerando que muitos objetos podem estar obscurecidos em regiões com alto A_V , a busca por YSOs no entorno da região H II GAL 331.11-00.51 em maiores comprimentos de onda também se impõe. Nesse sentido, demarcamos uma região de 5' de raio e centro correspondente ao campo observado na banda H e pesquisamos por fontes pontuais no Mid-IR do catálogo do GLIMPSE. A Figura 4.6 apresenta um diagrama cor-cor com dados de 242 fontes detectadas simultaneamente nas quatro bandas do *survey*.

Seguindo os critérios de identificação e classificação de YSOs jovens descritos na Seção 3.2.4, 42 YSOs foram selecionados segundo a fotometria no NIR e 28 segundo os dados no Mid-IR, todos respectivamente listados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Na primeira, associamos os IDs da fotometria deste trabalho, do 2MASS e do GLIMPSE, respectivamente nas Col 1, 2 e 3, juntamente com uma pré-classificação fotométrica desses candidatos a YSOs, separando-os em estrelas T-Tauri (T Tau) ou Herbig Ae/Be (H AeBe). Já na Tabela 4.5, associamos objetos com excessos de cor intrínseco no Mid-IR com as respectivas contrapartidas no NIR.

Tabela 4.5: Lista de YSOs conforme a fotometria Mid-IR do GLIMPSE

Este trabalho		<i>Surveys</i>	
MIR	NIR	GLIMPSE	2MASS
CE 1	...	G331.1128-00.4352	J16114510-5159335
CE 2	...	G331.0590-00.5038	J16114805-5204461
CE 3	...	G331.1077-00.4711	J16115319-5201202
CE 4	...	G331.1329-00.4473	J16115405-5159160
CE 5	...	G331.1342-00.4460	J16115406-5159092
CE 6	...	G331.1242-00.4597	J16115478-5200089
CE 7	...	G331.1298-00.4650	J16115789-5200098
CE 8	IRS 238	G331.1530-00.4593	J16120294-5158578
CE 9	...	G331.1331-00.4897	J16120541-5201066
CE 10	IRS 213	G331.1241-00.5069	J16120742-5202141
CE 11	...	G331.1720-00.4574	J16120785-5158057
CE 12	...	G331.1732-00.4596	J16120878-5158093
CE 13	...	G331.1721-00.4625	J16120928-5158185
CE 14	...	G331.1046-00.5351	J16120936-5204163
CE 15	...	G331.1047-00.5414	J16121109-5204326
CE 16	IRS 177	G331.1211-00.5325	J16121339-5203287
CE 17	...	G331.0790-00.5451	J16120477-5205455
CE 18	...	G331.1290-00.5331	J16121581-5203109
CE 19	...	G331.1009-00.5636	J16121595-5205401
CE 20	...	G331.0978-00.5818	J16121991-5206354
CE 21	...	G331.1722-00.5095	J16122180-5200225
CE 22	...	G331.1143-00.5830	J16122493-5205581
CE 23	...	G331.1474-00.5621	J16122878-5203414
CE 24	...	G331.0851-00.5765	J16121491-5206529
CE 25	...	G331.1772-00.5602	J16123673-5202231
CE 26	...	G331.1795-00.5779	J16124218-5203040
CE 27	...	G331.2008-00.5557	J16124225-5201131
CE 28	...	G331.1857-00.5753	J16124322-5202415

4.7 Distribuição espacial das fontes ionizantes e dos YSOs

A fotometria no NIR descrita neste capítulo refere-se a dados de um campo $\sim 7.3' \times 7.3'$ centrado em $RA(J2000) = 16^h12^m15^s$, $Dec(J2000) = -52^\circ01'56''$, $\sim 53''$ a norte das coordenadas de [DBS2003] 156. Os dados dos *surveys* 2MASS e GLIMPSE, por outro lado, incluíram dados de uma região circular de $5'$ de raio e centro correspondente ao primeiro. Com isso, algumas das regiões analisadas não se sobrepuseram e a análise de seus objetos se ateve unicamente aos dados da literatura.

A Figura 4.7 mostra uma imagem H do campo observado, situando no próprio campo e na sua vizinhança as estrelas apontadas como fontes ionizantes da região H II GAL 331.11-

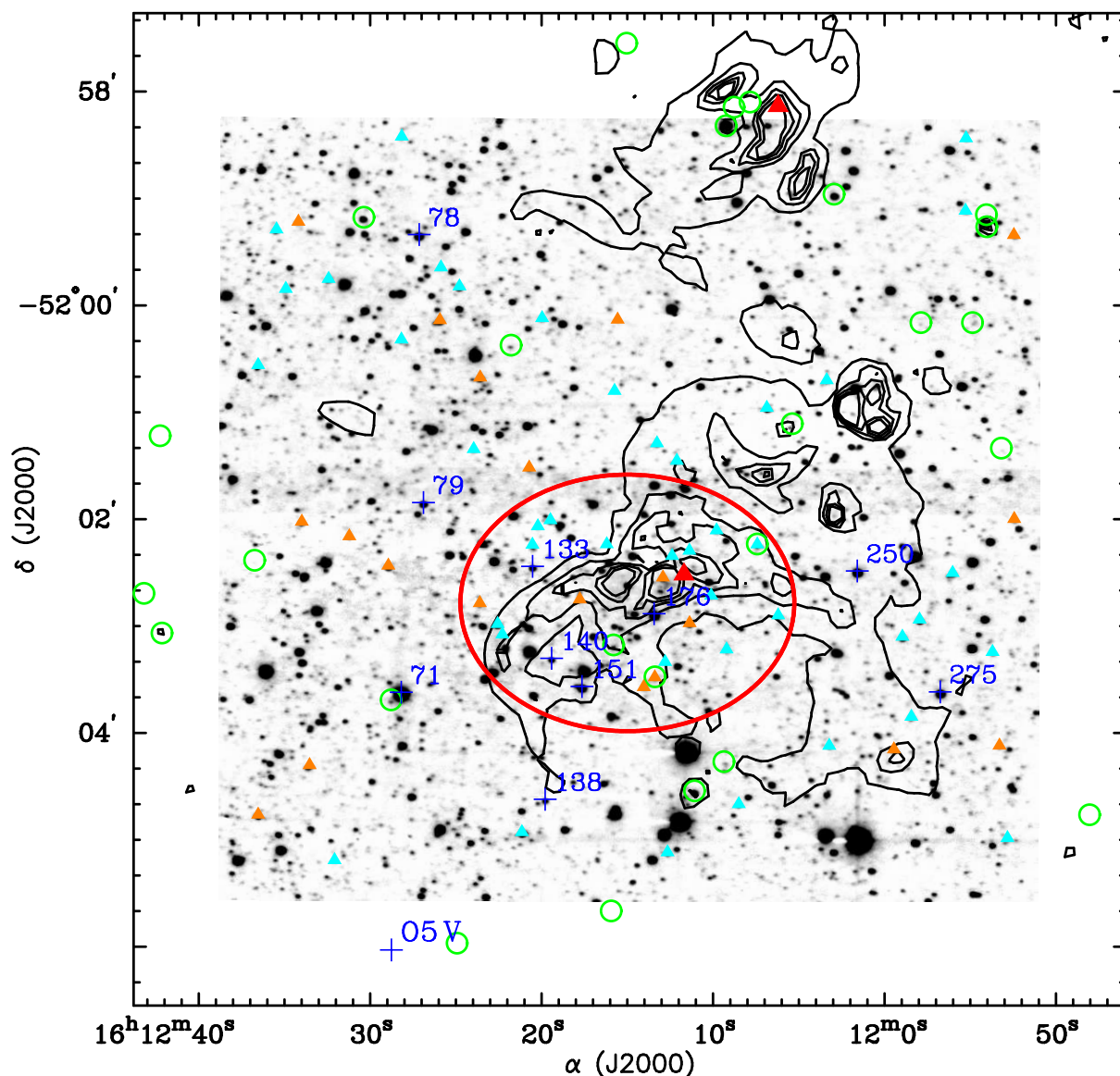


Figura 4.7: Imagem H do campo da região H II GAL 331.11-00.51 e sua vizinhança. Conforme as Tabelas 4.3 e 4.4, triângulos em laranja, ciano e vermelho indicam, respectivamente, estrelas T Tauri, Herbig Ae/Be e as duas fontes IRAS. Círculos verdes correspondem às fontes com excesso de cor no Mid-IR (Tab. 4.5). Contornos da emissão em $8.0 \mu\text{m}$ estão sobrepostos em preto. A elipse em vermelho demarca o aglomerado # 156 conforme DBS2003. As principais estrelas quentes da região estão também enumeradas. O rótulo O5 V refere-se à estrela 2MASS J16122876-5206018.

00.51 e aquelas fontes infravermelhas fotometricamente classificadas como YSOs, isto é, todas as fontes listadas nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Nota-se que, tanto os YSOs, quanto as fontes ionizantes se espalham por todo o campo ($\sim 8.9' \times 8.7'$), mas que predominam na região onde DBS2003 demarcaram a existência do aglomerado. Nesta mesma área, coincidem também um pico da emissão em $8 \mu\text{m}$ e o centro da fonte IRAS 16083-5154, o que indica um acúmulo de matéria naquela direção, típico de região de formação estelar. Essas regiões de alta densidade poderiam ser melhor demarcadas

por meio de observações infravermelho distante ou radiofrequências, como é explorado por Zavagno et al. (2007) no campo da região H II RCW 120.

Capítulo 5

Comentários finais e perspectivas

5.1 Principais resultados obtidos no óptico

Por meio de observações ópticas fotométricas e espectroscópicas de estrelas de nove regiões H II galácticas com $-65^\circ < \delta(\text{J2000}) < -35^\circ$, classificamos e calculamos a paralaxe espectroscópica de 24 estrelas tipo O ou B, revelando, em particular, duas novas estrelas tipo O (RCW 98-2, O9.5 V, e RCW 99-1, O7 III).

A fim de evitar o uso de um valor médio da razão entre a extinção total e a seletiva à banda V , o valor do avermelhamento A_V foi determinado diretamente pelo método das diferenças de cores, o que resultou em menores desvios entre os valores de distâncias estelares de um mesmo objeto e num valor médio $\langle R_V \rangle = 3.46$, que é 10% mais elevado que o valor médio encontrado para estrelas de campo. Estrelas localizadas mais ao centro da nuvem de gás ionizado apresentaram maiores valores de R_V .

As distâncias encontradas para três das regiões H II estudadas, Bran 186, NGC 2626 e RCW 32, com margens de erro entre 25% e 50%, foram baseadas em dados obtidos para somente uma estrela ionizante. Para os outros objetos, encontramos estimativas mais precisas, baseadas na mediana das paralaxes espectroscópicas de duas a seis diferentes estrelas por nebulosa, resultando em uma margem de erro média de $\approx 18\%$. As paralaxes espectroscópicas das estrelas pertencentes a uma mesma nebulosa apresentaram dispersões menores que 5%. Esta similaridade entre os valores é uma consequência das elevadas razões sinal-ruído dos espectros estelares, o que permitiu classificações bastante precisas, e do método usado na determinação do avermelhamento, que trabalha com a razão entre a extinção total e a seletiva à banda V como um parâmetro livre. O procedimento comumente adotado, em que se usa um valor fixo de R_V , elevaria consideravelmente a dispersão entre as distâncias estelares, indicando que tal metodologia deveria ser usada com bastante cuidado em regiões de formação estelar.

A distância de 1.19 ± 0.16 kpc obtida para RCW 87 diverge da distância fotométrica de 7.6 kpc estimada por Borissova et al. (2006), baseada no estudo de uma estrela K0.5 II

no infravermelho próximo, e dos dois possíveis valores de distância cinemática 2.7 kpc e 10.4 kpc encontrados via modelo de Brand & Blitz (1993). Em um estudo fotométrico em mais alta resolução e limites de magnitude observável que os dados do catálogo 2MASS, Moisés et al. (2011) adotaram a distância cinemática 2.5 kpc e indicaram 1 a 3 estrelas tipo O tardias junto a “bolha” de intensa emissão em $8 \mu\text{m}$ que circunda o aglomerado IR associado, mas ainda não há classificações espectroscópicas dessas estrelas, o que certamente forneceria um valor de distância com intervalo de confiança mais adequado e, com isso, maior precisão nas pré-classificações fotométricas.

5.2 Principais resultados obtidos no infravermelho

O estudo nas bandas do infravermelho próximo e médio ateve-se à região leste do complexo de regiões H II de forte emissão em radio-frequências GAL 331.5-00.1. Nessa região, ilustrada na Figura 4.1, separamos dois campos contendo os aglomerados [DBS2003] 156 e [DBS2003] 157 e fizemos um levantamento detalhado das possíveis estrelas ionizantes das regiões H II associadas e de fontes com características de objetos estelares jovens.

Um total de 47 YSOs foram classificados pelas fotometrias nos infravermelhos próximos e médio no campo de [DBS2003] 157 e outros 70 YSOs no campo de [DBS2003] 156. Estes 117 objetos com excesso de cor intrínseco se espalham por todo o campo observado, com pequeno predomínio sobre os picos de emissão em $8 \mu\text{m}$ e junto as três fontes IRAS lá detectadas. Esse resultado vem ao encontro das detecções de masers e linhas moleculares que já indicavam intensa e recente formação estelar nessas direções.

Além das detecções de YSOs povoando as duas áreas observadas, listamos 7 estrelas ionizantes espectroscopicamente classificadas (sendo 4 do tipo O) e outras 10 indicadas pela fotometria. Esta similaridade entre populações estelares e distâncias de estrelas ionizantes vem reforçar a hipótese de que as duas regiões não apenas estão em direções semelhantes, mas também fisicamente associadas, o que implica em distâncias e velocidades radiais semelhantes.

No início do Capítulo 4, listamos 11 medidas de velocidade radial com relação ao LSR publicadas por diferentes autores. Os valores encontrados foram muito semelhantes, com desvio padrão menor que 3% do valor médio, a saber $\langle v_{\text{LSR}} \rangle = -65.6 \pm 1.9 \text{ km s}^{-1}$, mostrando que toda região analisada parece se mover em conjunto. De fato, a paralaxe espectroscópica das estrelas ionizantes resultou em duas distâncias médias, dentro da margem de erro, rigorosamente iguais.

A Tabela 5.1 resume os resultados da paralaxe espectroscópica das 6 estrelas classificadas nos Capítulos 3 e 4. A distância heliocêntrica média das estrelas listadas é de $\langle d_{\text{helioc}} \rangle = 3.30 \pm 0.29 \text{ kpc}$. Este resultados está dentro da margem de erro de todos os pontos, o que ressalta a coerência entre as medidas. Da mesma forma, a extinção visual oscila $\sim 2.5 \text{ mag}$ em torno do valor médio $\langle A_V \rangle = 9.53 \text{ mag}$, o que é esperado em regiões de

Tabela 5.1: Estrelas ionizantes classificadas espectroscopicamente

Região H II	Estrela		Resultados		
	CamIV	2MASS	Spec.	A_V	d_{helioc} (kpc)
GAL 331.31-00.34	IRS 339	J16122002-5146262	O9 V	10.44	3.24 ± 0.56
GAL 331.31-00.34	IRS 298	J16122053-5146460	O6 V	12.10	3.35 ± 0.61
GAL 331.11-00.51	...	J16122876-5206018	O5 V	9.71	3.75 ± 0.63
GAL 331.11-00.51	IRS 71	J16122818-5203370	B0 Ia	6.99	3.24 ± 0.51
GAL 331.11-00.51	IRS 151	J16121764-5203337	B1 V	7.72	2.85 ± 0.46
GAL 331.11-00.51	IRS 176	J16121344-5202530	O8 V	10.21	3.38 ± 0.58

formação estelar, conforme discutimos no trabalho no óptico apresentado no Capítulo 2. Diante do exposto, é possível afirmar com segurança que as duas regiões estudadas são, na verdade, partes de um objeto de dimensões $\sim 11' \times 23'$ ou, até mesmo, mais extenso.

No campo de GAL 331.31-00.34, a emissão $8 \mu\text{m}$ traça uma estrutura peculiar em forma de concha, com diâmetro de ≈ 3.8 parsec, ao se adotar a distância de 3.30 kpc. Esta estrutura é identificada como [CPA2006] S62 na base de dados do SIMBAD, referente ao trabalho de Churchwell et al. (2006). Esses autores interpretam estes arcos como uma projeção no céu de bolhas tridimensionais, das quais 25% estariam associadas a regiões H II. Nestes casos, essas bolhas estariam se expandindo sob a ação de ventos estelares e da pressão de radiação provinda de estrelas massivas. De acordo com Deharveng et al. (2010), a maior parte dessas bolhas está de fato associada a alguma região H II e que ao menos um quarto desses objetos poderia estar desencadeando a formação de novas gerações de estrelas, o que parece estar ocorrendo no “bubble” perfeito associado à RCW 120.

Junto à GAL 331.31-00.34, a fonte IRAS 16085-5138 com cores de região H II ultracompacta e a detecção de masers de metanol e hidroxila indica formações de estrelas massivas na borda norte da concha, hipótese reforçada pela detecção das linhas de emissão moleculares de CS(2-1) e SiO, as quais requerem densidades mais elevadas que 10^4 cm^{-3} (Bronfman et al., 1996; Harju et al., 1998). Tais formações também podem estar ocorrendo em outras regiões da bolha, o que poderia ser verificado com observações adicionais de CS and NH_3 . Na região onde já se detectou estas emissões, encontramos as contrapartidas nos NIR e Mid-IR da fonte IRAS 16085-5138 e classificamos como um YSO classe I, cuja luminosidade da estrela central supera $7.7 \times 10^3 L_{\odot}$. Este valor indica a formação de uma estrela quente, com limite inferior de massa $M_{\star} \geq 10 M_{\odot}$. Dada a posição desta fonte sobre a concha de poeira quente e, considerando que foram identificadas estrelas com massa similar na ZAMS, é possível que uma formação estelar secundária de fato esteja acontecendo em regiões de alta densidade acumuladas nas bordas dessa concha. Um estudo em radiofrequências com alta resolução forneceria detalhes sobre a dinâmica do sistema e poderia detectar novos acúmulos (*clumps*) de poeira nos quais formações estelares em

seus primeiros estágios estariam em curso.

5.3 Perspectivas de trabalhos futuros

O estudo da regiões que abrigam os aglomerados [DBS2003] 156 e 157 e sua vizinhança terá seguimento nos próximos semestres. Um projeto que visa fazer um mapeamento da dinâmica do sistema através de observações em radiofrequências vêm sendo trabalhado. Nesse sentido, simulações hidrodinâmicas visando reproduzir a estrutura em forma de concha associada ao aglomerado [DBS2003] 157 tem preliminarmente mostrado que as fontes ionizantes já detectadas no interior dessa região são capazes de gerar tal estrutura quando situadas na borda de nuvens moleculares. Uma determinação de densidades da nuvem molecular que tangencia a bolha ainda é requerida a fim de melhorar os parâmetros iniciais da simulação. Um espectro no óptico da IRS 217, estrela mais brilhante do centro da *shell*, foi tomado em junho do corrente ano no OPD, revelando-a como uma estrela tipo M. Esta classificação ainda será refinada e sua paralaxe espectroscópica determinada. Caso se trate de uma estrela gigante tipo M, pode ser que este objeto não seja uma simples estrela de campo, próxima ao Sol, mas sim uma estrela já evoluída pertencente ao aglomerado estudado.

Além das observações já citadas, temos também dados espectroscópicos obtidos com o telescópio SOAR de duas estrelas de uma região de $\approx 1.3'$ localizada entre as regiões estudadas, cujas medidas de velocidades radiais e emissão em $8\ \mu\text{m}$ sugerem a associação às regiões aqui trabalhadas.

O trabalho no óptico também está tendo sequência a partir da seleção de uma segunda amostra de regiões H II cujas potenciais estrelas ionizantes têm magnitudes compatíveis com a instrumentação disponível no OPD. Dois turnos de observação já foram explorados nos anos de 2011 e 2012, mas o percentual de horas observadas foi baixo, devido às condições climáticas. Mesmo assim, outras 3 estrelas tipo O e 8 do tipo B já foram identificadas. Num próximo turno de espectroscopia, buscaremos reobservá-las a fim de garantir espectros com razões sinal-ruído adequadas. Os dados fotométricos nos filtros U , B e V , por sua vez, ainda estão em fase inicial de aquisição.

O aumento da amostra de regiões H II com distâncias bem determinadas e a consequente melhoria na precisão dessas medidas são fundamentais para determinação da estrutura espiral da Via-Láctea. Da mesma forma, parâmetros fundamentais como a distância do Sol ao centro da Galáxia e velocidade de rotação do padrão local de repouso ainda hoje são rediscutidos, sofrendo alterações bastante significativas nas últimas décadas (Brand & Blitz, 1993; Russeil, 2003) e mostrando que estes trabalhos ainda estão longe de serem completados.

Referências Bibliográficas

- ACKER, A., RAYTCHEV, B., STENHOLM, B., & TYLEND, R., 1991, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 90, 89
- ACKER, A., MARCOUT, J., OCHSENBEIN, F., STENHOLM, B., & TYLEND, R., 1992, **Garching: European Southern Observatory**, 1992
- ALLEN, L. E., et al., 2004, **The Astrophysical Journal, Supplement Series**, 154, 363
- AHARONIAN, F., et al., 2006, **The Astrophysical Journal**, 636, 777
- AMARAL, L. H., ABRAHAM, Z., 1991, **Astronomy and Astrophysics**, 251, 259
- AVEDISOVA, V. S., & KONDRATENKO, G. I., 1984, **Nauchnye Informatsii**, 56, 59
- BICA, E., DUTRA, C. M., & BARBUY, B., 2003, **Astronomy and Astrophysics**, 397, 177
- BIK, A., LENORZER, A., KAPER, L., COMERÓN, F., WATERS, L. B. F. M., DE KOTER, A., & HANSON, M. M., 2003, **Astronomy and Astrophysics**, 404, 249
- BIK, A., KAPER, L., HANSON, M. M., SMITS, M., 2005, **Astronomy and Astrophysics**, 440, 121
- BLUM, R. D., RAMOND, T. M., CONTI, P. S., FIGER, D. F., SELLGREN, K., 1997, **The Astronomical Journal**, 113, 1855
- BLUM, R. D., CONTI, P. S., DAMINELI, A., 2000, **The Astronomical Journal**, 119, 1860
- BORISSOVA J., IVANOV V. D., MINITTI D. & GEISLER D., 2006, **Astronomy and Astrophysics**, 455, 923
- BRAND, J., BLITZ, L., 1993, **Astronomy and Astrophysics**, 275, 67
- BRAND, J., & WOUTERLOOT, J. G. A. 1988, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 75, 117

- BRONFMAN, L., NYMAN, L.-A., & MAY, J., 1996, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 115, 81
- BUSCOMBE, W., 1969, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 144, 31
- CARPENTER, J. M., 2001, **The Astronomical Journal**, 121, 2851
- CASWELL, J. L., HAYNES, R. F., GOSS, W. M., 1980, **Australian Journal of Physics**, 33, 639
- CASWELL, J. L., HAYNES, R. F., 1987, **Astronomy and Astrophysics**, 171, 261
- CASWELL, J. L., 1998, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 297, 215
- CASWELL, J. L., YI, J., BOOTH, R. S., CRAGG, D. M., 2000, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 313, 599
- CHAN, S. J., HENNING, T., BEGEMANN, B. 1995, **Astrophysics and Space Science**, 224, 435
- CHAVARRÍA, L., MARDONES, D., GARAY, G., ESCALA, A., BRONFMAN, L., LIZANO, S., 2010, **The Astrophysical Journal**, 710, 583
- CHURCHWELL E., et al., 2006, **The Astrophysical Journal**, 649, 759
- CONTI, P. S., CROWTHER, P. A., 2004, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 355, 899
- COPETTI, M. V. F., 2000, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 147, 93
- COPETTI, M. V. F., OLIVEIRA, V. A., RIFFEL, R., CASTAÑEDA, H. O., SANMARTIN, D., 2007, **Astronomy and Astrophysics**, 472, 847
- CORBEN, P. M., CARTER, B. S., BANFIELD, R. M., & HARVEY, G. M. 1972, **Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa**, 31, 7
- CRAMPTON, D., 1971, **The Astronomical Journal**, 76, 260
- CRAMPTON, D., & FISHER, W. A., 1974, **Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria**, 14, 283
- CUTRI, R. M., et al., 2003, **2MASS All-Sky Point Source Catalog**.

- DAME, T. M., & THADDEUS, P., 2011, **The Astrophysical Journal, Letters to the Editor**, 734, L24
- DEHARVENG, L., NADEAU, D., ZAVAGNO, A., CAPLAN, J., 2000, **Astronomy and Astrophysics**, 360, 1107
- DEHARVENG, L., ZAVAGNO, A., & CAPLAN, J., 2005, **Astronomy and Astrophysics**, 433, 565
- DEHARVENG L., ZAVAGNO A., SCHULLER F., CAPLAN J., POMARÈS M., DE BREUCK C., 2009, **Astronomy and Astrophysics**, 496, 177
- DEHARVENG L., ET AL., 2010, **Astronomy and Astrophysics**, 523, A6
- DENOYELLE, J., 1977, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 27, 343
- DUTRA, C. M., BICA, E., SOARES, J., & BARBUY, B., 2003, **Astronomy and Astrophysics**, 400, 533
- ELLINGSEN, S. P., VON BIBRA, M. L., MCCULLOCH, P. M., NORRIS, R. P., DESHPANDE, A. A., PHILLIPS, C. J., 1996, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 280, 378
- FIGUERÊDO, E., BLUM, R. D., DAMINELI, A., CONTI, P. S., 2002, **The Astronomical Journal**, 124, 2739
- FREW, D. J., PARKER, Q. A., & RUSSEIL, D., 2006, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 372, 1081
- GAHM, G. F., & MALMORT, A. M., 1980, **Astronomy and Astrophysics**, 82, 295
- GALADÍ-ENRÍQUEZ, D., TRULLOLS, E., & JORDI C., 2000, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 146, 169
- GARDNER, F. F., & WHITEOAK, J. B., 1984, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 210, 23
- GILLESPIE, A. R., HUGGINS, P. J., SOLLNER, T. C. L. G., PHILLIPS, T. G., GARDNER, F. F., & KNOWLES, S. H., 1977, **Astronomy and Astrophysics**, 60, 221
- GEORGELIN, Y. P., & GEORGELIN, Y. M., 1970, **Astronomy and Astrophysics**, 6, 349
- GEORGELIN, Y. P., & GEORGELIN, Y. M., 1970, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 3, 1

- GEORGELIN, Y. M., GEORGELIN, Y. P., & ROUX, S., 1973, **Astronomy and Astrophysics**, 25, 337
- GEORGELIN, Y. M., BOULESTEIX J., GEORGELIN, Y. P. & MARCELIN, M., 1987, **Astronomy and Astrophysics**, 174, 257
- GUM, C. S., 1955, **Memoirs of the Royal Astronomical Society**, 67, 155
- HANSON, M. M., & CONTI, P. S., 1995, **The Astrophysical Journal, Letters to the Editor**, 448, L45
- HANSON, M. M., CONTI, P. S., RIEKE, M. J., 1996, **The Astrophysical Journal, Supplement Series**, 107, 281
- HANSON, M. M., HOWARTH, I. D., CONTI, P. S., 1997, **The Astronomical Journal**, 489, 698
- HANSON, M. M., KUDRITZKI, R. P., KENWORTHY, M. A., PULS, J., TOKUNAGA, A. T., 2005, **The Astrophysical Journal, Supplement Series**, 161, 154
- HARJU, J., LEHTINEN, K., BOOTH, R. S., ZINCHENKO, I., 1998, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 132, 211
- HE, L., WHITTET, D. C. B., KILKENNY, D. & SPENCER JONES, J. H., 1995, **The Astrophysical Journal, Supplement Series**, 101, 335
- HERBST, W., 1975, **The Astronomical Journal**, 80, 212
- HOUK, N., 1978, **Michigan Catalog of Two-dimensional Spectral Types for the HD stars** (Ann Arbor, MI: Dept. of Astronomy, University of Michigan), QB6.H77
- HUNTER, D. A., MASSEY, P., 1990, **The Astronomical Journal**, 99, 846
- IBEN, I., JR., 1965, **The Astrophysical Journal**, 142, 421
- JASCHEK, C., & JASCHEK, M., 1990, **The classification of stars** (Cambridge University Press, edition reprinted with corrections)
- JOHNSON, H. M., 1973, **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, 85, 586
- KHARCHENKO, N. V., PISKUNOV, A. E., ROESER, S., SCHILBACH, E., & Scholz R.-D., 2005, **Astronomy and Astrophysics** 438, 1163
- KOHOUTEK, L., 1971, **Astronomy and Astrophysics**, 13, 493
- KOHOUTEK, L., & PAULS, R., 1994, **Astronomische Nachrichten**, 315, 409

- KOORNNEEF, J., 1983, *Astronomy and Astrophysics*, 128, 84
- KUCHAR, T. A., CLARK, F. O., 1997, *The Astrophysical Journal*, 488, 224
- LADA, C. J., 1987, *Star Forming Regions*, 115, 1
- LADA, C. J., ADAMS, F. C., 1992, *The Astrophysical Journal*, 393, 278
- LANDOLT, A. U., 1992, *The Astronomical Journal*, 104, 340
- LAHULLA, J. F., 1987, *The Astronomical Journal*, 94, 1062
- MATHIS, J. S., 1990, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 28, 37
- MATHYS, G., 1988, *Astronomy and Astrophysics*, 76, 427
- MATHYS, G., 1989, *Astronomy and Astrophysics*, 81, 237
- MEGIER, A., KRELOWSKI J., PATRIARCHI, P. & AIELLO, S., 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 292, 853
- MEYER, M. R., CALVET, N., HILLENBRAND, L. A., 1997, *The Astronomical Journal*, 114, 288
- MOFFAT, A. F. J., & VOGT, N., 1975, *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series*, 20, 125
- MOFFAT, A. F. J., JACKSON, P. D., FITZGERALD, M. P., 1979, *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series*, 38, 197
- MOISÉS, A. P., DAMINELI, A., FIGUERÊDO, E., BLUM, R. D., CONTI, P. S., & BARBOSA, C. L., 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411, 705
- MUELLER, K. E., & GRAHAM, J. A., 2000, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112, 1426
- NECKEL, T., 1978, *Astronomy and Astrophysics*, 69, 51
- PALADINI, R., BURIGANA, C., DAVIES, R. D., MAINO, D., BERSANELLI, M., CAPPELLINI, B., PLATANIA, P., & SMOOT, G., 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 397, 213
- PAPAJ, J., WEGNER, W., & KRELOWSKI, J., 1991, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 252, 403
- PARKER, Q. A., ET AL., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 362, 689

- PATRIARCHI, P., MORBIDELLI L., PERIMOTTO M., & BARBARO G., 2001, **Astronomy and Astrophysics**, 372, 644
- PINHEIRO, M. C. **Classificação espectral e determinação de distância de estrelas em dez regiões H II do Hemisfério Sul**. 2009. 22–26 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- PINHEIRO, M. C., COPETTI, M. V. F., & OLIVEIRA, V. A., 2010, **Astronomy and Astrophysics**, 521, A26
- PINHEIRO, M. C., ABRAHAM, Z., COPETTI, M. V. F., et al., 2012, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 423, 2425
- RAYNER, J. T., CUSHING, M. C., VACCA, W. D., 2009, **The Astrophysical Journal, Supplement Series**, 185, 289
- RIEKE G. H., & LEBOSKY M. J., 1985, **The Astrophysical Journal**, 288, 618
- RODGERS, A. W., CAMPBELL, C. T., WHITEOAK, J. B., 1960, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 121, 103
- ROMAN-LOPES, A., ABRAHAM, Z., LÉPINE, J. R. D., 2003, **The Astronomical Journal**, 126, 1896
- ROMAN-LOPES, A., ABRAHAM, Z., 2004, **The Astronomical Journal**, 127, 2817
- ROMAN-LOPES, A., ABRAHAM, Z., 2006, **The Astronomical Journal**, 131, 951
- ROMAN-LOPES, A., ABRAHAM, Z., 2006, **The Astronomical Journal**, 131, 2223
- RUBIN, R. H., 1968, **The Astrophysical Journal**, 154, 391
- RUSSEIL, D., 2003, **Astronomy and Astrophysics**, 397, 133
- RUSSEIL, D., ADAMI, C., AMRAM, P., LE COARER, E., GEORGELIN, Y. M., MARCELIN, M., PARKER, Q., 2005, **Astronomy and Astrophysics**, 429, 497
- RUSSEIL, D., ADAMI, C., GEORGELIN, Y. M., 2007, **Astronomy and Astrophysics**, 470, 161
- SALPETER, E. E., 1955, **The Astrophysical Journal**, 121, 161
- SIMPSON, J. P., RUBIN, R. H., 1990, **The Astrophysical Journal**, 354, 165
- SKINNER, S. L., SOKAL, K. R., MEGEATH, S. T., GÜDEL, M., AUDARD, M., FLAHERTY, K. M., MEYER, M. R., DAMINELLI, A., 2009, **The Astrophysical Journal**, 701, 710

- STEAD, J. J., HOARE, M. G., 2009, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 400, 731
- STOCK, J., 1984, **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica**, 9, 127
- STUPAR, M., PARKER, Q. A., & FILIPOVIĆ, M. D., 2008, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 390, 1037
- SCHAERER, D., & DE KOTER, A., 1997, **Astronomy and Astrophysics**, 322, 598
- SCHUTTE, A. J., VAN DER WALT, D. J., GAYLARD, M. J., & MacLeod, G. C., 1993, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 261, 783
- URQUHART, J. S., MORGAN, L. K., & THOMPSON, M. A., 2009, **Astronomy and Astrophysics**, 497, 789
- VACCA, W. D., GARMANY, C. D., SHULL, J. M., 1996, **The Astrophysical Journal**, 460, 914
- VILAS-BOAS, J. W. S., & ABRAHAM, Z., 2000, **Astronomy and Astrophysics**, 355, 1115
- VOGT, N., & MOFFAT, A. F. J., 1975, **Astronomy and Astrophysics**, 45, 405
- WALSH, A. J., HYLAND, A. R., ROBINSON, G., BURTON, M. G., 1997, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 291, 261
- WALSH, A. J., BURTON, M. G., HYLAND, A. R., & ROBINSON, G., 1998, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 301, 640
- WALBORN N. R., & FITZPATRICK, E. L., 1990, **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, 102, 379
- WALBORN N. R., 1982, **The Astronomical Journal**, 87, 1300
- WEGNER W., 1994, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 270, 229
- WEGNER, W., 2007, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 374, 1549
- WHITEOAK, J. B., & GARDNER, F. F., 1974, **Astronomy and Astrophysics**, 37, 389
- WILSON, T. L., MEZGER, P. G., GARDNER, F. F., MILNE, D. K., 1970, **Astronomy and Astrophysics**, 6, 364

- WOOD, D. O. S., CHURCHWELL, E., 1989, **The Astrophysical Journal**, 340, 265
- WOUTERLOOT, J. G. A., & BRAND, J., 1989, **Astronomy and Astrophysics, Supplement Series**, 80, 149
- XU, Y., ZHENG, X. W., & JIANG, D. R., 2003, *Chinese Journal of Astronomy & Astrophysics*, 3, 49
- YAMAGUCHI, R., SAITO, H., MIZUNO, N., MINE, Y., MIZUNO, A., OGAWA, H., & FUKUI, Y., 1999, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 51, 791
- ZAVAGNO, A., POMARÈS, M., DEHARVENG, L., ET AL., 2007, **Astronomy and Astrophysics**, 472, 835

Apêndice A

Resultado da fotometria IR do aglomerado [DBS2003] 157

Tabela A.1: Resultado da fotometria do aglomerado [DBS2003] 157.

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
3	16:12:33.028	-51:49:23.11	16.166±0.070	13.485±0.018	12.246±0.066
41	16:12:26.166	-51:49:27.27	13.479±0.028	11.951±0.016	11.199±0.037
42	16:12:33.848	-51:49:26.83	13.792±0.031	13.405±0.014	13.046±0.112
79	16:12:14.127	-51:49:03.79	11.658±0.029	9.809 ±0.015	9.021 ±0.015
87	16:12:37.336	-51:48:57.01	13.042±0.025	11.841±0.012	11.447±0.039
94	16:12:24.999	-51:48:45.83	14.965±0.031	14.212±0.014	13.090±0.231
98	16:12:39.840	-51:48:41.18	9.475 ±0.032	8.185 ±0.013	7.682 ±0.014
102	16:12:23.151	-51:48:40.40	9.738 ±0.028	9.044 ±0.008	8.824 ±0.015
108	16:12:34.752	-51:48:33.93	15.580±0.039	13.894±0.017	12.969±0.085
113	16:12:31.255	-51:48:30.62	12.930±0.028	11.270±0.009	10.601±0.018
114	16:12:35.383	-51:48:30.43	15.455±0.038	13.179±0.018	11.801±0.046
117	16:12:28.621	-51:48:29.84	12.435±0.029	11.468±0.014	11.163±0.022
133	16:12:13.855	-51:48:20.25	14.057±0.028	13.593±0.022	13.071±0.112
135	16:12:38.748	-51:48:16.20	10.923±0.029	10.217±0.013	9.954 ±0.014
138	16:12:20.382	-51:48:15.79	14.586±0.025	14.140±0.024	13.745±0.196
150	16:12:33.097	-51:48:07.67	15.624±0.063	12.155±0.015	9.842 ±0.013
164	16:12:13.044	-51:47:59.20	13.887±0.029	12.279±0.016	11.643±0.028
168	16:12:30.291	-51:47:57.57	11.302±0.026	10.720±0.015	10.448±0.013
169	16:12:31.902	-51:47:57.47	10.657±0.028	9.965 ±0.013	9.775 ±0.016
172	16:12:09.642	-51:47:54.88	15.896±0.060	14.828±0.042	13.973±0.360
176	16:12:24.451	-51:47:49.26	14.321±0.026	12.807±0.015	12.347±0.081
178	16:12:34.366	-51:47:48.61	13.576±0.029	13.295±0.010	12.752±0.131
184	16:12:18.908	-51:47:43.46	14.291±0.026	13.787±0.014	13.393±0.197
196	16:12:40.637	-51:47:37.13	11.914±0.032	10.663±0.012	10.148±0.015
197	16:12:13.960	-51:47:38.10	13.890±0.030	13.448±0.024	12.800±0.116
206	16:12:36.513	-51:47:32.56	12.382±0.027	11.490±0.016	11.162±0.021
217	16:12:19.360	-51:47:28.72	9.105 ±0.025	8.155 ±0.011	7.927 ±0.014
224	16:12:15.607	-51:47:25.57	15.415±0.037	14.917±0.029	13.909±0.273
230	16:12:29.728	-51:47:19.69	14.678±0.036	11.831±0.016	10.561±0.018
234	16:12:12.487	-51:47:18.36	11.570±0.023	10.803±0.006	10.559±0.023
241	16:12:36.660	-51:47:15.40	15.811±0.061	13.884±0.022	12.786±0.115
246	16:12:13.859	-51:47:14.03	15.552±0.033	14.650±0.016	13.643±0.275
255	16:12:11.494	-51:47:09.36	15.466±0.080	14.015±0.028	13.145±0.090
256	16:12:29.659	-51:47:08.77	15.042±0.057	14.215±0.043	12.710±0.094
258	16:12:37.134	-51:47:07.52	11.005±0.029	10.247±0.009	9.977 ±0.019
262	16:12:32.924	-51:47:05.09	12.240±0.026	11.318±0.010	10.978±0.021
264	16:12:28.519	-51:47:04.38	11.391±0.026	11.089±0.012	11.095±0.025
268	16:12:30.324	-51:47:01.98	11.528±0.024	10.457±0.014	10.035±0.016
277	16:12:26.742	-51:46:57.38	11.536±0.026	11.224±0.016	11.200±0.031
278	16:12:34.600	-51:46:56.74	10.497±0.027	9.805 ±0.013	9.514 ±0.017
283	16:12:30.538	-51:46:52.68	16.162±0.085	15.411±0.050	14.346±0.311
285	16:12:27.736	-51:46:50.82	15.592±0.056	13.071±0.010	12.046±0.043
286	16:12:19.625	-51:46:51.10	15.052±0.025	12.684±0.015	11.686±0.041
287	16:12:29.116	-51:46:50.29	11.203±0.025	10.169±0.009	9.736 ±0.012
289	16:12:15.621	-51:46:50.44	14.330±0.021	11.136±0.012	9.643 ±0.013
295	16:12:32.209	-51:46:46.38	15.284±0.037	11.904±0.011	10.302±0.013

Tabela A.1: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
298	16:12:20.539	-51:46:46.07	11.674±0.024	10.288±0.008	9.593 ±0.018
319	16:12:27.952	-51:46:35.74	10.950±0.024	9.707 ±0.012	9.216 ±0.013
323	16:12:40.287	-51:46:34.17	14.192±0.026	12.371±0.017	11.540±0.034
324	16:12:09.102	-51:46:35.02	11.319±0.024	10.520±0.009	10.206±0.013
330	16:12:26.925	-51:46:31.44	14.564±0.025	13.945±0.017	13.499±0.192
337	16:12:19.501	-51:46:27.59	14.966±0.078	14.479±0.083	13.684±0.216
339	16:12:20.031	-51:46:26.20	11.784±0.024	10.596±0.007	10.001±0.016
344	16:12:21.212	-51:46:25.36	15.906±0.059	15.476±0.065	14.138±0.355
355	16:12:33.242	-51:46:17.41	11.728±0.022	10.691±0.015	10.184±0.015
362	16:12:20.653	-51:46:13.75	14.693±0.033	14.312±0.023	13.494±0.192
363	16:12:32.580	-51:46:13.00	12.597±0.026	11.052±0.014	10.408±0.018
369	16:12:36.212	-51:46:08.58	11.911±0.029	10.730±0.013	10.264±0.018
374	16:12:37.823	-51:46:03.37	14.042±0.026	12.130±0.012	11.320±0.031
375	16:12:35.031	-51:46:02.14	11.553±0.022	10.814±0.014	10.576±0.016
376	16:12:12.069	-51:46:02.71	14.307±0.026	14.016±0.018	13.579±0.240
383	16:12:18.702	-51:45:59.64	15.204±0.042	14.690±0.032	14.178±0.361
390	16:12:38.478	-51:45:53.96	13.809±0.027	12.774±0.017	12.078±0.047
391	16:12:27.182	-51:45:53.34	13.145±0.023	11.842±0.014	11.218±0.027
402	16:12:39.647	-51:45:47.38	15.766±0.057	15.167±0.039	14.322±0.353
410	16:12:35.158	-51:45:44.50	15.733±0.046	12.333±0.009	10.799±0.022
415	16:12:32.059	-51:45:39.79	11.884±0.025	11.189±0.014	10.925±0.020
416	16:12:23.793	-51:45:40.10	11.733±0.023	11.057±0.012	10.795±0.023
425	16:12:10.706	-51:48:53.63	13.672±0.026	12.021±0.013	11.346±0.031
440	16:12:07.291	-51:47:22.36	12.806±0.019	11.696±0.008	11.330±0.017
444	16:12:20.717	-51:47:07.66	11.615±0.035	10.535±0.052	10.144±0.050
445	16:12:24.838	-51:46:50.62	14.336±0.032	13.563±0.053	12.820±0.143
446	16:12:08.634	-51:46:48.29	15.899±0.085	13.180±0.019	11.566±0.033
452	16:12:23.287	-51:46:18.82	14.254±0.045	11.793±0.016	10.657±0.017
454	16:12:27.046	-51:46:16.80	14.315±0.033	13.110±0.019	12.295±0.066
478	16:12:29.948	-51:48:15.55	15.810±0.100	13.961±0.075	12.172±0.056
481	16:12:27.537	-51:48:04.28	15.985±0.101	14.350±0.055	13.074±0.134
483	16:12:11.536	-51:47:56.37	13.732±0.024	13.260±0.014	12.797±0.098
484	16:12:26.066	-51:47:54.60	15.870±0.068	15.093±0.097	13.571±0.221
487	16:12:26.122	-51:47:50.07	15.091±0.033	13.783±0.022	12.938±0.117
488	16:12:07.740	-51:47:48.32	14.966±0.058	14.385±0.053	13.608±0.199
493	16:12:28.866	-51:47:21.05	16.241±0.162	14.295±0.154	13.235±0.137
494	16:12:12.964	-51:47:13.43	12.650±0.023	11.589±0.011	11.183±0.021
497	16:12:29.250	-51:47:00.40	13.407±0.047	11.917±0.043	11.351±0.052
510	16:12:21.101	-51:46:39.48	16.272±0.160	14.472±0.032	13.269±0.110
511	16:12:07.325	-51:46:38.31	15.433±0.053	14.657±0.054	13.508±0.143
515	16:12:19.293	-51:46:07.20	12.907±0.028	11.880±0.022	11.509±0.035
524	16:12:38.811	-51:48:20.72	13.964±0.139	13.450±0.127	12.917±0.109
530	16:12:27.472	-51:46:54.64	15.507±0.163	13.005±0.045	12.004±0.061
531	16:12:07.529	-51:46:33.57	14.011±0.018	13.496±0.019	13.037±0.135
533	16:12:22.212	-51:46:10.27	15.790±0.058	15.166±0.026	14.192±0.242

Apêndice B

Resultado da fotometria IR do aglomerado [DBS2003] 156

Tabela B.1: Resultado da fotometria do aglomerado [DBS2003] 156.

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
1	16:12:36.537	-52:00:33.44	13.704±0.052	13.100±0.032	12.244±0.069
2	16:12:36.543	-52:04:45.78	13.745±0.025	12.177±0.011	11.015±0.034
3	16:12:36.309	-51:58:42.83	14.001±0.011	10.846±0.009	9.273±0.022
4	16:12:36.042	-52:00:10.38	12.218±0.006	10.825±0.005	10.287±0.020
5	16:12:36.080	-52:03:24.40	9.805±0.003	8.471±0.003	7.902±0.005
6	16:12:35.688	-51:58:32.33	16.139±0.046	13.935±0.013	13.238±0.244
7	16:12:35.776	-52:04:23.60	13.953±0.013	12.794±0.007	12.239±0.087
8	16:12:35.471	-51:59:17.26	13.243±0.007	12.914±0.008	12.583±0.125
9	16:12:35.587	-52:03:06.17	13.991±0.011	13.466±0.014	13.350±0.215
10	16:12:35.354	-52:04:56.12	14.515±0.014	12.332±0.009	11.501±0.043
11	16:12:35.307	-52:04:10.82	12.330±0.015	11.205±0.008	10.755±0.028
12	16:12:35.224	-52:05:04.66	12.129±0.006	9.942±0.005	8.964±0.013
13	16:12:34.922	-51:59:50.68	14.675±0.018	14.123±0.019	13.354±0.198
14	16:12:34.521	-52:00:38.70	12.186±0.004	11.632±0.006	11.437±0.036
15	16:12:34.287	-51:58:33.94	15.368±0.036	13.352±0.011	12.401±0.095
16	16:12:34.342	-52:02:29.36	13.296±0.008	12.058±0.007	11.541±0.032
17	16:12:34.187	-51:59:12.99	15.621±0.064	14.208±0.029	12.981±0.163
18	16:12:34.229	-52:04:56.24	15.795±0.050	13.144±0.013	12.218±0.073
19	16:12:34.133	-52:03:13.44	11.964±0.004	10.624±0.005	10.059±0.015
20	16:12:33.995	-52:02:01.33	14.993±0.025	12.835±0.012	11.239±0.026
21	16:12:33.967	-52:03:19.52	12.286±0.005	11.369±0.007	10.916±0.024
22	16:12:33.827	-52:02:31.06	12.134±0.061	11.318±0.042	10.675±0.039
23	16:12:33.457	-51:59:17.81	15.980±0.069	13.895±0.047	13.104±0.130
24	16:12:33.393	-51:59:09.07	16.017±0.040	13.823±0.012	13.872±0.306
25	16:12:33.532	-52:04:17.96	14.348±0.028	12.850±0.043	11.628±0.054
26	16:12:33.484	-52:03:56.04	14.042±0.048	13.011±0.050	12.462±0.083
27	16:12:33.462	-52:04:52.68	14.086±0.024	12.810±0.018	12.115±0.082
28	16:12:33.171	-51:59:01.76	14.899±0.023	12.269±0.007	10.947±0.043
29	16:12:33.109	-52:02:50.37	11.094±0.003	9.737±0.005	9.179±0.007
30	16:12:32.980	-52:02:57.83	13.577±0.006	12.374±0.007	11.771±0.038
31	16:12:32.884	-52:01:02.09	16.018±0.027	13.228±0.010	11.875±0.052
32	16:12:32.813	-52:01:31.16	13.274±0.006	12.175±0.007	11.643±0.040
33	16:12:32.714	-51:58:33.36	12.442±0.007	12.175±0.012	11.998±0.072
34	16:12:32.636	-52:03:01.58	13.805±0.008	12.657±0.010	12.247±0.056
35	16:12:32.576	-52:02:23.40	12.473±0.006	9.953±0.006	8.735±0.006
36	16:12:32.425	-51:59:45.07	13.661±0.014	13.228±0.017	12.817±0.109
37	16:12:32.366	-52:01:06.51	13.104±0.005	12.481±0.007	12.473±0.057
38	16:12:32.211	-51:58:44.68	13.755±0.009	13.259±0.009	13.111±0.154
39	16:12:32.297	-52:04:59.46	15.565±0.054	13.449±0.015	12.820±0.112
40	16:12:32.085	-52:05:11.37	15.730±0.029	15.032±0.030	13.873±0.362
41	16:12:31.884	-52:03:33.21	15.338±0.025	12.506±0.007	11.125±0.027
42	16:12:31.766	-52:02:44.48	15.809±0.038	13.652±0.024	12.435±0.059
43	16:12:31.473	-51:59:47.20	10.837±0.004	9.388±0.005	8.777±0.008
44	16:12:31.158	-51:59:17.73	12.486±0.005	11.100±0.007	10.509±0.023
45	16:12:31.226	-52:02:09.58	16.308±0.081	13.980±0.023	12.525±0.077
46	16:12:31.064	-52:01:11.08	13.357±0.007	12.862±0.007	12.981±0.144
47	16:12:30.927	-51:59:01.36	12.649±0.006	12.340±0.006	12.294±0.072

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
48	16:12:30.917	-51:58:45.09	12.214±0.011	10.046±0.005	9.021±0.019
49	16:12:30.894	-52:00:17.45	14.821±0.014	12.181±0.008	10.892±0.028
50	16:12:30.846	-52:04:53.25	14.254±0.014	13.416±0.010	12.921±0.116
51	16:12:30.735	-52:01:26.21	14.783±0.019	13.304±0.009	12.600±0.082
52	16:12:30.384	-51:59:10.58	13.822±0.008	11.894±0.007	10.980±0.031
53	16:12:30.295	-51:59:18.99	12.619±0.007	12.248±0.005	12.030±0.067
54	16:12:30.284	-52:00:02.08	14.357±0.017	11.249±0.005	9.681±0.010
55	16:12:30.145	-51:58:25.85	16.957±0.081	14.393±0.019	13.420±0.220
56	16:12:30.013	-52:02:28.73	17.141±0.130	13.811±0.016	12.343±0.060
57	16:12:29.915	-52:01:48.78	13.140±0.007	12.010±0.006	11.503±0.036
58	16:12:29.903	-52:04:26.28	13.903±0.009	12.627±0.007	12.031±0.064
59	16:12:29.721	-52:02:12.54	16.790±0.071	13.925±0.019	12.532±0.063
60	16:12:29.240	-52:04:06.66	16.970±0.071	14.114±0.014	12.785±0.079
61	16:12:28.926	-52:00:22.54	13.610±0.024	12.935±0.013	12.519±0.070
62	16:12:28.851	-51:58:44.29	15.534±0.026	13.139±0.008	12.335±0.091
63	16:12:28.947	-52:02:26.02	14.032±0.032	12.277±0.025	11.165±0.026
64	16:12:28.797	-52:02:59.84	16.335±0.050	13.282±0.011	11.880±0.044
65	16:12:28.633	-51:59:52.61	11.933±0.004	11.525±0.006	11.289±0.033
66	16:12:28.496	-52:04:13.94	15.812±0.042	13.110±0.010	11.785±0.038
67	16:12:28.159	-51:58:25.23	14.715±0.017	14.230±0.017	13.889±0.321
68	16:12:28.184	-51:59:52.39	11.818±0.004	10.894±0.006	10.536±0.017
69	16:12:28.177	-52:00:19.03	14.070±0.009	13.690±0.015	13.364±0.169
70	16:12:28.273	-52:03:50.95	14.280±0.015	13.013±0.013	12.300±0.060
71	16:12:28.190	-52:03:37.19	8.869±0.003	8.066±0.004	7.598±0.004
72	16:12:28.131	-52:04:06.10	11.933±0.004	10.908±0.006	10.447±0.016
73	16:12:27.893	-52:01:20.88	14.856±0.024	11.948±0.006	10.502±0.018
74	16:12:27.694	-51:59:32.66	14.244±0.032	11.841±0.008	10.639±0.016
75	16:12:27.459	-52:00:11.40	13.277±0.005	12.224±0.009	12.002±0.042
76	16:12:27.584	-52:04:34.83	12.237±0.004	11.453±0.006	11.125±0.029
77	16:12:27.283	-52:00:33.53	13.561±0.006	12.494±0.011	11.881±0.042
78	16:12:27.137	-51:59:20.26	11.298±0.004	10.696±0.005	10.415±0.015
79	16:12:26.889	-52:01:50.64	14.495±0.023	11.935±0.006	10.606±0.020
80	16:12:26.403	-51:59:53.65	15.744±0.030	12.604±0.008	11.081±0.019
81	16:12:26.378	-52:01:08.88	11.430±0.003	10.176±0.006	9.644±0.011
82	16:12:26.061	-52:00:24.52	16.041±0.032	12.844±0.008	11.268±0.026
83	16:12:26.046	-52:03:46.70	13.997±0.008	12.251±0.009	11.285±0.029
84	16:12:25.933	-52:00:08.21	13.823±0.042	12.175±0.013	10.834±0.017
85	16:12:25.878	-51:59:38.59	15.271±0.022	14.857±0.029	13.907±0.240
86	16:12:25.959	-52:04:53.60	10.871±0.006	10.021±0.020	9.379±0.049
87	16:12:25.626	-52:00:24.62	16.103±0.043	12.995±0.007	11.440±0.033
88	16:12:25.578	-51:59:25.92	15.078±0.019	12.115±0.005	10.714±0.019
89	16:12:25.407	-51:58:40.15	13.676±0.010	12.378±0.008	11.847±0.051
90	16:12:25.364	-52:02:19.17	11.905±0.004	11.093±0.006	10.650±0.016
91	16:12:25.324	-52:02:05.95	13.058±0.006	12.074±0.010	11.607±0.041
92	16:12:25.385	-52:05:03.73	16.382±0.041	13.562±0.009	12.371±0.082
93	16:12:25.194	-51:58:50.83	14.098±0.008	12.205±0.007	11.277±0.033
94	16:12:25.211	-51:59:39.94	15.230±0.027	12.222±0.006	10.850±0.021

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
95	16:12:24.798	-51:59:49.31	12.924±0.004	12.433±0.006	12.084±0.056
96	16:12:24.800	-52:00:01.11	15.547±0.031	11.936±0.006	10.135±0.011
97	16:12:24.677	-51:58:47.61	12.757±0.005	12.401±0.008	12.323±0.071
98	16:12:24.614	-51:58:40.74	14.040±0.013	12.712±0.008	12.316±0.081
99	16:12:24.591	-52:02:20.17	13.491±0.010	12.431±0.011	11.789±0.062
100	16:12:24.408	-51:59:17.73	11.642±0.004	10.957±0.007	10.674±0.019
101	16:12:24.544	-52:04:07.96	14.773±0.029	14.091±0.019	13.786±0.178
102	16:12:23.958	-52:01:20.60	14.603±0.013	14.154±0.015	13.771±0.270
103	16:12:23.910	-52:01:07.45	12.322±0.004	11.913±0.006	11.642±0.039
104	16:12:23.868	-52:00:27.16	9.831±0.003	9.147±0.003	8.891±0.008
105	16:12:23.700	-52:04:04.46	14.236±0.012	13.043±0.013	12.611±0.071
106	16:12:23.586	-52:00:40.44	13.648±0.051	12.714±0.033	12.015±0.059
107	16:12:23.602	-52:02:47.04	16.011±0.081	13.662±0.021	12.301±0.055
108	16:12:23.487	-52:02:12.57	13.921±0.027	11.113±0.007	9.733±0.010
109	16:12:23.443	-52:01:09.88	13.375±0.006	12.285±0.007	11.828±0.042
110	16:12:23.359	-51:58:31.66	12.030±0.005	11.776±0.008	11.551±0.049
111	16:12:23.450	-52:02:59.05	13.248±0.028	12.149±0.013	11.512±0.045
112	16:12:23.289	-51:58:25.76	13.709±0.008	12.609±0.009	12.373±0.071
113	16:12:23.324	-52:03:28.78	11.630±0.004	10.888±0.006	10.543±0.014
114	16:12:23.324	-52:04:53.89	14.599±0.013	12.310±0.007	11.221±0.028
115	16:12:23.117	-51:59:51.62	14.326±0.010	13.112±0.009	12.618±0.086
116	16:12:22.836	-52:03:25.24	10.999±0.003	10.339±0.006	10.049±0.011
117	16:12:22.763	-52:02:22.66	11.809±0.005	10.585±0.007	10.028±0.013
118	16:12:22.564	-52:02:58.76	13.008±0.008	12.411±0.011	11.955±0.057
119	16:12:22.463	-52:01:11.60	12.900±0.006	11.904±0.007	11.370±0.036
120	16:12:22.274	-51:58:29.40	12.052±0.005	11.228±0.008	11.114±0.039
121	16:12:22.399	-52:03:50.91	13.483±0.007	12.302±0.009	11.778±0.031
122	16:12:22.281	-52:03:04.65	14.247±0.046	13.908±0.038	13.030±0.100
123	16:12:22.106	-52:03:11.13	13.484±0.036	12.315±0.027	11.636±0.054
124	16:12:21.664	-52:01:57.04	11.794±0.004	10.763±0.009	10.330±0.017
125	16:12:21.667	-52:02:27.31	13.082±0.006	12.355±0.009	11.910±0.062
126	16:12:21.177	-52:04:42.96	13.504±0.007	12.301±0.008	11.779±0.037
127	16:12:21.150	-52:04:55.61	12.298±0.003	11.805±0.011	11.387±0.046
128	16:12:20.836	-52:01:06.73	11.465±0.007	10.857±0.009	10.684±0.021
129	16:12:20.783	-52:00:12.09	13.086±0.006	12.786±0.008	12.522±0.098
130	16:12:20.725	-52:01:30.95	14.937±0.026	13.677±0.041	12.689±0.088
131	16:12:20.713	-52:03:13.59	10.182±0.003	9.228±0.007	8.822±0.007
132	16:12:20.536	-52:02:14.26	13.568±0.011	13.101±0.014	12.367±0.107
133	16:12:20.526	-52:02:26.52	15.129±0.020	12.281±0.009	10.799±0.025
134	16:12:20.484	-52:03:37.99	12.281±0.005	11.480±0.008	11.107±0.032
135	16:12:20.223	-52:02:03.92	14.979±0.023	14.405±0.023	13.704±0.165
136	16:12:20.051	-51:59:30.30	12.692±0.006	11.720±0.008	11.238±0.030
137	16:12:19.976	-52:00:07.06	14.380±0.012	13.732±0.017	13.177±0.166
138	16:12:19.789	-52:04:37.21	16.370±0.054	12.769±0.006	10.912±0.022
139	16:12:19.480	-52:02:00.47	13.423±0.009	12.929±0.015	12.257±0.064
140	16:12:19.415	-52:03:18.07	15.441±0.025	12.661±0.011	11.186±0.034
141	16:12:18.955	-51:59:12.59	13.546±0.007	12.794±0.007	12.456±0.059

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
146	16:12:18.162	-52:00:34.46	13.944±0.007	13.367±0.010	13.283±0.175
147	16:12:18.117	-52:00:45.16	12.293±0.004	12.044±0.008	11.965±0.056
148	16:12:17.810	-52:00:11.33	13.768±0.010	12.711±0.007	12.110±0.062
149	16:12:17.772	-52:02:44.93	14.946±0.023	13.933±0.022	13.156±0.165
150	16:12:17.660	-51:59:04.03	14.145±0.017	12.957±0.010	12.414±0.060
151	16:12:17.646	-52:03:33.88	11.926±0.006	11.057±0.007	10.626±0.020
152	16:12:17.531	-52:03:24.61	10.255±0.003	9.320±0.008	8.892±0.009
153	16:12:17.352	-52:02:17.26	13.567±0.010	13.104±0.020	12.847±0.139
154	16:12:16.995	-52:01:50.63	11.600±0.005	10.811±0.007	10.570±0.019
155	16:12:16.980	-52:03:04.92	13.124±0.006	11.899±0.007	11.225±0.028
156	16:12:16.804	-51:58:47.41	11.653±0.005	11.420±0.007	11.578±0.044
157	16:12:16.548	-52:03:21.30	15.032±0.018	12.981±0.010	12.208±0.062
158	16:12:16.500	-52:02:28.04	13.726±0.008	12.691±0.009	12.192±0.077
159	16:12:16.373	-52:04:27.48	13.236±0.016	12.233±0.009	11.752±0.038
160	16:12:16.202	-52:02:14.00	15.864±0.040	15.657±0.075	13.361±0.214
161	16:12:16.097	-51:58:42.65	12.510±0.006	11.595±0.006	11.212±0.027
162	16:12:16.074	-52:02:23.61	12.375±0.004	11.580±0.007	11.230±0.041
163	16:12:15.953	-52:03:49.49	12.037±0.011	11.342±0.007	10.910±0.025
164	16:12:15.740	-52:00:47.93	16.684±0.072	15.821±0.049	13.795±0.254
165	16:12:15.755	-52:02:59.39	13.301±0.010	12.884±0.011	12.810±0.134
166	16:12:15.727	-52:04:44.88	10.086±0.003	9.279±0.006	8.926±0.009
167	16:12:15.571	-52:00:07.95	15.999±0.035	14.933±0.025	14.188±0.420
168	16:12:14.998	-52:02:36.30	12.763±0.006	12.071±0.005	11.730±0.066
169	16:12:14.706	-52:02:19.76	11.954±0.005	11.251±0.007	10.892±0.032
170	16:12:14.592	-52:02:52.46	13.347±0.007	12.260±0.010	11.813±0.061
171	16:12:14.265	-52:01:03.13	13.113±0.004	12.085±0.009	11.744±0.057
172	16:12:14.033	-52:01:56.49	13.618±0.021	12.404±0.010	11.687±0.058
173	16:12:14.039	-52:03:34.15	15.641±0.044	14.308±0.029	13.121±0.141
174	16:12:13.555	-52:05:10.24	11.185±0.003	10.346±0.005	10.013±0.008
175	16:12:13.434	-52:01:40.05	11.302±0.004	10.656±0.006	10.421±0.026
176	16:12:13.441	-52:02:53.09	11.599±0.007	10.462±0.007	9.758±0.015
177	16:12:13.396	-52:03:28.66	16.216±0.051	14.063±0.015	12.442±0.084
178	16:12:13.272	-52:01:17.36	13.964±0.010	13.440±0.014	12.858±0.130
179	16:12:12.927	-52:02:32.71	14.894±0.031	13.132±0.027	11.919±0.091
180	16:12:12.872	-52:04:56.28	9.531±0.003	9.269±0.008	9.154±0.006
181	16:12:12.792	-52:03:20.08	15.299±0.020	15.035±0.043	13.113±0.160
182	16:12:12.581	-52:00:32.00	13.899±0.007	12.416±0.006	11.707±0.040
183	16:12:12.656	-52:05:06.93	13.860±0.007	13.256±0.011	12.570±0.065
184	16:12:12.492	-52:01:45.40	12.207±0.003	10.985±0.006	10.477±0.024
185	16:12:12.433	-52:00:01.24	10.583±0.006	9.851±0.009	9.514±0.012
186	16:12:12.446	-52:02:01.52	12.525±0.006	12.339±0.008	12.123±0.065
187	16:12:12.392	-52:02:20.59	14.832±0.022	14.024±0.019	13.199±0.180
188	16:12:12.114	-52:01:27.16	15.645±0.038	13.480±0.021	11.174±0.046
189	16:12:12.097	-52:03:29.52	15.136±0.016	14.059±0.017	13.555±0.235
190	16:12:12.075	-52:03:21.66	13.174±0.005	12.042±0.007	11.491±0.031
191	16:12:12.115	-52:05:04.39	13.666±0.013	12.976±0.012	12.670±0.072
192	16:12:11.942	-52:04:49.03	7.656±0.003	7.157±0.005	7.021±0.003

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
193	16:12:11.643	-52:01:42.13	12.862±0.014	11.629±0.009	10.938±0.034
194	16:12:11.567	-52:04:10.07	8.113±0.001	6.678±0.007	5.965±0.003
195	16:12:11.382	-52:02:17.65	15.653±0.043	15.202±0.030	13.657±0.263
196	16:12:11.370	-52:02:58.33	13.997±0.009	12.746±0.007	11.888±0.062
197	16:12:11.108	-51:58:36.99	13.902±0.009	13.487±0.012	13.765±0.188
198	16:12:11.111	-52:01:36.89	14.252±0.011	12.688±0.009	12.092±0.064
199	16:12:10.845	-51:58:59.85	13.569±0.015	12.966±0.011	12.812±0.069
200	16:12:10.747	-52:00:44.57	11.774±0.004	11.635±0.007	11.564±0.041
201	16:12:10.257	-52:02:34.29	12.867±0.005	11.793±0.008	11.403±0.043
202	16:12:10.108	-52:02:42.91	14.712±0.027	14.001±0.018	13.323±0.236
203	16:12:09.802	-52:02:06.21	14.329±0.025	13.921±0.018	12.903±0.168
204	16:12:09.686	-52:00:18.67	13.922±0.009	12.639±0.008	12.057±0.056
205	16:12:09.625	-52:02:56.87	14.598±0.020	13.716±0.019	13.512±0.236
206	16:12:09.255	-52:02:11.18	14.577±0.018	12.655±0.011	11.540±0.060
207	16:12:09.209	-52:03:13.06	14.172±0.010	13.741±0.018	13.409±0.200
208	16:12:09.094	-52:03:37.73	14.564±0.011	13.274±0.010	12.675±0.088
209	16:12:08.635	-51:59:01.15	11.522±0.005	10.016±0.007	9.306±0.010
210	16:12:08.502	-52:04:39.90	13.910±0.013	13.380±0.008	12.789±0.097
211	16:12:08.079	-51:58:44.71	11.333±0.006	10.596±0.006	10.347±0.014
212	16:12:07.957	-52:04:35.14	13.712±0.007	12.531±0.008	11.969±0.062
213	16:12:07.422	-52:02:14.12	15.721±0.039	13.123±0.014	11.181±0.042
214	16:12:07.065	-51:59:47.87	12.208±0.005	11.422±0.006	11.005±0.022
215	16:12:06.984	-52:02:35.00	13.873±0.037	13.310±0.036	13.008±0.160
216	16:12:06.865	-52:00:57.49	12.406±0.008	12.165±0.008	11.728±0.056
217	16:12:06.734	-51:59:55.76	11.305±0.004	10.104±0.006	9.590±0.008
218	16:12:06.586	-52:04:28.16	13.449±0.024	12.116±0.017	11.440±0.039
219	16:12:06.311	-52:03:27.39	13.502±0.008	12.603±0.008	12.091±0.062
220	16:12:06.201	-52:02:53.87	13.651±0.007	13.245±0.012	12.937±0.142
221	16:12:06.221	-52:04:56.25	12.611±0.009	12.315±0.010	12.124±0.046
222	16:12:05.560	-52:00:12.46	12.778±0.006	12.424±0.006	12.338±0.053
223	16:12:05.451	-52:03:46.45	15.489±0.071	14.672±0.030	14.268±0.370
224	16:12:05.230	-52:02:19.73	12.774±0.004	11.815±0.007	11.307±0.040
225	16:12:05.074	-51:59:13.22	13.129±0.007	12.716±0.007	12.472±0.052
226	16:12:05.048	-51:59:41.13	11.846±0.005	11.085±0.004	10.751±0.016
227	16:12:04.849	-52:01:49.77	14.340±0.032	12.874±0.010	12.189±0.080
228	16:12:04.761	-52:02:31.88	13.593±0.015	12.438±0.009	12.049±0.077
229	16:12:04.640	-52:01:26.96	14.611±0.032	12.339±0.006	11.387±0.042
230	16:12:04.542	-52:04:34.35	14.634±0.019	13.255±0.008	12.710±0.075
231	16:12:04.298	-52:00:41.99	14.577±0.011	13.017±0.006	12.755±0.110
232	16:12:03.854	-52:00:24.46	11.378±0.004	10.624±0.006	10.318±0.012
233	16:12:03.909	-52:03:17.35	13.584±0.009	12.523±0.009	12.050±0.056
234	16:12:03.479	-52:02:31.20	12.068±0.003	10.680±0.006	10.022±0.019
235	16:12:03.374	-52:00:41.89	13.895±0.009	13.569±0.010	13.045±0.147
236	16:12:03.443	-52:04:56.91	9.392±0.003	8.097±0.004	7.555±0.004
237	16:12:03.221	-52:04:07.14	14.070±0.010	13.827±0.011	13.198±0.129
238	16:12:02.950	-51:58:57.88	12.419±0.007	11.471±0.008	11.141±0.026
239	16:12:02.958	-52:05:06.16	12.572±0.004	11.683±0.007	11.305±0.028

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
240	16:12:02.841	-51:59:40.50	13.778±0.014	12.550±0.008	11.839±0.038
241	16:12:02.840	-52:03:14.04	11.911±0.019	10.537±0.009	9.889±0.016
242	16:12:02.374	-52:00:11.55	12.536±0.006	11.926±0.006	11.651±0.037
243	16:12:02.294	-51:58:32.18	12.371±0.007	11.175±0.007	10.685±0.025
244	16:12:02.266	-51:58:52.37	12.840±0.006	11.851±0.007	11.466±0.026
245	16:12:01.949	-52:01:18.50	13.313±0.008	12.299±0.007	11.689±0.047
246	16:12:01.839	-51:58:43.54	11.900±0.009	10.738±0.006	10.269±0.019
247	16:12:01.840	-52:00:01.59	14.264±0.010	12.965±0.009	12.500±0.066
248	16:12:01.819	-52:02:48.05	14.683±0.016	14.146±0.013	14.152±0.425
249	16:12:01.697	-52:00:45.64	11.315±0.004	9.988±0.005	9.414±0.007
250	16:12:01.592	-52:02:29.09	11.090±0.004	10.382±0.005	10.032±0.016
251	16:12:01.523	-52:04:59.46	7.566±0.005	6.112±0.040	5.175±0.002
252	16:12:01.237	-52:01:57.96	13.027±0.008	11.829±0.006	11.275±0.045
253	16:12:01.107	-52:01:27.93	13.720±0.006	13.324±0.011	13.117±0.167
254	16:12:00.129	-51:59:09.62	13.834±0.011	12.833±0.007	12.430±0.071
255	16:11:59.697	-51:59:50.72	11.463±0.004	10.351±0.005	9.879±0.011
256	16:11:59.722	-52:03:26.82	11.403±0.003	11.022±0.005	10.928±0.025
257	16:11:59.456	-52:04:09.17	15.129±0.025	13.304±0.011	12.202±0.054
258	16:11:59.265	-52:00:40.57	13.179±0.035	12.156±0.016	11.565±0.056
259	16:11:59.148	-52:01:22.15	11.663±0.003	10.228±0.007	9.604±0.009
260	16:11:58.973	-52:02:14.36	13.042±0.006	12.618±0.010	12.415±0.076
261	16:11:58.951	-52:03:05.94	14.124±0.048	12.543±0.023	10.859±0.019
262	16:11:58.840	-52:02:34.75	13.493±0.006	12.300±0.007	11.720±0.044
263	16:11:58.651	-52:01:31.72	13.247±0.007	12.133±0.007	11.695±0.038
264	16:11:58.430	-52:03:50.86	16.108±0.042	13.459±0.017	11.510±0.034
265	16:11:58.309	-52:02:00.39	13.969±0.010	12.677±0.007	12.152±0.067
266	16:11:58.218	-52:02:20.02	10.765±0.003	9.504±0.007	8.912±0.006
267	16:11:58.212	-52:05:00.78	11.916±0.004	11.049±0.006	10.594±0.017
268	16:11:58.003	-52:01:10.21	13.823±0.014	13.108±0.009	12.639±0.073
269	16:11:57.956	-52:02:56.25	12.392±0.003	11.997±0.008	11.600±0.034
270	16:11:57.233	-52:01:30.30	12.941±0.005	11.995±0.008	11.556±0.040
271	16:11:57.143	-52:04:27.15	13.048±0.006	11.948±0.005	11.376±0.033
272	16:11:57.010	-52:04:33.85	12.835±0.013	11.941±0.008	11.570±0.040
273	16:11:56.909	-51:59:55.36	12.750±0.006	11.749±0.007	11.416±0.032
274	16:11:56.831	-52:00:26.16	11.843±0.005	11.624±0.005	11.514±0.023
275	16:11:56.746	-52:03:36.93	11.626±0.004	10.565±0.004	10.043±0.010
276	16:11:56.392	-52:01:39.96	13.346±0.007	12.772±0.010	12.754±0.092
277	16:11:56.252	-51:58:31.96	12.224±0.008	10.494±0.009	9.779±0.020
278	16:11:56.186	-52:04:53.28	12.955±0.004	11.907±0.006	11.510±0.036
279	16:11:56.027	-51:59:54.93	12.542±0.006	12.320±0.008	12.525±0.096
280	16:11:56.028	-52:02:30.13	13.460±0.046	12.978±0.040	12.520±0.091
281	16:11:55.527	-52:00:44.50	11.626±0.006	10.346±0.005	9.773±0.011
282	16:11:55.277	-51:59:06.79	14.540±0.014	13.867±0.011	12.871±0.127
283	16:11:55.244	-51:58:26.13	14.757±0.015	14.233±0.013	13.045±0.179
284	16:11:54.918	-52:03:11.63	11.317±0.003	10.458±0.007	10.088±0.010
285	16:11:54.897	-52:02:23.20	10.584±0.003	9.858±0.004	9.530±0.008
286	16:11:54.875	-52:04:01.23	14.804±0.020	12.175±0.007	10.846±0.020

Tabela B.2: *continuação.*

IRS	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	J	H	K_s
287	16:11:54.585	-51:59:19.23	13.985±0.011	12.895±0.010	12.577±0.082
288	16:11:54.523	-52:03:03.86	16.155±0.045	13.099±0.011	11.559±0.031
289	16:11:54.201	-52:01:03.39	13.850±0.007	12.543±0.006	11.975±0.052
290	16:11:54.216	-52:04:18.97	14.483±0.030	14.068±0.026	13.800±0.268
291	16:11:54.171	-52:02:55.28	11.961±0.003	11.225±0.004	11.008±0.021
292	16:11:54.109	-52:01:37.39	12.914±0.005	12.433±0.007	12.164±0.047
293	16:11:53.952	-51:59:41.09	12.359±0.006	12.128±0.007	11.954±0.055
294	16:11:53.857	-52:02:11.71	11.819±0.004	11.052±0.005	10.739±0.014
295	16:11:53.698	-52:03:14.51	15.567±0.028	13.671±0.021	11.685±0.029
296	16:11:53.706	-52:05:02.21	13.565±0.010	12.398±0.008	12.120±0.076
297	16:11:53.296	-52:04:07.07	16.579±0.080	14.090±0.016	12.492±0.074
298	16:11:52.839	-52:01:35.95	12.936±0.024	11.940±0.008	11.485±0.031
299	16:11:52.825	-52:04:58.96	14.639±0.028	14.011±0.027	13.359±0.183
300	16:11:52.718	-52:04:08.25	13.903±0.013	13.152±0.009	13.111±0.150
301	16:11:52.499	-51:59:54.69	14.360±0.017	13.113±0.009	12.597±0.074
302	16:11:52.446	-51:59:20.41	14.715±0.015	13.371±0.009	12.538±0.091
303	16:11:52.428	-52:01:59.79	14.544±0.023	13.548±0.012	12.873±0.104
304	16:11:52.185	-52:02:04.45	12.669±0.005	12.247±0.005	12.097±0.042
305	16:11:51.974	-52:00:47.98	13.879±0.010	12.561±0.007	11.967±0.051
306	16:11:52.007	-52:02:54.97	13.407±0.007	12.417±0.008	11.926±0.050
307	16:11:51.711	-51:59:57.17	12.930±0.006	12.504±0.007	12.274±0.060

Apêndice C

**Espectros de estrelas frias dos
campos de [DBS2003] 156 e 157**

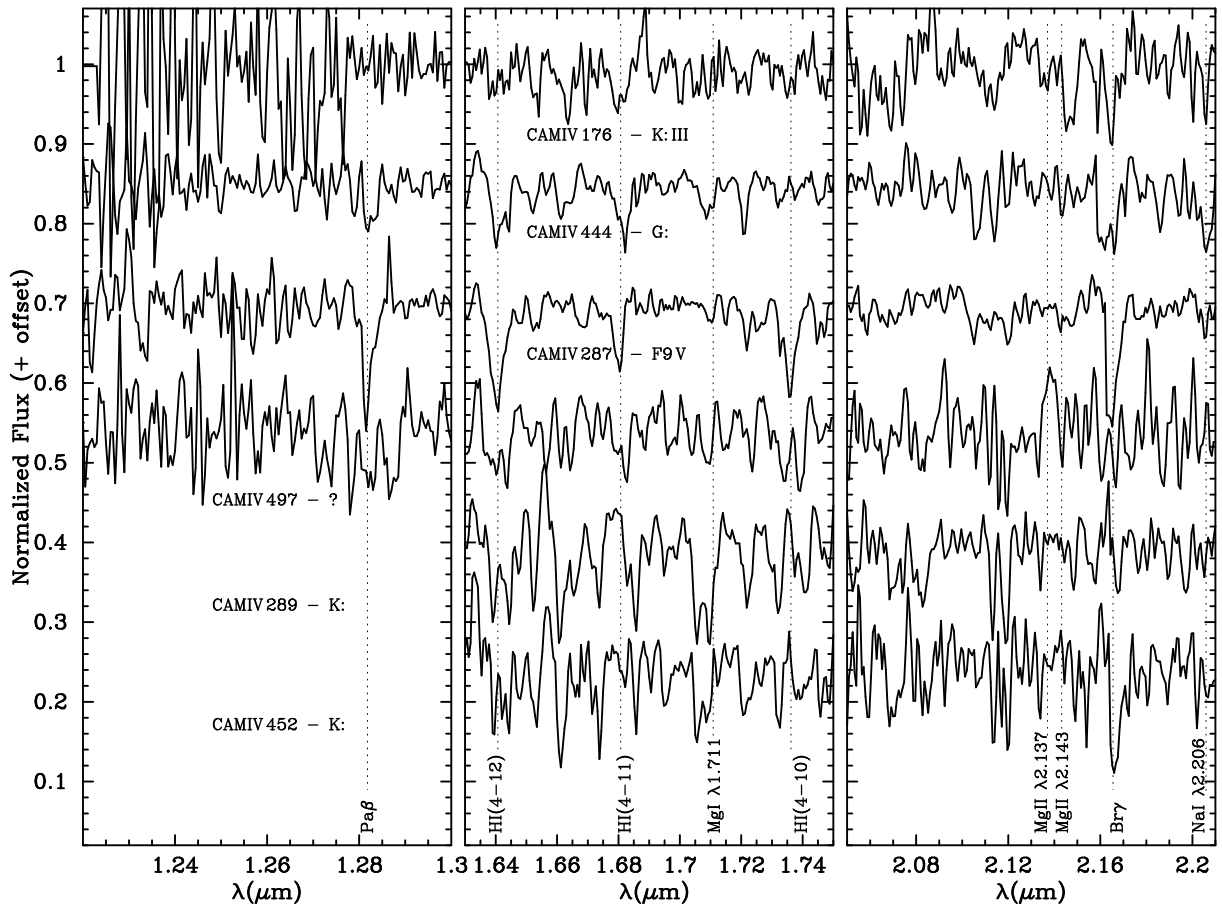


Figura C.1: Espectros de estrelas frias observadas no campo de GAL 331.31-00.34.

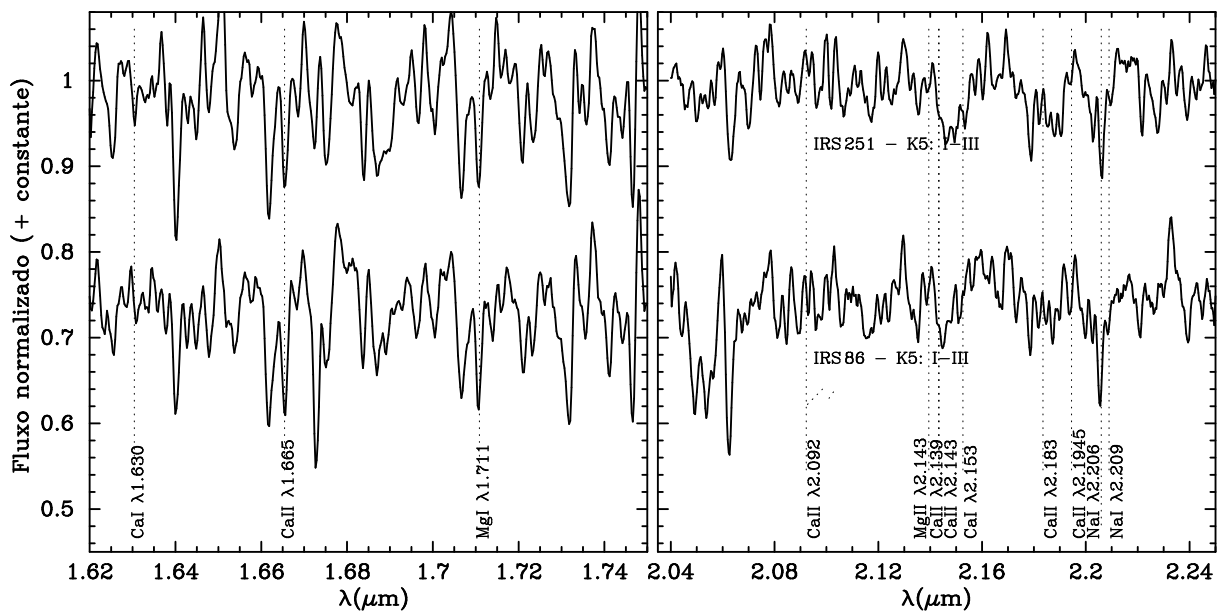


Figura C.2: Espectros de estrelas frias observadas no campo de GAL 331.11-00.51.