

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

Alessandro Pereira Moisés

# **Braços Espirais da Galáxia: Posição das Regiões H II Gigantes e Formação Estelar**

São Paulo

2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Alessandro Pereira Moisés

# **Braços Espirais da Galáxia: Posição das Regiões H II Gigantes e Formação Estelar**

Tese apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Augusto Damineli Neto

São Paulo

2010



*À minha família!*



# Agradecimentos

À minha família pelos ensinamentos, lições de vida, apoio e incentivos durante toda minha trajetória. Palavras não são suficientes para mostrar o quanto sou grato. A eles dedico este trabalho;

Ao meu orientador, Professor Dr. Augusto Damineli Neto, pela paciência na orientação, pelos temas sugeridos ao longo deste trabalho e pelo exemplo de profissional;

Aos colaboradores Dr Peter S. Conti, Dr. Robert D. Blum, Dra. Elysandra Figuerêdo, Dr. Cássio Leandro Dal Ri Barbosa e Felipe Navarete pelas discussões científicas, pelos temas levantados e por toda a motivação dada ao trabalho;

Aos Professores: Dr. Jacques Lépine pela relatoria durante este trabalho e por ministrar a disciplina Astronomia Galáctica, Dr. Eduardo Janot Pacheco pela disciplina Evolução Estelar, Dra. Claudia Mendes de Oliveira e Dr Roberto Dias da Costa por ministrarem a disciplina Astronomia Observacional, Dr. Amâncio Friaça pela disciplina Astronomia Extragaláctica, Dra. Silvia Rossi e Dr. José Ademir pelas conversas sobre um pouco de tudo, Dr. Gastão B. Lima Neto, Dra. Vera Jatenco S. Pereira, Dra. Claudia Mendes de Oliveira e Dra. Sandra dos Anjos pela orientação na disciplina PAE;

Aos colegas: Vinicius Mori Placco pela revisão gramatical desta tese, Tiago Mendes de Almeida que junto com o Vinicius Placco fecham comigo o trio do Café com Ciência. Mai-ran Macedo Teodoro, Gustavo Rocha, Marielli e José Henrique Groh pela companhia em dividir a sala E308 comigo, e os demais companheiros do IAG: Douglas Barros, Gleidson da Silva, Alan Jorge, Rodrigo Holanda, Felipe Santos, Vinicius Busti, Jesus, Vital, João Maria, Tiago Ricci, Pedro Beaklini, Thiago Matheus, Felipe Oliveira, Aline Vidotto, Oscar Cavichia, Marcus Vinicius, Bernardo Borges, Raimundo Lopes, Carlos Braga, Rafael Santucci, César Mello, Márcia Leão, Reinaldo S. de Lima, Márcio Avellar, Rafael Kimura,

Rodrigo Vieira, Danilo Morales, Tiozinho, Tiago Triumpho e tantos outros, a todos um muito obrigado;

À toda a comunidade *IAGeana*, em destaque para as secretárias: Marina Freitas, Conceição, Regina Iacovelli e Aparecida dos Santos e ao pessoal da informática: Marco dos Santos, Patrícia Perez, Ulisses Castello e Luis Manrique, que de uma forma ou de outra contribuíram para o andamento desta tese;

Ao povo brasileiro que financiou meu trabalho por meio do CNPq, sob o projeto n°: 141420/2005-7.

*“(...) Que ciência positiva, que lógica, que abstração formal pode levar a pensar na morte, no amor, nos outros, nas circunstâncias da história, na violência, na dor ou no sofrimento, em todo o antigo problema do mal? Se a cultura só serve para os domingos da vida, para fazer fila nos museus ou aplaudir nos concertos, eu a deixo de bom grado para todos os esnobismos. Não, as questões suscitadas desde a aurora do tempo pelo que chamamos de humanidades ajudam a repensar aquelas que põem hoje em torno e por causa das ciências... Mestiçagem, eis o meu ideal de cultura. Branco e preto, ciências e letras, monoteísmo e politeísmo, sem ódio recíproco, em prol de uma pacificação que eu desejo e pratico. Sempre a paz, para um filho da guerra.”*

Michel Serres (Luzes, 1999)

*“Deve-se escrever da mesma maneira como as lavadeiras lá de Alagoas fazem seu ofício. Elas começam com uma primeira lavada, molham a roupa suja na beira da lagoa ou do riacho, torcem o pano, molham-no novamente, voltam a torcer. Colocam o anil, ensaboam e torcem uma, duas vezes. Depois enxaguam, dão mais uma molhada, agora jogando a água com a mão. Batem o pano na laje ou na pedra limpa, e dão mais uma torcida e mais outra, torcem até não pingar do pano uma só gota. Somente depois de feito tudo isso é que elas dependuram a roupa lavada na corda ou no varal, para secar. Pois quem se mete a escrever devia fazer a mesma coisa. A palavra não foi feita para enfeitar, brilhar como ouro falso; a palavra foi feita para dizer.”*

Graciliano Ramos



# Resumo

Nesta tese é apresentado um catálogo fotométrico no infravermelho próximo de 35 Regiões H II, todas pertencentes ao disco Galáctico. Esta faixa espectral é útil uma vez que os comprimentos de onda são grandes o suficiente para se ter uma baixa extinção interestelar comparada ao visível, e são pequenos o suficiente para diagnosticar as fotosferas estelares. Foram obtidas imagens nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$  e imagens do Spitzer nos canais de 4,5, 5,8 e 8,0  $\mu\text{m}$ . Após a fotometria nas imagens  $JHK$ , foi possível contruir diagramas cor-cor e cor-magnitude. Foram utilizadas imagens coloridas, compostas de uma combinação RGB das imagens nas três bandas, tanto para as imagens  $JHK$  quanto para as imagens do Spitzer. Estas imagens, junto com os diagramas, foram utilizadas para levantar candidatos a fontes ionizantes das regiões H II, assim como objetos ainda em estágios primordiais de evolução (CTTs e MYSOs). Estes dados também foram utilizados para associar à cada região H II um estágio evolutivo (de  $A$  até  $D$ , da região mais jovem à mais evoluída). Baseado na posição da Sequência Principal em diagramas cor-magnitude, foi possível comparar as distâncias cinemáticas com nossos dados. Além disso, quando possível, foram utilizadas distâncias de regiões H II determinadas por paralaxe espectrofotométrica (disponíveis na literatura) e utilizando duas leis de extinção interestelar extremas mostrou-se que estas distâncias são menores que suas contrapartidas cinemáticas, e estão em acordo com distâncias determinadas por outros métodos, como por paralaxe trigonométrica. Sabendo que estas regiões de formação estelar seguem a dinâmica do gás, o mapeamento da distribuição destas regiões permite checar a estrutura espiral da Via Láctea.



# Abstract

In this work, a near infrared photometric catalog of 35 H II regions that belongs to the Galactic plane is presented. This spectral range is useful since the wavelengths are long enough to have less influence of the interstellar extinction compared to the visible domain, and they are small enough to still show stellar photospheric features. Images of these H II regions in the  $J$ ,  $H$  and  $K$ -band together with IRAC-Spitzer images (channels 4.5, 5.8 and 8.0  $\mu\text{m}$ ) were used. After the photometry in the  $JHK$  images, color-color and color-magnitude diagrams were constructed. These two groups of images ( $JHK$  and 4.5, 5.8 and 8.0  $\mu\text{m}$ ) colored in a RGB combination were used, together with the diagrams, to identify the ionizing sources candidates, as well as objects still embedded in their natal cocoon (CTTs and MYSOs). An evolutionary stage to these regions (from  $A$  to  $D$ , from the younger region to the more evolved) was inferred based on the images and diagrams. These diagrams were also used to infer if the kinematic distance is correct, based on the Main Sequence location. Non-kinematic distances to several H II regions, when it was possible, were collected from the literature. Using two extreme interstellar extinction laws, it was possible to compare these distances with the kinematic results. These non-kinematic distances are lower than that from kinematic techniques. Also, these distance discrepancies are in agreement with distances derived by other methodologies, as trigonometric parallax. Since these star forming regions follow the gas dynamics, mapping their distribution along the Galaxy allows to check the spiral pattern of the Milky Way.



## Lista de Figuras

- 1.1 Imagem superior: Vista de “topo” de uma galáxia espiral (M51). Os objetos vermelhos são regiões de formação estelar, em particular, as regiões H II gigantes. Imagem inferior: A Via Láctea como é vista da Terra. Ela é uma galáxia espiral vista de perfil. . . . . 36
- 1.2 Imagem superior: Esquema que mostra como se determina distâncias por meio de técnicas cinemáticas: dada a velocidade radial do objeto e sua componente  $l$ , pode-se determinar a distância do alvo. Imagem inferior: Ajuste da curva de rotação de Clemens (1985). . . . . 39
- 2.1 Ilustração da ferramenta *Starfinder* em IDL. Acima está a região onde será realizada a fotometria, no meio está exibida uma das estrelas de campo escolhida para construção de uma *PSF*-média, a terceira exibe a tela do procedimento para determinação do ruído fotônico. . . . . 46
- 2.2 Exemplos de diagramas C-C e C-M. À esquerda: diagrama Cor-cor (C-C), com linhas de avermelhamento para estrelas de tipos espectrais M e O (linhas contínuas) para duas diferentes leis de extinção. As linhas pretas têm uma inclinação de  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 1,83$  (Mathis, 1990), enquanto as linhas azuis têm inclinação de 2,07 (Stead e Hoare, 2009). Nos dois casos, os valores da extinção ( $A_K$ ) estão indicados. À direita: diagrama cor-magnitude (C-M) com a sequência principal deslocada pela distância (sequência da esquerda) e a sequência principal afetada também pela extinção interestelar (linha da direita). As duas leis de extinção estão exibidas no diagrama C-M. . . . . 47

3.1	Imagens coloridas da região G5.97-1.18 (M8). Esquerda: imagem colorida composta ( $JHK_s$ ). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, os tamanhos são de $\approx 3,0$ minutos de arco de lado. . . . .	92
3.2	Região H II G5.97-1.18 (M8). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Sempre nestes diagramas, a posição da sequência principal (linha vertical no diagrama C-M) é afetada somente pela distância cinemática adotada (maiores detalhes no texto). Extinção e avermelhamento são exibidos para $A_K = 1$ . As linhas de avermelhamento no diagrama C-C são de Straižys e Laugalys (2008). . . . .	92
3.3	Imagens coloridas da região G10.2-0.3 (W31-Sul), reproduzidas de Blum et al. (2001). Esquerda: imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 1,8$ minutos de arco de lado. . . . .	93
3.4	Região H II G10.2-0.3 (W31-Sul). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M), a distância cinemática adotada é de 4,5 kpc (Russeil, 2003). A fotometria é de Blum et al. (2001) e foi corrigida para o sistema fotométrico do 2MASS. Blum et al. (2001) utilizaram os objetos #1, #2 e #3 para determinar a distância espectrofotométrica para esta região ( $d_{spec.} = 3,4$ kpc). . . . .	93
3.5	Imagens coloridas de G10.3-0.1 (W31-Norte). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é de $\approx 2,0 \times 1,5$ minutos de arco. . . . .	94
3.6	Região H II G10.3-0.1 (W31-Norte). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A fotometria foi obtida para as estrelas na caixa exibida na imagem colorida no infravermelho próximo. O objeto #1032 tem uma magnitude limite na banda $J$ igual a 17,0 mag (veja no texto explicações sobre as magnitudes limites). . . . .	94
3.7	Imagens coloridas de G12.8-0.2 (W33). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Os tamanhos são de $\approx 1,0$ minuto de arco de lado. . . . .	95

3.8	Região H II G12.8-0.2 (W33). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos não detectados estão exibidos (na ponta das setas) utilizando as magnitudes limites de $J = H = 17,5$ mag. . . . .	95
3.9	Imagens coloridas de G15.0-0.7 (M17). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, o tamanho é de $\approx 1,5$ minutos de arco de lado. . . . .	96
3.10	Região H II G15.0-0.7 (M17). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O objeto #24 não foi detectado na banda $J$ , então tivemos que adotar a magnitude limite $J = 16,0$ mag. . . .	96
3.11	Imagens coloridas de G22.7-0.4. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. O tamanho é de $\approx 2,0$ minutos de arco de lado. Não detectamos nebulosidade na imagem no infravermelho próximo, mas na imagem do Spitzer podemos ver uma fraca emissão nebular e que não está claramente conectada ao aglomerado. . . . .	97
3.12	Região H II G22.7-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). No diagrama C-M, a distância cinemática aparenta ser maior do que o esperado pela fotometria. A ponta da sequência principal é menos brilhante que os objetos mais brilhantes do aglomerado. . . . .	97
3.13	Imagens coloridas de G25.4-0.2 (W42). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ , reproduzida de Blum et al. (2000). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Nas imagens, os tamanhos são $\approx 1,5$ minutos de arco de lado. . . .	98
3.14	Região H II G25.4-0.2 (W42). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Blum et al. (2000) utilizaram #1, #2 e #3 para obter uma distância espectrofotométrica de 2,2 kpc, enquanto que a distância cinemática é de 11,5 kpc. A posição da sequência principal (diagrama C-M) é para a distância cinemática, e vemos que os objetos mais brilhantes pertencentes à W42 são mais brilhantes que o topo da sequência principal. O objeto #57 não foi detectado na banda $J$ , então adotamos a magnitude limite no valor de $J = 16,5$ mag. . . . .	98

3.15	Imagens coloridas de G30.8-0.2 (W43). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 0,83$ minutos de arco de lado. . . . .	99
3.16	Região H II G30.8-0.2 (W43). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos #1, #2 e #3 foram utilizados para a determinação de uma distância por paralaxe espectrofotométrica (4,3 kpc, Blum et al., 1999). O valor da magnitude na banda $J$ para os objetos #9 e #10 é de $J = 17,0$ mag. . . . .	99
3.17	Imagens coloridas de G45.5+0.1 (K47). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 1,5$ minutos de arco de lado. . . . .	100
3.18	Região H II G45.5+0.1 (K47). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A magnitude limite na banda $J$ é de $J = 16,5$ mag. . . . .	100
3.19	Imagens coloridas de G48.9-0.3. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 3,3$ minutos de arco de lado. . . . .	101
3.20	Região H II G48.9-0.3. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). As magnitudes limites para esta região (utilizadas nos objetos não detectados nas respectivas bandas): $J = 17,0$ e $H = 16,0$ mag. . . . .	101
3.21	Imagem colorida de G49.5-0.4 (W51A). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ , reproduzida de Figuerêdo et al. (2005). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. O campo de visão cobre $\approx 4,0 \times 3,5$ minutos de arco. . . . .	102
3.22	Região H II G49.5-0.4 (W51A). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O topo da linha da sequência principal é mais brilhante que as estrelas pertencentes à esta região. Os objetos mais brilhantes que o topo desta sequência principal estão em um primeiro plano. A distância cinemática de 5,5 kpc não difere muito do resultado obtido por Barbosa et al. (2008). A magnitude limite na banda $J$ é de 16,5 mag. . . .	102

3.23	Imagens coloridas de G133.7+1.2 (W3). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ , construída a partir de um mosaico de imagens individuais do 2MASS. Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, os tamanhos são $\approx 18,0$ minutos de arco de lado. . . . .	103
3.24	Região H II G133.7+1.2 (W3). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Aqui, os dados fotométricos são do catálogo do 2MASS, e foram utilizados para identificar estrelas de tipo espectral O e determinar a distância de W3 por paralaxe espectrofotométrica. Navarete <i>et al.</i> (2010, em preparação) determinaram um valor de 1,85 kpc. Este resultado está em concordância com os resultados de Xu et al. (2006), cuja distância trigonométrica obtida foi de 1,95 kpc. A distância cinemática para esta região é de 4,2 kpc (Russeil, 2003). . . . .	103
3.25	Imagens coloridas de G274.0-1.1 (RCW42). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Os tamanhos são $\approx 1,5$ minutos de arco de lado. Na imagem $JHK_s$ podemos ver um aglomerado estelar profundamente embebido. . . . .	104
3.26	Região H II G274.0-1.1 (RCW42). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O diagrama C-M aparenta estar consistente com a distância cinemática adotada. . . . .	104
3.27	Imagem colorida de G282.0-1.2 (RCW46). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagens do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 3,0$ minutos de arco de lado. . . . .	105
3.28	Região H II G282.0-1.2 (RCW46). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O topo da linha de sequência principal é mais brilhante que os membros do aglomerado, o que indica que a distância cinemática adotada deve estar correta. . . . .	105
3.29	Imagens coloridas de G284.3-0.3 (NGC3247). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 3,3$ minutos de arco de lado. Alguns objetos no aglomerado cerrado (caixa vermelha) estão indicados na imagem no infravermelho próximo.	106

3.30	Região H II G284.3-0.3 (NGC3247). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os membros do aglomerado estão espacialmente próximos e apresentam $H - K_s = 0,6$ . Nossa fotometria sugere que esta região é mais próxima do que indica uma distância cinemática de 4,7 kpc (Russeil, 2003). . . . .	106
3.31	Imagens coloridas de G287.4-0.6 (NGC3372). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 4,0$ minutos de arco de lado. . . . .	107
3.32	Região H II G287.4-0.6 (NGC3372). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância cinemática leva a uma posição da sequência principal cujo topo é menos brilhante que o esperado pelos membros do aglomerado. . . . .	107
3.33	Imagens coloridas de G291.6-0.5 (NGC3603). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ , exceto os objetos #6, #19 e #20, os demais estão dentro da área limitada pela caixa preta. Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é $\approx 4,0 \times 5,0$ minutos de arco. . . . .	108
3.34	Região H II G291.6-0.5 (NGC3603). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). No centro da imagem colorida $JHK_s$ , podemos ver um aglomerado estelar bastante denso. Os membros deste aglomerado estão indicados pela caixa preta na imagem colorida $JHK_s$ e pela caixa vermelha no diagrama C-C. . . . .	108
3.35	Imagens coloridas de G298.2-0.3. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Di- reita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho da base é $\approx 2,0$ minutos de arco. . . . .	109
3.36	Região H II G298.2-0.3. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Dia- grama cor-magnitude (C-M). Poucos objetos foram detectados nesta região.	109
3.37	Imagens coloridas de G298.9-0.4. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Di- reita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, a base mede $\approx 2,0$ minutos de arco. . . . .	110

3.38	Região H II G298.9-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Não há ainda um já evidente aglomerado nesta jovem região. . . . .	110
3.39	Imagens coloridas de G305.2+0.0. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer, A imagem do Spitzer está saturada em alguns locais (as zonas mais azuladas). Em ambas as imagens, cada lado mede $\approx 5,5$ minutos de arco. . . . .	111
3.40	Região H II G305.2+0.0. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A fotometria foi realizada dentro das duas regiões demarcadas pelos dois retângulos azuis na imagem colorida $JHK_s$ . . . . .	111
3.41	Imagens coloridas de G305.2+0.2. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, cada lado tem $\approx 2,0$ minutos de arco. . . . .	112
3.42	Região H II G305.2+0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância cinemática adotada de 3,5 kpc (Russeil, 2003) aparenta estar em consistência com os dados fotométricos. . . . .	112
3.43	Imagens coloridas de G308.7+0.6. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, os tamanhos são $\approx 3,0$ minutos de arco de lado. Neste pequeno campo de visão, não vemos nebulosidade, mas em um campo maior de $\approx 8,0$ minutos de arco de lado fornecido pela imagem do ISPI (não exibida aqui em sua totalidade), uma fraca nebulosidade pode ser vista circundando o aglomerado estelar. . . . .	113
3.44	Região H II G308.7+0.6. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A sequência principal aparenta estar em um local correto para ajuste dos membros do aglomerado, o que indica que a distância cinemática deve estar correta. . . . .	113
3.45	Imagens coloridas de G320.1+0.8 (RCW87). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 4,0$ minutos de arco de lado. . . . .	114

3.46	Região H II G320.1+0.8 (RCW87). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II bastante embebida e intensa emissão nebular. A magnitude limite para esta região na banda $J$ é de 17,0 mag. . . . .	114
3.47	Imagens coloridas de G320.3-0.2. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 3,0$ minutos de arco de lado. . . . .	115
3.48	Região H II G320.3-0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II evoluída, mas com nebulosidade ainda visível na imagem do Spitzer. . . . .	115
3.49	Imagens coloridas de G322.2+0.6 (RCW92). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é $\approx 1,0 \times 1,5$ minutos de arco. . . . .	116
3.50	Região H II G322.2+0.6 (RCW92). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II obscurecida, onde os objetos mais brilhantes aparentemente estão em um plano de frente e um aglomerado escondido na imagem no infravermelho próximo pode ser visto na imagem do Spitzer. . . . .	116
3.51	Imagens coloridas de G327.3-0.5 (RCW97). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 4,0$ minutos de arco de lado. . . . .	117
3.52	Região H II G327.3-0.5 (RCW97). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C), a maioria dos objetos aparentam estar em um primeiro plano. Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A magnitude limite nesta região é de $J = 16,0$ mag. . . . .	117
3.53	Imagens coloridas de G331.5-0.1. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é $\approx 3,0 \times 4,0$ minutos de arco. . . . .	118

3.54	Região H II G331.5-0.1. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos #1, #2 e #3 estão saturados em nossas imagens, nestes casos utilizamos fotometria do catálogo do 2MASS. A distância cinemática adotada para esta região é de 10,8 kpc (Russeil, 2003), a qual, segundo o ajuste da sequência principal no diagrama C-M, aparenta ser sobre-estimada. . . . .	118
3.55	Imagens coloridas de G333.1-0.4. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ , reproduzida de Figuerêdo et al. (2005). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 1,5$ minutos de arco de lado. . . . .	119
3.56	Região H II G333.1-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância adotada aqui é de 3,5 kpc (Russeil, 2003). Figuerêdo et al. (2005) determinaram uma distância espectrofotométrica de 2,6 kpc utilizando espectroscopia na banda $K$ das estrelas #1 e #2. A magnitude limite na banda $J$ é de 18,0 mag. . . . .	119
3.57	Imagens coloridas de G333.3-0.4. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens o campo de visão é de $\approx 3,7 \times 5,0$ minutos de arco. . . . .	120
3.58	Região H II G333.3-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). . . . .	120
3.59	Imagens coloridas de G333.6-0.2. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 5,0$ minutos de arco de lado. . . . .	121
3.60	Regiões H II G333.6-0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). . . . .	121
3.61	Imagens coloridas de G336.5-1.5 (RCW108). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, o tamanho é $\approx 3,0$ minutos de arco de lado. . . . .	122
3.62	Região H II G336.5-1.5 (RCW108). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Devido à intensa nebulosidade, somente algumas estrelas foram detectadas nesta região. . . . .	122

3.63	Imagens coloridas de G336.8-0.0. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 1,8$ minutos de arco de lado. . . . .	123
3.64	Região H II G336.8-0.0. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O tamanho projetado do aglomerado é pequeno e o campo bastante cerrado, além da nebulosidade, isto dificultou a detecção de membros do aglomerado. . . . .	123
3.65	Imagens coloridas de G348.7-1.0 (RCW122). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 1,8$ minutos de arco de lado. . . . .	124
3.66	Região H II G348.7-1.0 (RCW122). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A maior parte das estrelas deste campo é composta de objetos em primeiro plano, além disso, não foi detectado um aglomerado estelar bem definido. Na imagem do Spitzer, é possível ver algumas estrelas altamente obscurecidas que estão atrás da nuvem escura.	124
3.67	Imagens coloridas de G351.2+0.7. Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de $\approx 5,0$ minutos de arco de lado. . . . .	125
3.68	Região H II G351.2+0.7. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). . . . .	125
3.69	Imagens coloridas de G353.2+0.6 (RCW131). Esquerda: Imagem colorida $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é $\approx 4,0$ minutos de arco de lado. . . . .	126
3.70	Região H II G353.2+0.6 (RCW131). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Ambos diagramas indicam, no mínimo, três grupos de objetos. O primeiro é um grupo de objetos quase não afetado por avermelhamento interestelar. O segundo grupo está em $H - K_s \approx 0,75$ mag. E o último situa-se em $H - K_s \approx 1,5$ mag. . . . .	126
4.1	Distribuição dos objetos da amostra de Russeil (2003) no plano da Via Láctea. . . . .	133

4.2	Razão entre extinções para diferentes alvos em função do comprimento de onda. . . . .	137
4.3	Projeção no plano Galáctico das regiões H II estudadas neste capítulo. Na parte superior esquerda (4.3-a) está a distribuição das regiões H II gigantes de Conti e Crowther (2004). A distribuição das distâncias determinadas via paralaxe trigonométrica está no painel superior direito (4.3-b). No painel inferior estão as distribuições de distâncias determinadas via paralaxe espectrofotométrica, à esquerda usando lei de extinção de Mathis (1990) e no painel inferior direito utilizando a lei de Stead e Hoare (2009). . . . .	145
4.4	Nos dois histogramas acima, estão comparadas as distâncias espectrofotométricas com as distâncias cinemáticas. O histograma da esquerda é para os resultados utilizando a lei de Mathis (1990), e o da direita para a lei de Stead e Hoare (2009). A razão $d_{espec.}/d_{cin.}$ , para as duas leis de extinção, foi separada em intervalos (bins) de 0,20. O histograma abaixo mostra a razão $d_{\pi}/d_{cin.}$ . Note que o número de objetos, nas três situações, é bem maior para razões menores que 1,0. . . . .	146
4.5	Utilizando $M_B = -20,1$ (de Vaucouleurs e Pence, 1978, linha verde vertical), e tomando a média dos fluxos no contínuo de Lyman das três regiões H II mais brilhantes da Galáxia, percebemos que a classificação morfológica da Via Láctea continua sendo <i>Sbc-Sc</i> . A linha pontilhada inclinada representa o ajuste linear para galáxias <i>Sc</i> (Kennicutt Jr, 1988). . . . .	152



# Lista de Tabelas

2.1	Instrumentos utilizados na amostra completa deste trabalho. . . . .	43
3.1	Regiões H II estudadas neste trabalho. Suas coordenadas galácticas estão nas colunas 1 e 2. Seus nomes estão na coluna 3. Suas distâncias cinemáticas estão apresentadas na coluna 4. Seus fluxos no contínuo de Lyman estão na coluna 5, onde nota-se que a maioria destas regiões é gigante, $N_{LyC} > 10^{50}$ fótons $s^{-1}$ , as respectivas referências estão na coluna 6. A resolução espacial para cada região (banda $K_s$ ) está na coluna 7. Na coluna 8 está exibido o estágio evolutivo de cada região. Na coluna 9 está indicado se a região está a uma distância mais Próxima (P), mais Longínqua (L), Concorda (C) com a respectiva distância cinemática ou se essa informação é Desconhecida (D). Veja a seção 3.2 para maiores detalhes. . . . .	54
3.2	Continuação da Tabela 3.1. . . . .	55
4.1	Regiões com distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica. Nas colunas 1 e 2 estão as coordenadas galácticas. Na coluna 3 estão os nomes das regiões. Na coluna 4 estão as distâncias cinemáticas. Na coluna 5 estão as distâncias por paralaxe trigonométrica. Na coluna 6 estão as referências. . .	135

4.2	Regiões utilizadas para obter distâncias via paralaxe espectrofotométrica. A coluna 1 mostra o nome de cada região H II, a coluna 2 está o nome de cada estrela ionizante, na coluna 3 estão listados seus respectivos tipos espectrais, as colunas 4 e 5 exibem as magnitudes absolutas $M_V$ e cores intrínsecas $(V - K)_0$ (Vacca et al., 1996; Koornneef, 1983, respectivamente) baseadas nos tipos espectrais, na coluna 6 está a magnitude aparente na banda $K$ e na coluna 7 a cor $(J - K)$ de cada objeto. . . . .	139
4.3	Continuação da Tabela 4.2. . . . .	140
4.4	Continuação das Tabelas 4.2 e 4.3. . . . .	141
4.5	Distâncias espectrofotométricas. Nas colunas 1 e 2 estão as coordenadas galácticas. Na coluna 3 estão os nomes das regiões H II. A coluna 4 exibe o número de estrelas utilizadas. Na coluna 5 estão as distâncias cinemáticas. A coluna 6 exibe o fluxo no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ), e nas colunas 7 e 8 estão as distâncias espectrofotométricas extremas. . . . .	143
4.6	Continuação da Tabela 4.5. . . . .	144
4.7	Três regiões H II mais brilhantes da Via Láctea. . . . .	151
A.1	Candidatos a MYSOs identificados neste trabalho. Foram utilizados diagramas cor-cor e cormagnitude, além de imagens coloridas no infravermelho próximo ( $J$ , $H$ , e $K_s$ ) e imagens do Spitzer. Na coluna 1 estão os nomes das regiões H II onde houve detecção de candidatos a MYSOs. Na coluna 2 estão as identificações de cada objeto. Nas colunas 3 e 4 estão as coordenadas dos objetos. Na coluna 5 estão as magnitudes na banda $K_s$ e na coluna 6 estão as cores $H - K_s$ . . . . .	172
A.2	Continuação da Tabela A.1. . . . .	173
A.3	Continuação das Tabelas A.1 e A.2. . . . .	174

# Sumário

1. Introdução . . . . .	31
1.1 Os Sítios de Formação Estelar . . . . .	31
1.1.1 As Primeiras Fases (Núcleo Pré-estelar e “Hot Core”) . . . . .	32
1.1.2 A Fase de Região H II Hiper e Ultracompacta . . . . .	33
1.2 Regiões H II Gigantes (RH II G) . . . . .	34
1.3 A Estrutura Espiral da Galáxia . . . . .	35
2. Metodologia . . . . .	41
2.1 Os Detectores e o Sistema de Filtros Utilizados . . . . .	41
2.2 Observando no IV - Redução de Dados . . . . .	42
2.3 Fotometria . . . . .	44
2.4 Leis de Extinção . . . . .	45
2.5 Fluxo no Contínuo de Lyman . . . . .	50
3. Catálogo de Regiões H II Gigantes Galácticas . . . . .	53
3.1 Seleção dos Alvos . . . . .	53
3.2 Estrutura do Catálogo . . . . .	53
3.3 Dados do Infravermelho (Próximo e Médio) . . . . .	58
3.4 Análise das Regiões . . . . .	59
3.4.1 G5.97-1.18 (M8) . . . . .	59
3.4.2 G10.2-0.3 (W31 - Sul) . . . . .	60
3.4.3 G10.3-0.1 (W31 - Norte) . . . . .	62
3.4.4 G12.8-0.2 (W33) . . . . .	63

3.4.5	<b>G15.0-0.7 (M17)</b>	64
3.4.6	<b>G22.7-0.4</b>	64
3.4.7	<b>G25.4-0.2 (W42)</b>	65
3.4.8	<b>G30.8-0.2 (W43)</b>	66
3.4.9	<b>G45.5+0.1 (K47)</b>	67
3.4.10	<b>G48.9-0.3</b>	68
3.4.11	<b>G49.5-0.4 (W51A)</b>	69
3.4.12	<b>G133.7+1.2 (W3)</b>	70
3.4.13	<b>G274.0-1.1 (RCW42)</b>	71
3.4.14	<b>G282.0-1.2 (RCW46)</b>	72
3.4.15	<b>G284.3-0.3 (NGC3247)</b>	73
3.4.16	<b>G287.4-0.6 (NGC3372)</b>	74
3.4.17	<b>G291.6-0.5 (NGC3603)</b>	75
3.4.18	<b>G298.2-0.3</b>	76
3.4.19	<b>G298.9-0.4</b>	76
3.4.20	<b>G305.2+0.0</b>	77
3.4.21	<b>G305.2+0.2</b>	78
3.4.22	<b>G308.7+0.6</b>	79
3.4.23	<b>G320.1+0.8 (RCW87)</b>	80
3.4.24	<b>G320.3-0.2</b>	80
3.4.25	<b>G322.2+0.6 (RCW92)</b>	81
3.4.26	<b>G327.3-0.5 (RCW97)</b>	82
3.4.27	<b>G331.5-0.1</b>	83
3.4.28	<b>G333.1-0.4</b>	84
3.4.29	<b>G333.3-0.4</b>	84
3.4.30	<b>G333.6-0.2</b>	85
3.4.31	<b>G336.5-1.5 (RCW108)</b>	86
3.4.32	<b>G336.8-0.0</b>	87
3.4.33	<b>G348.7-1.0 (RCW122)</b>	87
3.4.34	<b>G351.2+0.7</b>	88
3.4.35	<b>G353.2+0.6 (RCW131)</b>	89

3.5	Imagens e Diagramas C-C e C-M . . . . .	90
3.6	Discussão . . . . .	127
4.	Distâncias Espectrofotométricas na Banda K . . . . .	129
4.1	Amostra das Regiões com Distâncias Espectrofotométricas . . . . .	131
4.2	Modelos Cinemáticos . . . . .	131
4.3	Paralaxe Trigonométrica . . . . .	133
4.4	Paralaxe Espectrofotométrica na Banda $K$ . . . . .	134
4.5	Discrepâncias entre o Método Espectrofotométrico e o Método Cinemático . . . . .	138
4.6	Taxa de Formação Estelar e Tipo Morfológico da Via Láctea . . . . .	147
4.7	Discussão . . . . .	152
5.	Conclusões . . . . .	155
	<i>Referências</i> . . . . .	159
	<i>Apêndice</i> . . . . .	169
A.	Objetos Jovens e de Alta Massa . . . . .	171
A.1	. . . . .	171



## Introdução

A Via Láctea é um ambiente privilegiado para o estudo de estrelas jovens de alta massa (tipos espectrais O e B), pois podemos vê-las em detalhes e estudar sua interação com o gás e a poeira. O reduzido número de objetos deste tipo conhecido na Galáxia se deve ao alto obscurecimento na faixa do visível das regiões de formação. Assim, os catálogos atuais não são minimamente completos, já que se restringem à esta faixa de comprimentos de onda. Como a extinção decresce com o comprimento de onda ( $A_K \approx 0,1 A_V$ ), estrelas que não são detectadas na faixa do visível podem ser detectadas, com certa facilidade, na banda  $K$  ( $2,2 \mu\text{m}$ ). A principal vantagem do infravermelho próximo é que este comprimento de onda é longo o suficiente para diminuir os efeitos da extinção interestelar quando comparado com a faixa do visível e, ao mesmo tempo, curto o suficiente para exibir linhas espectrais fotosféricas. Assim, este comprimento de onda é ideal para explorar berçários estelares, identificar e resolver a natureza de suas estrelas de alta massa ainda ligadas a seus sítios de formação.

### 1.1 Os Sítios de Formação Estelar

Estrelas de alta massa não estão distribuídas aleatoriamente na Via Láctea. Elas são encontradas próximas ao plano da Galáxia, nas vizinhanças, ou no interior, de nuvens de gás molecular relativamente densas. Estes locais onde elas se formam são conhecidos como nuvens moleculares gigantes (NMGs), com tamanhos que variam desde  $\sim 1$  pc até  $\sim 100$  pc. Suas massas podem atingir valores da ordem de  $10^6 M_\odot$  (Hartmann, 1998). Estimativas observacionais sugerem que o número de nuvens moleculares com uma dada massa  $M_c$  pode ser dado por  $N_c(M_c) \propto M_c^{-1,5}$  (Blitz, 1991). Para que ocorra formação

estelar em uma destas nuvens, é necessário que a gravidade sobrepuje forças de resistência como as oferecidas pela pressão térmica do gás e movimentos turbulentos. Não é surpresa que as estrelas se formem em núcleos frios e densos encontrados em aglomerações locais de matéria (Blitz, 1991). Para que haja formação estelar, a massa de uma aglomeração local (dentro de nuvens moleculares) tem que ser superior a  $\sim 300 - 500 M_{\odot}$ . Tipicamente estas nuvens podem atingir até  $10^3$  ou até mesmo  $10^4 M_{\odot}$  (Blitz, 1991). Os núcleos (“cores”), que são subestruturas das aglomerações locais, são menores e com menos massa, porém são mais densos. E é nestes núcleos, com massa de algumas dezenas de massas solares, que uma estrela se forma. McKee e Tan (2003) mostraram que os movimentos turbulentos observados nos núcleos, junto ao fato de serem locais densos, permitem a formação de uma estrela de alta massa em um tempo da ordem de  $10^5$  anos.

### 1.1.1 As Primeiras Fases (Núcleo Pré-estelar e “Hot Core”)

O estágio evolutivo mais jovem em que se pode identificar uma estrela de alta massa em formação é o de núcleo pré-estelar. É importante salientar que a estrela ainda não está formada nesta fase, e a detecção deste núcleo só se dá em grandes comprimentos de onda, em particular no submilimétrico (emissão em  $\lambda > 150 \mu\text{m}$ ; Ward-Thompson e André, 1998). Estes núcleos pré-estelares são estruturas densas e gravitacionalmente ligadas da nuvem molecular e que estão em processo de colapso gravitacional quase estático. Eles são objetos relativamente raros por terem escalas de tempo menor que  $10^6$  anos (Ward-Thompson et al., 1994; Fuller e Myers, 1987). Assim, estes objetos são, possivelmente, a fase evolutiva de formação de uma estrela de alta massa que se tem menos informações (Garay e Lizano, 1999).

Após a fase de núcleo pré-estelar, vem a fase denominada de “Hot Core” (núcleo quente). Estes objetos foram definidos por Kurtz et al. (2000) como sendo compactos (diâmetros  $< 0,1 \text{ pc}$ ), densos ( $n_e > 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) e com temperatura “morna” ( $T > 100 \text{ K}$ ). A presença de alguma estrela de alta massa (ou de várias estrelas) só pode ser indicada pela temperatura da nuvem. Como esta definição é demasiadamente abrangente para um objeto com temperaturas desta ordem e embebido em uma nuvem molecular, Churchwell (2002) rebatizou esta classe de objetos de “precursor de região H II Ultracompacta”. Ele considerou que estão nesta fase, e portanto não ainda na fase Ultracompacta, os “Hot

Cores” que contenham protoestrelas de alta massa com intenso processo de acreção de matéria. Tipicamente, esta fase não dura mais que  $10^5$  anos.

### 1.1.2 A Fase de Região H II Hiper e Ultracompacta

Existe ainda uma fase intermediária entre os “Hot Cores” e as regiões H II Ultracompactas. Trata-se da fase denominada de região H II Hipercompacta. Estes objetos são muito pouco estudados, mas representariam um estágio onde a estrela estaria finalizando o processo de acreção de massa e iniciando a ionização do gás ao seu redor. São, tipicamente, 10 vezes menores e 100 vezes mais densas que as regiões H II Ultracompactas (Churchwell, 2002). Estas regiões Hipercompactas apresentam diâmetros da ordem de 0,003 pc e densidades da ordem de  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  (Kurtz e Franco, 2002). Uma vez que a maior parte das regiões H II Hipercompactas conhecidas estão em complexos de formação de estrelas de alta massa, Churchwell (2002) sugere que esta fase pode indicar que estes objetos são protoestrelas de alta massa no final de sua intensa acreção de matéria.

As regiões H II Ultracompactas são um dos melhores indicadores de recente formação de estrelas de alta massa e abrigam os MYSOs (do inglês, Massive Young Stellar Objects) de alta massa que apenas começaram a ionizar sua nuvem molecular natal. Thompson et al. (2006) definiram estas regiões como sendo bolhas de gás ionizado densas e compactas e que circundam objetos jovens e de alta massa (HMYSOs, High Mass Young Stellar Objects). Suas idades são estimadas em  $10^4 - 10^5$  anos, determinadas a partir de seus diâmetros e de uma taxa de expansão típica para uma região H II e têm densidades de  $n_e > 10^5 \text{ cm}^{-3}$  (Churchwell, 2002). Seus diâmetros são  $\sim 1$  pc (Kurtz et al., 2000). Devido à sua curta vida e por estarem embebidas nas nuvens moleculares, poucas regiões H II Ultracompactas foram mapeadas em resolução angular suficiente para investigar suas densas nuvens circundantes, dificultando a compreensão de suas localizações dentro destas nuvens, as propriedades físicas dos “cores”, bem como a vizinhança onde também ocorre formação estelar (Thompson et al., 2006). Nesta fase, o conteúdo estelar ainda não é detectado, mas já se detectam linhas nebulares sensíveis ao objeto central, pois, nesta fase de evolução (regiões H II Ultracompactas), os “cores” de alta massa já começam a queimar o hidrogênio.

Como as estrelas de alta massa entram na sequência principal ainda acretando matéria,

elas passam toda a fase pré-sequência principal ainda invisíveis, sem fornecer acesso direto à sua fotosfera. De fato, quando o aglomerado estelar dissipa o gás e poeira à sua volta por meio de seus ventos intensos, as estrelas de alta massa já estão razoavelmente evoluídas, e já podem ter percorrido 30% de suas trajetórias evolutivas (Garmany et al., 1982; Wood e Churchwell, 1989). Assim, o estudo dessas fases iniciais das regiões de formação estelar é fundamental para um entendimento do mecanismo de formação de estrelas de alta massa.

Antes do término do processo de acreção de matéria, a estrela de alta massa começa a destruir o casulo de gás e poeira onde está embebida. A ação dos ventos expande a região UCH II e ela se torna uma região H II compacta diminuindo a densidade do material circum-estelar e a estrela de alta massa passa a ser observada em comprimentos de onda cada vez menores. Em alguns casos, o disco de acreção remanescente ainda pode ser detectado, mas a intensa radiação UV acaba por dissipá-lo por fotoionização. Finalmente, a região H II compacta se expande até se tornar uma região H II normal, como M42 em Órion, ou M17 em Sagitário. Um estudo completo da formação e evolução de estrelas de alta massa, bem como de sua interação com seu meio circundante, passa pela compreensão de cada um dos estágios da sequência: (i) núcleo pré-estelar, (ii) “Hot Core”, (iii) região Hipercompacta, (iv) região Ultracompacta e (v) região H II.

## 1.2 Regiões H II Gigantes (RH II G)

As regiões H II gigantes, com  $N_{LyC} > 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$  (Kennicutt Jr, R. comunicação privada) são locais com alta concentração de estrelas de alta massa, somando de milhares a milhões de massas solares. O principal interesse em estudar estas regiões está no fato de que, além de poder caracterizar seu conteúdo estelar, elas são boas traçadoras dos braços espirais da Galáxia. A abordagem usada até agora para determinar a posição Galactocêntrica das fontes conhecidas consiste em combinar a velocidade radial e as coordenadas galácticas com um modelo de rotação. Os resultados, como de Georgelin e Georgelin (1976) não permitem visualizar com facilidade uma estrutura espiral e, além disso, a metade mais distante da Via Láctea fica praticamente desprovida de regiões H II. Se, por um lado, a extinção interestelar é desprezível na faixa rádio, por outro, o modelo de rotação gera, para a região interna ao círculo da órbita solar, um par de soluções, uma distância próxima e outra longínqua. Refinamentos nas medidas cinemáticas, levando em

conta linhas de absorção na faixa rádio não geraram um padrão muito mais organizado de braços espirais. Robert Blum e colaboradores (Blum et al., 1999, 2000, 2001) estão conduzindo um projeto de medida de distância de estrelas de tipos espectrais O e B que excitam regiões H II gigantes da Galáxia através de paralaxe espectrofotométrica na banda  $K$ . Os resultados indicam que as distâncias cinemáticas são sistematicamente maiores que as obtidas por esse método de até um fator 2, como será exibido no Capítulo 4 desta tese.

A maior parte das regiões de formação estelar estudadas neste trabalho são gigantes. Estas, apresentam uma luminosidade maior que  $10^{50}$  fótons  $s^{-1}$  no contínuo de Lyman. Este fluxo corresponde a uma estrela O3V ou dez estrelas O7V (Vacca et al., 1996). As regiões H II gigantes são objetos bem conhecidos em outras galáxias, ao contrário do que ocorre na Via Láctea. A razão para este fato é que quase todas estas regiões gigantes na Galáxia são tão obscurecidas que são detectáveis apenas nos comprimentos de onda do rádio e no infravermelho. Assim, grande parte do nosso conhecimento acerca destes objetos vem de exemplos de outras galáxias. O principal interesse em estudar estas regiões está no fato de que, além de poder caracterizar o conteúdo estelar destas regiões, elas delineiam com precisão os braços espirais da Galáxia, como pode ser visto na Figura 1.1. Como as regiões de formação estelar estão associadas com regiões H II, a emissão de  $H\alpha$  é um bom indicador de complexos de formação de estrelas e, portanto, da estrutura espiral das galáxias externas.

Os braços espirais da nossa Galáxia estão distribuídos ao longo da linha de visada, implicando em uma superposição de complexos de formação estelar que torna difícil distinguir estes braços. Para estudar a estrutura da nossa Galáxia em grande escala é necessário identificar e catalogar complexos de formação de estrelas (nuvens moleculares, regiões H II e estrelas OB) e então determinar suas distâncias e conseqüentemente sua distribuição espacial.

### 1.3 A Estrutura Espiral da Galáxia

Na Figura 1.1, aparecem duas galáxias espirais. Na parte superior está M51, uma galáxia espiral vista de “topo”. Na parte inferior está a Via Láctea, vista de perfil por um observador dentro de seu disco. Uma forma de se mapear a estrutura em espiral da Via Láctea é por meio do estudo da distribuição do gás no disco Galáctico. Isto porque o



*Figura 1.1:* Imagem superior: Vista de “topo” de uma galáxia espiral (M51). Os objetos vermelhos são regiões de formação estelar, em particular, as regiões H II gigantes. Imagem inferior: A Via Láctea como é vista da Terra. Ela é uma galáxia espiral vista de perfil.

disco da nossa galáxia contém, além de estrelas, a matéria interestelar formada por gás e poeira, dos quais as estrelas se formam. A constituição deste gás interestelar é, na maior parte, hidrogênio neutro. Esse gás de hidrogênio encontra-se ionizado quando estiver nas proximidades de estrelas mais quentes e luminosas (que emitem radiação ultravioleta). Este gás ionizado é importante no mapeamento dos braços espirais porque é visível como uma nebulosa de emissão, ou seja, trata-se de uma Região H II.

Na verdade, as galáxias espirais e irregulares mais próximas e que já foram estudadas têm várias regiões H II em seus discos. Estas regiões de formação estelar também existem em galáxias *S0*, mas em menor quantidade do que em galáxias espirais *Sb*, *Sc* ou *Sd*. As galáxias elípticas já não apresentam regiões H II como características morfológicas, como ocorre com as espirais.

Shu et al. (1972) mostraram que as regiões de formação estelar estão concentradas, principalmente, nos braços espirais devido às ondas de choque. São estas ondas de choque também originam os braços espirais. Além disso, Lin e Shu (1964) mostraram que o padrão espiral deve girar como um corpo rígido, enquanto que o gás e as estrelas apresentam uma rotação diferencial. Sendo assim, uma vez disparada a formação estelar nos braços espirais, as estrelas não tendem a seguir este padrão rígido de rotação e se desprendem do gás. Daí a importância em se utilizar mapeadores da estrutura espiral para localizar esta distribuição do gás. Observações de outras galáxias espirais vista de “topo” indicavam que alguns objetos podem ser utilizados como mapeadores desta estrutura espiral. Em geral, existem dois tipos básicos de mapeadores: as regiões H II, ionizadas por estrelas de tipo espectral O e B, e o hidrogênio neutro (H I) mapeado pela linha de 21 cm.

Para se observar esta componente gasosa do disco Galáctico, tanto a neutra quanto a ionizada, a faixa espectral mais utilizada é a de comprimentos de onda em rádio. A vantagem em se utilizar observações na faixa rádio é que devido aos grandes comprimentos de onda em questão, elas não estão limitadas pela extinção interestelar. Isto permite uma observação, ou mapeamento, da Via Láctea inteira. Em particular, a linha de 21 cm fornece a densidade de coluna do hidrogênio neutro ao longo da linha de visada como uma função da velocidade radial.

A maior dificuldade em se obter uma expressão que forneça uma distância galactocêntrica a um dado objeto, ao se fornecer sua velocidade radial e direção relativa ao

centro Galáctico, é devido a existência de componentes de origem não circular na velocidade radial medida. Desta forma, é necessário que uma curva (ou modelo) de rotação para a Galáxia seja a que represente com maior precisão possível a forma de como a estrutura espiral da Galáxia gira em torno de seu próprio centro. Isto é crucial para uma boa determinação de distâncias cinemáticas.

Há várias curvas de rotação Galáctica disponíveis na literatura. Clemens (1985, veja Figura 1.2) apresentou uma das curvas de rotação da Via Láctea mais conhecidas e utilizadas atualmente. Esta curva, para a parte norte da nossa galáxia, foi obtida através da combinação de vários estudos de velocidade radial medida através da emissão em *CO* e *HI*.

A determinação das velocidades radiais é bastante acurada, em geral mais precisa que  $1 \text{ km s}^{-1}$ . Porém, a velocidade medida têm movimentos peculiares e de origem não rotacional, que são: (i) colisões entre nuvens moleculares que fornecem momento angular e linear extras e que se somam à rotação Galáctica; (ii) quando há, pelo menos, uma estrela ionizante (tipos espectrais O e B) o gás é aquecido e nos locais de mais baixa densidade, o gás pode produzir uma abertura de modo a fluir livremente para fora da nuvem molecular (“champagne flows”) e (iii) a atração gravitacional pela onda de densidade que perturba o poço de potencial geral. Segundo Brand e Blitz (1993), estes efeitos não circulares geram fluxos em direções aleatórias com velocidades típicas de  $10 \text{ km s}^{-1}$ .

Além do problema com a incerteza a respeito da componente puramente radial da velocidade de rotação em torno do centro da Galáxia, esta metodologia cinemática apresenta uma ambiguidade para as velocidades radiais nas direções da parte interna ao círculo Solar (Figura 1.2). Estes modelos de rotação fornecem uma distância mais próxima ao observador e outra distância para o outro lado da Galáxia. Mais ainda, quando o objeto em estudo está muito próximo à direção do centro Galáctico, os modelos são degenerados, pois a velocidade radial é por definição zero para todas as distâncias em  $l = 0$ .

Georgelin e Georgelin (1976) realizaram um mapeamento dos braços espirais da Via Láctea através de uma compilação de resultados nas faixas óptica e rádio. E deduziram que a Via Láctea é constituída de um padrão em espiral composto por quatro braços e que o tipo morfológico da Via Láctea seria muito mais semelhante ao de galáxias do tipo *Sc* do que ao tipo *Sb*.

Após o trabalho de Georgelin e Georgelin (1976), vários outros vieram com o intuito de



mapear a estrutura em espiral da Via Láctea. Mais recentemente, Russeil (2003) atualizou os catálogos de observação rádio e os novos parâmetros para a estrutura espiral confirmaram o modelo de quatro braços de Georgelin e Georgelin (1976), com a diferença de que, com um maior número de objetos e menores incertezas nas distâncias, foi possível delinear melhor os braços e duplicar a extensão dos mesmos. O modelo de rotação utilizado por Russeil (2003) foi bastante similar ao de Brand e Blitz (1993), com apenas algumas pequenas variações nos valores de algumas constantes da expressão da curva de rotação, mas a função obtida por ela foi basicamente a mesma de Brand e Blitz (1993).

Outra metodologia utilizada para determinar distâncias é a chamada paralaxe espectroscópica ou paralaxe espectrofotométrica. Ela tem sido utilizada há 100 anos na faixa visível, agora com os avanços de novas tecnologias nestas últimas décadas ela pôde ser estendida para o infravermelho próximo. Nesta faixa, objetos mais distantes podem ter suas distâncias obtidas uma vez que a extinção interestelar é menor que no visível (por um fator de 10). A incerteza deste método é aproximadamente 30% em distância para uma única estrela de tipo espectral O. Este erro tem como fonte principal o espalhamento na calibração das magnitudes visuais absolutas ( $M_V$ ), que é de 0,65 magnitudes. Mas também pode haver alguma companheira não resolvida e uma terceira fonte de erro é a imprecisão no tipo espectral e na classe de luminosidade. Entretanto, esta incerteza pode ser diminuída ao se determinar a distância de várias estrelas para uma mesma região de formação estelar, pois o erro na determinação da distância diminui com a raiz quadrada do número de estrelas para as quais a paralaxe espectroscópica é determinada.

Smith et al. (1978) realizaram um levantamento bastante completo das regiões H II gigantes da Galáxia com o intuito principal de estudar a taxa de formação estelar, uma vez que ela, junto com a luminosidade em  $H\alpha$ , são indicativas do tipo morfológico da Galáxia. Conti e Crowther (2004) atualizaram o catálogo de Smith et al. (1978) baseando-se no mapeamento do céu feito em 6 cm por Kuchar e Clark (1997), utilizando as distâncias cinemáticas mais recentes obtidas por Russeil (2003). Como dessas regiões de Conti e Crowther (2004), apenas 15% podem ser observadas na faixa visível, foi realizado um estudo fotométrico no infravermelho próximo em alguns destes objetos junto com objetos do catálogo de Dutra et al. (2003).

## Metodologia

O foco principal deste capítulo é a metodologia utilizada para o estudo do conteúdo estelar de regiões H II gigantes e a determinação de suas distâncias através da paralaxe espectroscópica de estrelas do tipo OB jovens. Escolhidos os alvos (regiões H II) propícios para hospedar estrelas de tipos espectrais O e B, o próximo passo é a escolha de detector, telescópio, conjunto de filtros, etc. Além disso, para uma análise homogênea dos resultados provenientes de diferentes sistemas fotométricos, é necessário padronizar as medidas.

Uma estimativa inicial de parâmetros estelares como temperatura e presença de certas características espectrais, podem ser obtidas da fotometria utilizando diagramas cor-cor e cor-magnitude. Quando a fotometria é realizada em imagens obtidas através de diferentes filtros, diferentes regiões do espectro eletromagnético desse objeto são isoladas, exigindo o conhecimento do perfil de transmissão dos filtros utilizados, bem como a eficiência com que o detector responde a eles. O advento da fotometria no final do século XIX revolucionou a Astronomia, assim como ocorreu com os fotocátodos na década de 50, os CCDs<sup>1</sup> nos últimos 25 anos e finalmente os detectores de grande área que operam no infravermelho nos últimos 10 anos.

### 2.1 Os Detectores e o Sistema de Filtros Utilizados

As regiões H II gigantes apresentadas nesta tese foram imageadas nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ . Os instrumentos utilizados foram o OSIRIS, CIRIM e ISPI montados no telescópio de 4-m Victor M. Blanco, localizado no Cerro Tololo Interamerican Observatory (CTIO).

O OSIRIS (Ohio State Infrared Imager/Spectrometer) é um instrumento construído

---

<sup>1</sup> Charged Coupled Device

pela Ohio State University e que usa um detector do tipo HAWAII, feito de HgCdTe, com  $1024 \times 1024$  pixels de  $18,5 \mu\text{m}$  e sensível aos comprimentos de onda entre  $0,8$  e  $2,4 \mu\text{m}$ . Usado como espectrógrafo, possibilita três configurações diferentes: baixa resolução ( $R \sim 1200$ ), média resolução espectral ( $R \sim 3000$ ) e baixa resolução em dispersão cruzada ( $R \sim 1200$ ). Quando acoplado ao telescópio Blanco, OSIRIS permite dois valores para a razão focal, que provê duas escalas de placa diferentes,  $f/2,8$  e  $f/7$ . O primeiro com baixa resolução espacial ( $0,403''/\text{pixel}$ ) e Campo de Visão (FOV) de  $233''$ ; e o segundo com alta resolução espacial ( $0,161''/\text{pixel}$ ) e um Campo de Visão de  $93''$ . Nessa tese, esse instrumento foi utilizado somente no modo de alta resolução ( $f/7$ ), tanto para o imageamento das regiões H II, quanto para espectroscopia de estrelas do tipo OB. O instrumento OSIRIS, quando montado no telescópio Blanco, permitia a utilização do sistema tip-tilt para melhorar a qualidade das imagens.

O CIRIM (Cerro Tololo Infrared Imager) usa uma matriz NICMOSIII de  $256 \times 256$  pixels de HgCdTe, que assim como o HAWAII, foi desenvolvido pelo Rockwell Science Center. Embora possa ser operado tanto nos focos  $f/14$  e  $f/8$ , dos telescópios de 4-m e 1,5-m do CTIO respectivamente, os dados para esta tese foram tomados com o instrumento acoplado ao telescópio de 1,5-m com a razão focal de  $f/8$ , resultando em uma escala de placa de  $1,16''$  e  $\text{FOV} = 297''$ .

Outro imageador utilizado foi o instrumento ISPI montado também no telescópio Blanco. O ISPI usa dois detectores do tipo HAWAII de HgCdTe, somando um total de  $2048 \times 2048$  pixels, e operando nos comprimentos de onda entre  $1,0$  e  $2,4 \mu\text{m}$ . O ISPI no modo de média resolução espacial (razão focal  $f/8$ ), produz pixels de  $0,3''$  em um campo de  $10,25 \times 10,25$  minutos de arco.

## 2.2 Observando no IV - Redução de Dados

A atmosfera absorve radiação infravermelha devido à presença, principalmente, das moléculas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{OH}$ . Moléculas de  $\text{OH}$ , quando excitadas por fótons UV provenientes do Sol, emitem radiação na faixa do infravermelho. Essa contribuição não térmica domina a emissão de fundo no intervalo entre  $1$  e  $2,5 \mu\text{m}$  e é eliminada por meio de subtração de céu criado através de observações de um campo de referência, com poucas estrelas e sem nebulosidade. Para cancelar os efeitos de píxeis ruins, foi utilizada a técnica de *pon-*

Tabela 2.1 - Instrumentos utilizados na amostra completa deste trabalho.

Descrição/Instrumentos	OSIRIS	CIRIM	ISPI
Tipo	HgCdTe	HgCdTe	HgCdTe
Ganho ( $e^-$ /ADU)	3,00	9,00	4,25
Ruído de Leitura ( $e^-$ )	15	40	15
Campo de Visão (")	93	297	616
Número de Pixels	1024 × 1024	256 × 256	2048 × 2048
Escala de Placa ("/pixel)	0,161	1,16	0,3

*tilhamento*, também conhecida como “dithering”. Esta técnica consiste em tomar algumas imagens do mesmo campo, mas ligeiramente deslocadas em cada uma das exposições.

As exposições de lâmpada de flat-field são usadas para remover variações locais na sensibilidade entre os pixels do detector e devem ser feitas para cada filtro. Estes flat-fiels são construídos a partir da diferença entre imagens de flat-field com lâmpada acesa (flat-on) e lâmpada apagada (flat-off). Os flats de lâmpada acesa, por apresentarem altas contagens, evidenciam os píxeis mortos (escuros), enquanto que os flats de lâmpada apagada evidenciam os píxeis quentes. Eles também são úteis para a construção de um mapa de píxeis ruins. O ruído térmico (*dark*) é em geral de dois tipos: um aumento de carga em todo o detector, que se acumula durante o tempo de integração e pixels quentes individuais, cujo acúmulo de cargas se deve a defeitos de fabricação. Normalmente não é necessária a subtração do nível zero (*bias*) e ruído térmico, pois essas características são eliminadas na ocasião em que o céu é subtraído.

A redução de dados consiste na remoção de características instrumentais, na extração das magnitudes e na sua transformação para o sistema padrão. Foi utilizado o pacote de redução de dados no infravermelho CIRRED que roda em ambiente IRAF<sup>2</sup>. CIRRED foi desenvolvido pelo Dr. Robert Blum e está disponível nas páginas eletrônicas do CTIO. Esse pacote consiste de uma série de scripts IRAF e programas em linguagem FORTRAN para o tratamento básico das imagens. Através do CIRRED é possível corrigir os efeitos da não linearidade do detector, corrigir por flat-field e subtrair a contribuição do céu.

<sup>2</sup> IRAF é distribuído gratuitamente pelo National Optical Astronomy Observatories

## 2.3 Fotometria

Após as imagens (nas três bandas:  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ ) passarem pela fase de redução e colocação em registro (coincidência espacial das imagens), foi realizada a fotometria  $PSF^3$ , também conhecida como fotometria de perfil. Para isto, utilizou-se o pacote específico para fotometria chamado *Starfinder*. Uma descrição detalhada sobre os aspectos técnicos, algoritmos e procedimentos operacionais do pacote *Starfinder* podem ser encontrados em Diolaiti et al. (2000). O *Starfinder* utiliza um conjunto de programas em linguagem IDL (Interactive Data Language) em um ambiente de fácil interação. O *Starfinder* solicita a imagem de entrada, calcula o ruído da imagem, solicita algumas estrelas do campo que serão utilizadas como referência para moldar uma  $PSF$  típica, e cria uma imagem sintética do campo em estudo. Esta imagem sintética será a mais próximo possível do ideal (imagem de entrada) se a diferença entre a imagem de entrada e a imagem sintética recém-criada pelo *Starfinder* der apenas uma imagem com as flutuações devidas ao ruído de píxel a píxel. Isto é, somando o ruído com a imagem sintética tem-se de volta a imagem original 100% recuperada. Obviamente que na prática isso não ocorre, e um dos principais motivos para isso é que o campo sintético é construído em base a uma  $PSF$  média do campo original, e não da  $PSF$  individual de cada estrela do campo (matriz de  $PSF$ 's). Além disso, campos muito densos, onde a  $PSF$  de uma estrela se superpõe à de outra podem interferir no resultado final. Entretanto, este tipo de problema com fotometria  $PSF$  não é específico do *Starfinder*, ele é típico de qualquer software disponível para esta finalidade. A escolha do *Starfinder* foi baseada nos pequenos erros finais obtidos, e que dependem da magnitude do objeto (Diolaiti et al., 2000).

Na Figura 2.1, estão exibidas três imagens produzidas pelo *Starfinder*. A primeira representa a tela inicial com a imagem em que será realizada a fotometria, a segunda mostra a visualização de uma das estrelas de campo escolhida para moldagem da  $PSF$ -média da imagem e a terceira imagem mostra a tela do procedimento para estimativa do ruído fotônico.

Em cada região H II, os pontos-zero da fotometria foram determinados por meio de fotometria do catálogo 2MASS<sup>4</sup> de estrelas isoladas do campo. Isso foi executado para as

<sup>3</sup> Point Spread Function, distribuição espacial da luz de uma fonte pontual sobre o detector

<sup>4</sup> catálogo 2MASS - Second Incremental Release Point Source Catalog

três bandas ( $J$ ,  $H$  e  $K_s$ ). Desta forma, fixa-se a fotometria no sistema fotométrico 2MASS, que é um sistema bem conhecido e muito utilizado nesta área de estudo.

## 2.4 Leis de Extinção

Foram utilizados diagramas cor-cor e cor-magnitude (C-C e C-M, respectivamente, Fig. 2.2) para selecionar candidatos a fontes ionizantes de cada região H II. Algumas regiões estão profundamente embebidas em nebulosidade e o aglomerado não é sequer detectado. Em outras, a região H II não aparenta estar associada a uma densa aglomeração estelar, provavelmente sendo ionizada por um pequeno (e não detectado) grupo de estrelas. Mas na maior parte de nossa amostra de regiões H II é possível indicar a presença de candidatos a fontes ionizantes. Neste intervalo de comprimentos de onda (infravermelho próximo), utiliza-se o Atlas Espectral de Estrelas Quentes em  $2 \mu\text{m}$  (Hanson, Conti e Rieke, 1996) para identificar as estrelas de tipos espectrais O e B, e com isto determinar as distâncias espectrofotométricas às regiões H II hospedeiras.

No diagrama C-C (Fig. 2.2a), há várias linhas em preto e em azul, onde quatro estão contínuas e duas estão tracejadas. Cada cor representa uma inclinação do avermelhamento ( $E_{J-H}/E_{H-K_s}$ ) para diagramas cor-cor. As linhas da esquerda (preta e azul) são linhas de avermelhamento para estrelas de tipo espectral M, enquanto que as linhas da direita são para estrelas de tipo espectral O. As cores intrínsecas da estrela M foram obtidas de Frogel et al. (1978) e as cores intrínsecas de estrelas de tipo espectral O foram obtidas de Koornneef (1983). Estas cores intrínsecas foram corrigidas para o sistema fotométrico do 2MASS, utilizando as relações de Carpenter (2001).

Nos diagramas é comparado o efeito de duas leis de extinção interestelar diferentes. No diagrama C-C, as linhas pretas têm uma inclinação de Mathis (1990)

$$\frac{E_{J-H}}{E_{H-K_s}} = 1,83, \quad (2.1)$$

enquanto que as linhas azuis tem uma inclinação de Stead e Hoare (2009)

$$\frac{E_{J-H}}{E_{H-K_s}} = 2,07. \quad (2.2)$$

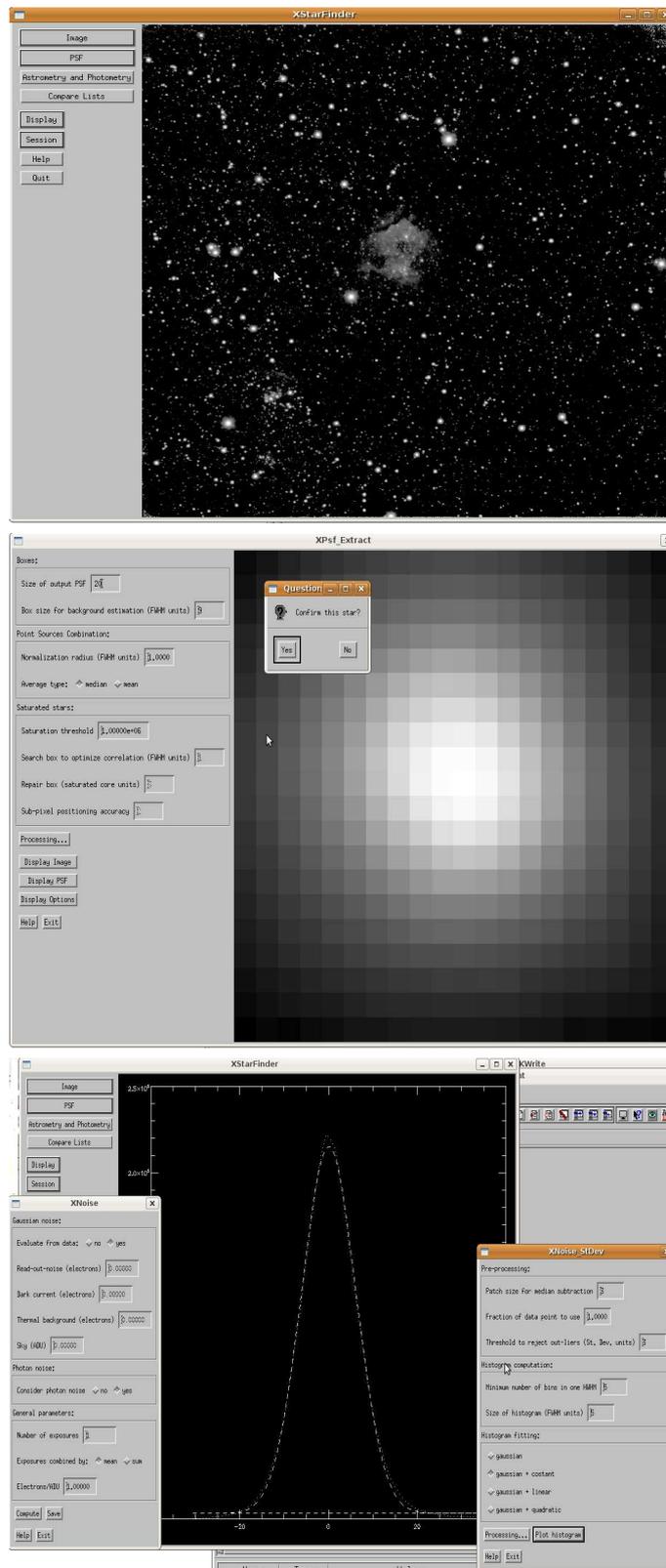


Figura 2.1: Ilustração da ferramenta *Starfinder* em IDL. Acima está a região onde será realizada a fotometria, no meio está exibida uma das estrelas de campo escolhida para construção de uma *PSF*-média, a terceira exibe a tela do procedimento para determinação do ruído fotônico.

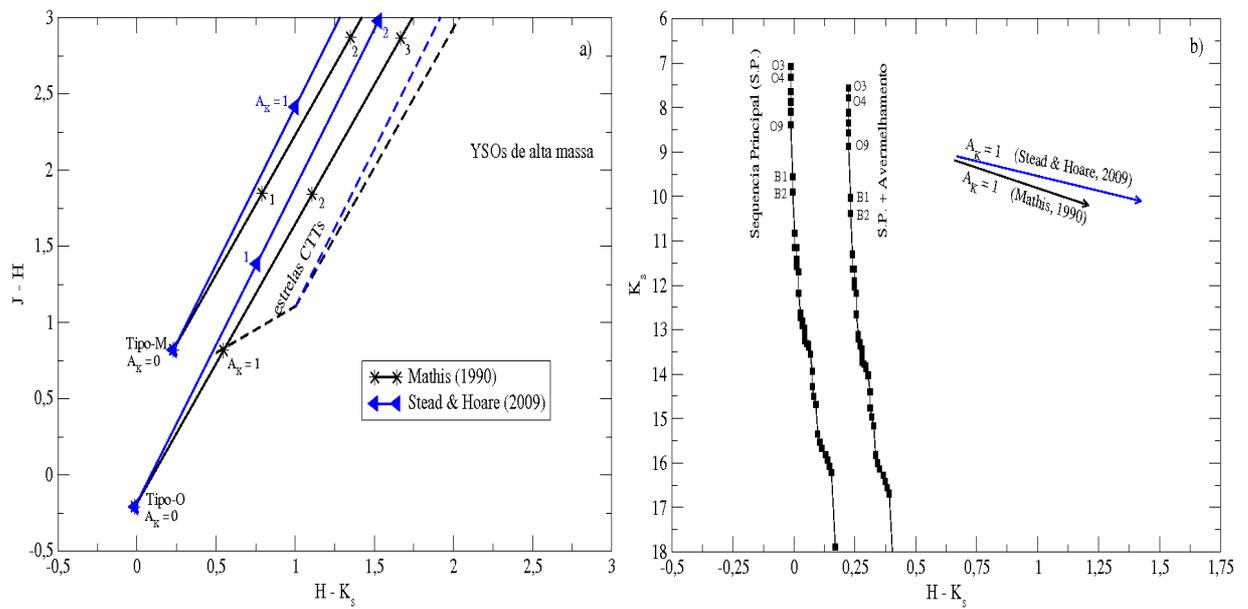


Figura 2.2: Exemplos de diagramas C-C e C-M. À esquerda: diagrama Cor-cor (C-C), com linhas de avermelhamento para estrelas de tipos espectrais M e O (linhas contínuas) para duas diferentes leis de extinção. As linhas pretas têm uma inclinação de  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 1,83$  (Mathis, 1990), enquanto as linhas azuis têm inclinação de 2,07 (Stead e Hoare, 2009). Nos dois casos, os valores da extinção ( $A_K$ ) estão indicados. À direita: diagrama cor-magnitude (C-M) com a sequência principal deslocada pela distância (sequência da esquerda) e a sequência principal afetada também pela extinção interestelar (linha da direita). As duas leis de extinção estão exibidas no diagrama C-M.

Ambas inclinações não são restritas a nenhum sistema fotométrico em particular, elas foram determinadas a partir de leis universais de extinção interestelar em função do comprimento de onda (Mathis, 1990; Stead e Hoare, 2009). Para cada linha de avermelhamento, estão marcados os locais onde  $A_K = 0, 1, 2$ , etc. As linhas tracejadas exibem o local das estrelas T-Tauri Clássicas (do inglês, CTTs).

No diagrama C-M (Fig. 2.2b) os objetos mais brilhantes aparecem identificados. Neste gráfico, existem duas linhas que representam as estrelas da sequência principal. A construção da linha da sequência principal foi realizada utilizando  $M_V$  de estrelas de tipo espectral O de Vacca, Garmany e Shull (1996), enquanto que para as demais estrelas foram utilizadas  $M_V$  de Wegner (2007). Para todas as estrelas as cores  $(V - K)_0$  e  $(H - K)_0$  utilizadas foram de Koornneef (1983). Todas estas magnitudes e cores foram corrigidas para o sistema fotométrico do 2MASS. A primeira linha, à esquerda no diagrama C-M, representa a sequência principal para a distância do aglomerado sem levar em conta o avermelhamento interestelar. A segunda linha, à direita, representa a sequência principal dos membros do aglomerado com o avermelhamento interestelar levado em conta. Dois vetores de avermelhamento estão exibidos. Eles mostram o efeito da extinção interestelar para um valor de  $A_K = 1,0$  mag.

Existem várias leis de extinção interestelar na literatura, por exemplo Mathis (1990); Indebetouw et al. (2005); Nishiyama et al. (2006). A inclinação das linhas de avermelhamento nos diagramas cor-cor depende da lei de extinção e também das bandas passantes dos filtros que definem o sistema fotométrico utilizado. Diferentes sistemas fotométricos fornecem diferentes índices de cor para uma dada estrela e os valores são tão mais discrepantes quanto maior for o avermelhamento.

Uma lei de extinção interestelar no infravermelho é definida por:

$$A_\lambda \propto \lambda^{-\alpha}. \quad (2.3)$$

A lei de Stead e Hoare (2009) tem um expoente no valor de  $\alpha = 2,14$ , que é um dos maiores valores determinados até agora. Por outro lado, a lei de Mathis (1990) apresenta um dos menores valores, com  $\alpha = 1,70$ . Estas duas leis de extinção representam situações

extremas e utilizamos as duas como limites que permitem avaliar o erro introduzido por esse parâmetro.

Com a escolha de velas-padrão (estrelas “Red Clumps”), e o aprimoramento de metodologias para determinar o valor universal de  $\alpha$ , estes valores têm aumentado desde Mathis (1990) onde  $\alpha = 1,70$ , Indebetouw et al. (2005) com  $\alpha = 1,86$  e Nishiyama et al. (2006) com  $\alpha = 1,99$ . Usando  $\alpha = 2,14$  e o comprimento de onda central do sistema do 2MASS, o valor da inclinação das linhas de avermelhamento para os diagramas C-C é de  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 2,07$ . Este valor está em excelente concordância com os resultados de Straižys e Laugalys (2008), que são baseados em fotometria do 2MASS. Straižys e Laugalys (2008) encontraram um valor de  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 2,00$  (o expoente  $\alpha$  para esta inclinação é de 2,02). Stead e Hoare (2009) também chamaram a atenção para o fato de que seus resultados concordam com os resultados de Indebetouw et al. (2005), se para isso forem utilizados os mesmos comprimentos de onda efetivos dos filtros do 2MASS. Foram utilizadas as linhas de avermelhamento de Straižys e Laugalys (2008) ao longo deste trabalho, uma vez que seus resultados são baseados no mesmo sistema fotométrico que o deste trabalho (2MASS), e seus resultados (inclinação de  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  e  $\alpha$ ) situam-se entre os dois casos extremos de leis de extinção interestelar citados logo acima (Mathis, 1990; Stead e Hoare, 2009).

Nossos índices de cor foram medidos no sistema CIT/CTIO e transformados para o 2MASS utilizando as transformações de Carpenter (2001). Para os objetos saturados de nossas imagens, substituímos diretamente por dados do catálogo 2MASS. A lista de objetos de nossas imagens é o mais completo para o filtro  $K_s$ , dado que a extinção é maior em  $J$  e  $H$ . Para as estrelas não detectadas nestes dois filtros, utilizamos como limite de índice de cor uma detectabilidade de 90% no filtro em particular. Esta detectabilidade é baseada em um procedimento que foi realizado por meio de testes com estrelas artificiais. Nestes testes foram adicionadas 9000 estrelas artificiais e distribuídas aleatoriamente em nossas imagens. Estas estrelas tinham as mesmas características das estrelas reais das respectivas imagens (S/N e FWHM) e tinham magnitudes que variavam de  $J = 15,0$  até  $J = 19,0$  mag e em intervalos de 0,5 mag. Em alguns casos, também foi necessário realizar este procedimento para a banda  $H$ . Estes objetos, onde a magnitude limite de 90% de detectabilidade foi adotada, estão representados por setas (ao invés dos usuais pontos). A ponta das setas indicam os limites inferiores, e suas inclinações seguem o avermelhamento interestelar.

Nos diagramas (C-C e C-M) da maior parte das regiões H II aparecem dois grupos de objetos. O primeiro grupo representa os objetos projetados no primeiro plano (“foreground”), enquanto que o segundo grupo representa os próprios membros do aglomerado ou ainda objetos do primeiro plano mas mais avermelhados (e.g. Fig. 3.42). Em regiões não muito obscurecidas, podem surgir objetos de um segundo plano (“background”), apresentando um maior avermelhamento. Em algumas situações, nestes diagramas existem diferentes grupos pertencendo à mesma região H II. Isto pode ocorrer quando um aglomerado estelar bastante brilhante varre seu material circundante podendo disparar formação estelar em sua vizinhança, ou quando estrelas estão se formando independentemente em nuvens moleculares próximas, exibindo avermelhamentos distintos. A maior parte dos diagramas apresenta objetos com excesso de emissão na banda  $K_s$  (índices de cor  $H - K_s$  elevados). Eles são os MYSOs (MYSO, do inglês Massive Young Stellar Objects), circundados por poeira quente e tipicamente não exibem características fotosféricas.

Utilizando os dados fotométricos no infravermelho próximo ( $JHK_s$ ), junto com imagens do Spitzer, o estágio evolutivo de cada região pode ser estimado. Um estágio evolutivo pode ser indicado com a adoção dos seguintes critérios: No primeiro estágio (*A*), a nebulosidade na banda  $K_s$  (principalmente devido a  $\text{Br}\gamma$  em  $2,167 \mu\text{m}$ ) domina a imagem, enquanto a emissão dos PAHs (do inglês, Polycyclic Aromatic Hydrocarbonets), domina a imagem do Spitzer principalmente em  $5,8$  e  $8,0 \mu\text{m}$  (verde e vermelho, respectivamente). A nebulosidade é bastante intensa e não há detecção de um aglomerado. No segundo estágio (*B*), já aparece um aglomerado de estrelas com algumas candidatas a terem suas fotosferas “nuas”, um grande número de estrelas CTTs e alguns MYSOs. Além disso, a nebulosidade em ambas as imagens no infravermelho próximo e médio já não é tão dominante. No terceiro estágio (*C*), aparece pouca nebulosidade (na banda  $K_s$ ) e alguma emissão nebular na imagem do Spitzer devido ao gás e poeira quente (vermelho), há um aglomerado estelar bem definido (estrelas com fotosferas “nuas”) e algumas poucas estrelas CTTs, aqui já não há mais MYSOs. No quarto estágio (*D*), há apenas um aglomerado de estrelas sem nebulosidade evidente (nas duas imagens) na região ou em sua volta. No próximo capítulo, os resultados desta análise serão apresentados para todas as regiões de nossa amostra.

## 2.5 Fluxo no Contínuo de Lyman

Conti e Crowther (2004) fizeram um levantamento de regiões H II gigantes da Galáxia e calcularam o fluxo no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ) para as 56 regiões de sua amostra. Como algumas das regiões estudadas nesta tese não estão no catálogo de Conti e Crowther (2004) foi necessário seguir o mesmo procedimento e determinar  $N_{LyC}$ . Mezger et al. (1974) mostraram que o fluxo no contínuo de Lyman *absorvido* pelo gás pode ser escrito como:

$$\left[ \frac{N'_{LyC}}{s^{-1}} \right] = 4,761 \times 10^{48} a(\nu, T_e)^{-1} \cdot \left[ \frac{\nu}{GHz} \right]^{0,1} \left[ \frac{T_e}{K} \right]^{-0,45} \left[ \frac{S_\nu}{u.f.} \right] \left[ \frac{d}{kpc} \right]^2, \quad (2.4)$$

onde  $a(\nu, T_e)$  é uma função que varia lentamente (Mezger e Henderson, 1967) e é dada por

$$a(\nu, T_e) = 0,366 \left[ \frac{\nu}{GHz} \right]^{0,1} \left[ \frac{T_e}{K} \right]^{-0,15} \left[ \ln \left( \frac{4,995 \times 10^{-2}}{\nu} \right) + 1,5 \ln \left( \frac{T_e}{K} \right) \right] \quad (2.5)$$

$T_e$  é a temperatura eletrônica em  $K$ ,  $\nu$  é a frequência em  $GHz$ ,  $S_\nu$  é o fluxo medido em unidades de fluxo ( $1 \text{ u.f.} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ) e  $d$  é a distância heliocêntrica do objeto (em kpc).

Para determinar  $N_{LyC}$  (o fluxo no contínuo de Lyman que escapa do gás) é necessário utilizar o fator de correção dado por (Mezger et al., 1974):

$$f_{net} = \frac{N'_{LyC}}{N_{LyC}} = \frac{f_H + \gamma f_{He}}{1 + \gamma}, \quad (2.6)$$

onde  $\gamma = (N_{He}/N_H)$  é a razão entre o número de fótons disponíveis e que são capazes de ionizar hélio ( $N_{He}$ ) e hidrogênio ( $N_H$ ),  $f_H$  e  $f_{He}$  são as frações de fótons capazes de ionizar hidrogênio e hélio, respectivamente, mas que são absorvidos pelo gás. Seguindo a metodologia de Smith et al. (1978) foi adotado  $\gamma = 0,52$ .

A Equação 2.6 pode ser escrita de outra forma:

$$f_{net} = \left[ \frac{N'_{LyC}}{N_{LyC}} \right] = \frac{(e^{-\tau_H} + \gamma e^{-\tau_{He}})}{(1 + \gamma)}. \quad (2.7)$$

Assim, antes de determinar  $f_{net}$  é necessário conhecer a profundidade óptica para o hidrogênio e para o hélio (Smith et al., 1978):

$$\tau_H = 3,4 \times 10^{-18} (N'_{LyC} n_e)^{1/3} a_0^{-1} \left[ \frac{x\sigma_{He}}{x_1\sigma_v} \right], \quad (2.8)$$

e

$$\tau_{He} = \tau_H a_0 R_0^{1/3}, \quad (2.9)$$

onde,  $a_0$  é a razão entre as seções de choque de absorção para os fótons ionizantes de hélio e hidrogênio (Smith et al., 1978, utilizaram  $a_0 = 6$ ),  $R_0$  é uma constante proporcional à razão dos volumes das esferas de Strömngren de hélio e hidrogênio que está tabelada em (Smith et al., 1978) e  $n_e$  é a densidade eletrônica (Schraml e Mezger, 1969) dada por

$$n_e = 98,152 a (\nu, T_e)^{-0,5} \left[ \frac{\nu}{GHz} \right]^{0,05} \left[ \frac{T_e}{K} \right]^{0,175} \left[ \frac{d}{kpc} \right]^{-0,5} \left[ \frac{S_\nu}{u.f.} \right]^{0,5} \left[ \frac{\theta}{arcmin} \right]^{-1,5}. \quad (2.10)$$

O termo entre colchetes na Equação 2.8 é (Mezger et al., 1974):

$$\frac{x\sigma_{He}}{x_1\sigma_v} = a_0 \left( \frac{x\sigma_H}{x_1\sigma_v} \right), \quad (2.11)$$

onde,  $x$  é a razão do número de grãos de poeira por átomo de hidrogênio,  $x_1\sigma_v$  é a seção de choque da extinção no visível, e os  $\sigma$ 's são as seções de choque para o hidrogênio ( $\sigma_H$ ), hélio ( $\sigma_{He}$ ) e para os grãos de poeira no visível ( $\sigma_v$ ,  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ ). Smith et al. (1978) mostraram que esta expressão (Eq. 2.11) pode ser simplificada. Eles assumiram que se a distância galactocêntrica ( $d_G$ ) do objeto for conhecida e menor que 10 kpc, esta razão será igual a:

$$\frac{x\sigma_{He}}{x_1\sigma_v} = \begin{cases} 5 - 0,4d_G, & \text{se } d_G < 10 \text{ kpc} \\ 1, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.12)$$

Com as coordenadas do alvo,  $T_e$ ,  $d$ ,  $\theta$  e  $S_\nu$  o fluxo no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ) pode ser determinado. Quando a região H II não estava na amostra de Conti e Crowther (2004),  $N_{LyC}$  foi determinado com  $T_e$  de Downes et al. (1980); Caswell e Haynes (1987),  $d$  de Russeil (2003) e  $S_\nu$  e  $\theta$  de Smith et al. (1978); Caswell e Haynes (1987); Kuchar e Clark (1997).

## Catálogo de Regiões H II Gigantes Galácticas

### 3.1 Seleção dos Alvos

Neste capítulo será apresentado um catálogo fotométrico no infravermelho próximo de 35 regiões H II da Galáxia, 24 das quais foram classificadas como regiões H II gigantes. Uma região H II é considerada gigante quando seu fluxo no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ) é maior que  $10^{50}$  fótons por segundo. Nossa amostra engloba algumas das regiões H II gigantes estudadas por Conti e Crowther (2004), que conduziram um censo de regiões H II gigantes na Galáxia baseado no trabalho de Kuchar e Clark (1997), que fez um mapeamento da Via Láctea em 6,0 *cm*, e em conjunto com distâncias cinemáticas de Russeil (2003). As outras regiões que não estão naquele trabalho foram escolhidas a partir de Bica et al. (2003); Dutra et al. (2003), que realizaram uma busca por aglomerados estelares na Galáxia, utilizando imagens do 2MASS. Salvo menção ao contrário, todas as distâncias cinemáticas utilizadas neste trabalho são de Russeil (2003).

### 3.2 Estrutura do Catálogo

Aqui será discutido o procedimento adotado e os resultados obtidos em cada região de nossa amostra. As imagens no infravermelho próximo,  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ , foram obtidas nos telescópios CTIO-Blanco e SOAR (ambos telescópios de 4 metros). As imagens foram combinadas (em RGB) para se ter uma imagem colorida final. Nelas, o padrão RGB adotado foi  $J$  em azul,  $H$  em verde e  $K_s$  em vermelho. Nebulosidade e objetos frios (como estrelas jovens circundadas por gás e poeira) contribuem mais para o vermelho, enquanto que objetos quentes como fotosferas estelares “nuas” (principalmente estrelas quentes de

Tabela 3.1 - Regiões H II estudadas neste trabalho. Suas coordenadas galácticas estão nas colunas 1 e 2. Seus nomes estão na coluna 3. Suas distâncias cinemáticas estão apresentadas na coluna 4. Seus fluxos no contínuo de Lyman estão na coluna 5, onde nota-se que a maioria destas regiões é gigante,  $N_{LyC} > 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$ , as respectivas referências estão na coluna 6. A resolução espacial para cada região (banda  $K_s$ ) está na coluna 7. Na coluna 8 está exibido o estágio evolutivo de cada região. Na coluna 9 está indicado se a região está a uma distância mais Próxima (P), mais Longínqua (L), Concorda (C) com a respectiva distância cinemática ou se essa informação é Desconhecida (D). Veja a seção 3.2 para maiores detalhes.

$l$	$b$	Nome	$d_{cin}^2$ (kpc)	$N_{LyC}$ $\log(s^{-1})$	Ref.	FWHM <sup>3</sup> (") $K_s$	Estágio Evolutivo	(P), (L) (C) or (D)
5,97	-1,18	M8	2,8	50,19	5	0,84 <sup>a</sup>	B	C
10,2	-0,3	W31-South <sup>2</sup>	4,5	50,66	5	0,56 <sup>b</sup>	B-C	P <sup>10</sup>
10,3	-0,1	W31-North <sup>2</sup>	15,1	50,90	5	0,87 <sup>a</sup>	B	P
12,8	-0,2	W33 <sup>1</sup>	3,9	50,13	8	0,69 <sup>c</sup>	A	D
15,0	-0,7	M17	2,4	51,22	5	0,61 <sup>b</sup>	B	P
22,7	-0,4	-	10,6	49,73	6	0,77 <sup>b</sup>	C-D	P
25,4	-0,2	W42	11,5	50,93	5	0,59 <sup>b</sup>	B	P <sup>10</sup>
30,8	-0,2	W43 <sup>1</sup>	6,2	50,83	5	0,78 <sup>c</sup>	C	P <sup>10</sup>
45,5	+0,1	K47	7,0	49,63	6	0,78 <sup>b</sup>	A	D
48,9	-0,3	-	5,5	50,03	5	1,20 <sup>a</sup>	B	P
49,5	-0,4	W51A	5,5	50,94	5	0,99 <sup>a</sup>	B	P <sup>10</sup>
133,7	+1,2	W3 <sup>4</sup>	4,2	50,25	5	0,86 <sup>4</sup>	C	P <sup>10</sup>
274,0	-1,1	RCW42	6,4	50,30	5	0,72 <sup>a</sup>	B	C
282,0	-1,2	RCW46	5,9	50,32	5	1,80 <sup>a</sup>	B	C
284,3	-0,3	NGC3247	4,7	50,96	5	0,81 <sup>a</sup>	B-C	P
287,4	-0,6	NGC3372	2,5	50,11	5	0,69 <sup>a</sup>	C	P
291,6	-0,5	NGC3603	7,9	51,50	5	0,75 <sup>a</sup>	B-C	P
298,2	-0,3	-	10,4	50,87	5	0,53 <sup>b</sup>	B	D
298,9	-0,4	-	10,4	50,87	5	0,81 <sup>a</sup>	A	D
305,2	+0,0	-	3,5	49,53	7	0,75 <sup>a</sup>	A	D
305,2	+0,2	-	3,5	49,64	7	0,81 <sup>a</sup>	B-C	C
308,7	+0,6	-	4,8	48,59	7	1,02 <sup>a</sup>	D	C
320,1	+0,8	RCW87	2,7	48,85	7	1,17 <sup>a</sup>	B	D

Tabela 3.2 - Continuação da Tabela 3.1.

$l$	$b$	Nome	$d_{cin}^2$ (kpc)	$N_{LyC}$ $log(s^{-1})$	Ref.	FWHM <sup>3</sup> (") $K_s$	Estágio Evolutivo	(P), (L) (C) or (D)
320, 3	-0, 2	-	12, 6	50, 11	5	1, 41 <sup>a</sup>	A-B	D
322, 2	+0, 6	RCW92	4, 0	49, 52	7	1, 20 <sup>b</sup>	A-B	D
327, 3	-0, 5	RCW97	3, 0	50, 14	5	0, 81 <sup>a</sup>	A	C
331, 5	-0, 1	-	10, 8	51, 16	5	0, 84 <sup>a</sup>	A	P
333, 1	-0, 4	-	3, 5	50, 08	5	0, 59 <sup>b</sup>	B	P <sup>10</sup>
333, 3	-0, 4	-	3, 5	50, 04	5	0, 84 <sup>a</sup>	A	D
333, 6	-0, 2	-	3, 1	50, 43	5	1, 14 <sup>a</sup>	A	D
336, 5	-1, 5	RCW108	1, 5	48, 29	7	0, 99 <sup>a</sup>	A-B	C
336, 8	-0, 0	-	10, 9	50, 22	7	0, 77 <sup>b</sup>	A	C
348, 7	-1, 0	RCW122	2, 7	49, 63	7	0, 88 <sup>b</sup>	A-B	C
351, 2	+0, 7	-	1, 2	49, 63	9	0, 99 <sup>a</sup>	B	L
353, 2	+0, 6	RCW131	1, 0	49, 32	9	0, 99 <sup>a</sup>	B	L

(1) Exceto para W33 e W43, que são baseadas em dados do CIRIM no telescópio CTIO-1.5 metros, todas as demais regiões tem dados do telescópio de 4 metros Blanco do CTIO (ISPI or OSIRIS);

(2) Todas as distâncias cinemáticas foram adotadas de Russeil (2003), as exceções são W31-Sul and W31-Norte onde foram utilizadas as distâncias de Corbel e Eikenberry (2004);

(3) Instrumentos usados: a - ISPI, b - OSIRIS e c - CIRIM;

(4) Para a região W3 foram utilizados dados fotométricos do catálogo do 2MASS;

(5)  $N_{LyC}$  de Conti e Crowther (2004); (6)-(9) não estão na amostra de Conti e Crowther (2004),  $N_{LyC}$  foram determinados: (6) utilizando  $T_e$  de Downes et al. (1980) e  $S_\nu$  e  $\theta$  de Kuchar e Clark (1997); (7)  $T_e$  de Caswell e Haynes (1987) e  $S_\nu$  e  $\theta$  de Kuchar e Clark (1997); (8)  $T_e$  de Downes et al. (1980) e  $S_\nu$  e  $\theta$  de Smith et al. (1978); (9)  $T_e$ ,  $S_\nu$  e  $\theta$  de Caswell e Haynes (1987);

(10) Estas regiões têm distâncias espectrofotométricas cujos resultados diferem dos cinemáticos.

tipos espectrais OB) contribuem mais para o azul. Serão apresentadas também imagens coloridas do IRAC-Spitzer, combinadas em 4,5, 5,8 and 8,0  $\mu\text{m}$  (azul, verde e vermelho, respectivamente).

Para cada região H II deste catálogo, os resultados fotométricos estão apresentados na forma de diagramas cor-cor e cor-magnitude (C-C e C-M, respectivamente). Por meio destes diagramas é possível identificar candidatos a fonte ionizante e objetos ainda em fase de formação, como estrelas T-Tauri e estrelas de alta massa e embebidas em gás e poeira (MYSOs). Nos diagramas cor-magnitude, a linha de sequência principal é utilizada para verificar se a distância cinemática para cada região está em acordo com os resultados fotométricos. Esta análise é puramente qualitativa, mas tem mostrado resultados interessantes. Salvo menção ao contrário, todas as distâncias aqui consideradas são cinemáticas.

As linhas de sequência principal (nos diagramas C-M) foram deslocadas para as respectivas distâncias cinemáticas de cada região de formação estelar e somente a distância foi levada em consideração. Ou seja, as magnitudes absolutas das estrelas na sequência principal foram transformadas em magnitudes aparentes, considerando-se apenas o efeito da distância (inverso do quadrado da distância), não foi adotada nenhuma lei de extinção no deslocamento desta linha de sequência principal. O efeito do avermelhamento (lei de extinção) pode ser projetado a partir dessa posição e seguindo as linhas de avermelhamento.

As leis de avermelhamento adotadas foram as de Mathis (1990); Stead e Hoare (2009). A primeira fornece um expoente para a extinção no infravermelho próximo de  $\alpha = 1,70$ , enquanto que a segunda fornece  $\alpha = 2,14$ . As distâncias cinemáticas, analisadas para cada região por meio da posição da sequência principal, foram classificadas em quatro categorias. Primeira categoria *C* (Concorda), quando a distância cinemática de uma dada região H II “coloca” a linha de sequência principal em uma posição que está em concordância com o que se espera por meio da distribuição de objetos no diagrama cor-magnitude. Por outro lado, quando a distância cinemática está em clara discordância com a distribuição de pontos no diagrama cor-magnitude, há duas situações possíveis: a distância cinemática é a) maior ou b) menor do que a indicada pela distribuição de objetos no diagrama cor-magnitude. No caso de distância cinemática maior (caso mais comum), o topo da linha da sequência principal apresenta estrelas de tipo espectral O menos brilhantes que objetos pertencentes ao aglomerado de estrelas, e são indicadas como *P* (“Próxima”), ou seja, a

região está mais próxima do que sugerem os modelos cinemáticos. Para regiões onde o topo da sequência principal (estrelas de tipo espectral O) é bem mais brilhante que os membros mais brilhantes do aglomerado, a distância é apontada como  $L$  (“Longínqua”), ou seja, a distância real da região é maior que a distância cinemática. Alguns outros casos deste tipo de análise não foram possíveis. Isto pode ocorrer quando a amostra de objetos nos diagramas é bem reduzida devido a um campo de amostragem pequeno ou a uma região extremamente embebida. Este último caso foi marcado como  $D$  (“Desconhecido”).

Já nos diagramas cor-cor o avermelhamento é analisado por meio de duas linhas contínuas e paralelas. A linha superior (esquerda) representa o avermelhamento para uma estrela de tipo espectral M (estrelas frias), enquanto que a linha inferior (direita) representa o avermelhamento para uma estrela de tipo O (estrelas quentes). Nos dois casos, a classe de luminosidade é V (sequência principal). Além destas duas linhas, há uma outra linha que está tracejada. Esta é a linha que delimita a região de objetos jovens e ainda embebidos, as estrelas T-Tauri (objetos com massas  $M_* < 8 M_\odot$ ). À direita da linha das T-Tauri, está a região onde podem ser encontrados objetos também jovens e embebidos em gás e poeira, porém mais luminosos, os chamados MYSOs (do inglês, *Massive Young Stellar Objects*, objetos estelares jovens de alta massa). A inclinação destas três linhas é a mesma e vale  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 2,0$ . Este valor foi determinado por Straižys e Laugalys (2008) por meio de um extenso trabalho com dados do 2MASS de estrelas “Red Clump”. Após a construção de diagramas cor-cor para várias direções do plano Galáctico, a inclinação nos diagramas que melhor representavam as distribuições dos dados do 2MASS foi de  $E_{J-H}/E_{H-K_s} = 2,0$ . Além disso, este valor está em forte concordância com a lei de extinção de Stead e Hoare (2009).

Utilizando informações morfológicas no infravermelho próximo (imagens em  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ ) e no infravermelho médio (imagens do IRAC-Spitzer), junto com os diagramas C-C e C-M, foi possível associar a cada região um estágio evolutivo. Estes estágios foram denominados  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ou  $D$ . No primeiro estágio ( $A$ ) estão as regiões dominadas por nebulosidade no infravermelho próximo e no médio e com pouca evidência de componente estelar. As regiões no segundo estágio evolutivo ( $B$ ) apresentam nebulosidade no infravermelho próximo e médio e um aglomerado estelar bem definido, mas com vários objetos com excesso de emissão na banda  $K_s$  (estrelas T-Tauri e MYSOs). No terceiro estágio evolutivo, o estágio

$C$ , estão aquelas regiões com pouca nebulosidade em  $K_s$  e alguma na imagem do Spitzer, é possível distinguir bem um aglomerado estelar e algumas estrelas CTTs. O quarto estágio evolutivo ( $D$ ) foi adotado para regiões onde não há mais nebulosidade em ambas as imagens ( $JHK_s$  e Spitzer), o aglomerado estelar é bem definido e suas estrelas são muito bem caracterizadas por cores normais de fotosferas “nuas”.

No Apêndice desta tese, estão listados os objetos de alta massa que ainda estão embebidos em seu ambiente (casulo) natal de gás e poeira. Esta tabela fornece excelentes alvos para trabalhos futuros, que podem fornecer informações cruciais sobre o mecanismo de formação de estrelas de alta massa.

### 3.3 Dados do Infravermelho (Próximo e Médio)

As imagens nas bandas  $J$  ( $\lambda \approx 1,28 \mu m$ ,  $\Delta\lambda \approx 0,3 \mu m$ ),  $H$  ( $\lambda \approx 1,63 \mu m$ ,  $\Delta\lambda \approx 0,3 \mu m$ ) e  $K_s$  ( $\lambda \approx 2,19 \mu m$ ,  $\Delta\lambda \approx 0,4 \mu m$ ) foram obtidas nas noites de 1, 4 e 20 de maio de 1999; 19 e 21 de maio de 2000; 10 e 12 de julho de 2001, no telescópio Blanco de 4 metros do Cerro Tololo Interamerican Observatory (CTIO), onde foi utilizado o imageador no infravermelho OSIRIS. Nas noites dos dias 3, 4, 5, 6 e 11 de julho de 2005 e 3, 4, 5, 6 e 7 de junho de 2006 foram obtidas imagens utilizando o imageador no infravermelho ISPI (no mesmo telescópio de 4 metros, Blanco). Também, nas noites de 28 e 29 de agosto de 1998 foram obtidas imagens no telescópio de 1,5 metros do CTIO, onde o imageador no infravermelho CIRIM foi utilizado. OSIRIS, ISPI e CIRIM estão descritos em seus respectivos manuais que podem ser acessados através das páginas eletrônicas do CTIO (<http://www.ctio.noao.edu>).

Também, são apresentadas imagens em falsas cores do IRAC-Spitzer para cada região de nossa amostra. IRAC (Infrared Array Camera) é a câmera de infravermelho médio que está a bordo do telescópio espacial Spitzer. Ela opera com quatro detectores com filtros em 3,6, 4,5, 5,8 e 8,0  $\mu m$  (Fazio e et al., 2004). As imagens do Spitzer foram obtidas utilizando a ferramenta *leopard* (<http://archive.spitzer.caltech.edu/>). O programa de observação (*program id.*, PID) das imagens Spitzer utilizadas estão indicados nas respectivas seções de análise de cada região H II.

## 3.4 Análise das Regiões

### 3.4.1 G5.97-1.18 (M8)

A. R.: 18h03m40s; Dec.: -24d22m40s (J2000)

Distância cinemática: 2,8 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,55 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Este objeto é também conhecido como a região Ampulheta da Nebulosa da Lagoa (M8) e hospeda a estrela Herschel 36 (tipo espectral O7V, Thompson et al., 2006). O tamanho de ambas imagens (Fig. 3.1) é de aproximadamente 3 minutos de arco em cada lado. Só se pode ver alguns poucos objetos estelares associados a esta região, em parte, por causa da emissão nebulosa (principalmente *Bracket gama*). A imagem do Spitzer (*identificação do programa (PID): 30570*) exibe a região brilhante central, associada com os objetos #01 e #41, e uma contribuição nebulosa principalmente nas bandas de 5,8 e 8,0  $\mu\text{m}$  (verde e vermelho, respectivamente e principalmente associadas a PAHs) que dominam todo o campo de visão. Na imagem colorida  $JHK_s$ , as estrelas estão bastante embebidas na brilhante nebulosa central.

Dentro da nebulosa, podem-se distinguir dois candidatos a fontes ionizantes desta região H II, objetos #01 (Herschel 36) e #41 (Fig. 3.1, lado esquerdo). Infelizmente, o objeto #01 está saturado em nossa imagem e, portanto, não foi possível obter boa fotometria, para ele foi utilizada fotometria 2MASS  $J$ ,  $H$  e  $K_s$  ( $J = 7,94$ ;  $H = 7,45$  and  $K_s = 6,91$  mag). Contudo, Goto et al. (2006) mostra, por meio de dados com melhor resolução, que este não é um objeto único. Próximo do objeto #01 também foi detectado Her 36 SE, o qual é uma emissão estendida a  $0''$ ,25 a sudeste de Herschel 36. Além do objeto #01, o objeto #41 também está no centro da nebulosidade e exibe um excesso de emissão. Como pode ser visto, no diagrama C-C #01 está próximo da linha de avermelhamento de estrelas quentes. O objeto #41 está em uma região entre as CTTs e os MYSOs. Outros objetos, #26, #37, #49, #63, #66, #71, #78, #82 e #108 estão localizados entre as linhas de avermelhamento e devem ter fotosferas “nuas”. Os objetos #151 e #115 estão à direita da linha de avermelhamento de estrelas quentes, na região das CTTs, e na imagem do Spitzer eles apresentam uma pequena emissão no infravermelho médio. O objeto #432 está fora da região das CTTs, e provavelmente é um MYSO. Na imagem do Spitzer é possível vê-lo como um objeto vermelho.

A posição dos objetos mais brilhantes desta região e o vetor de avermelhamento (diagrama C-M, Fig. 3.2) indicam que a distância cinemática aparenta estar em concordância com nossos dados. O número de CTTs é notavelmente maior que o número de MYSOs e a intensa emissão nebular que domina as imagens no infravermelho próximo e médio vem indicar que esta região está no estágio evolutivo *B*.

### 3.4.2 G10.2-0.3 (W31 - Sul)

A. R.: 18h09m21s; Dec.: -20d19m30.9s (J2000)

Distância cinemática: 4,5 kpc (Corbel e Eikenberry, 2004);  $N_{LyC}$ :  $4,57 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

A região H II gigante G10.2-0.3 é parte do complexo de regiões W31 (Shaver e Goss, 1970). Este é um dos maiores complexos de regiões H II da Galáxia. Wilson (1974) mostra que no visível não é detectada nebulosidade associada à esta região, e que este complexo é, na verdade, formado por três regiões H II: (i) G10.2-0.3 (W31 - Sul; A.R.: 18:09:21.0 e Dec.: -20:19:30.9 (J2000)); (ii) G10.3-0.1 (W31 - Norte; A.R.: 18:08:52.2 e Dec.: -20:05:53.4 (J2000)) e (iii) G10.6-0.4 (W31B; A.R.: 18:10:28.7 e Dec.: -19:55:51.7 (J2000)). Aqui, será abordada a região H II gigante: W31-Sul (G10.2-0.3). Kim e Koo (2002) classificaram esta região como tendo uma morfologia em forma de concha (“shell”). Wilson (1972) determinou uma distância cinemática de  $d_{kin} > 4,4 \pm 0,9$  kpc (valor corrigido para  $R_{\odot} = 8,5$  kpc), e Corbel e Eikenberry (2004) determinaram uma distância de  $4,5 \pm 0,6$  kpc ( $R_{\odot} = 8,5$  kpc).

Blum, Daminieli e Conti (2001) realizaram um estudo detalhado no infravermelho próximo desta região. Na Fig. 3.3, está reproduzida sua imagem  $JHK_s$  (lado esquerdo). No lado esquerdo da Fig. 3.3 está a imagem Spitzer. Na Fig. 3.4 estão reproduzidos seus resultados fotométricos, transformados para o sistema fotométrico do 2MASS. Naquele trabalho, foram identificados alguns MYSOs e quatro estrelas de tipo espectral O5.5V.

A imagem do Spitzer (*PID*: 3337) mostra emissão nebular que não aparece no visível (Wilson, 1974), e não é muito brilhante na imagem do infravermelho próximo. As estrelas de tipo espectral O (#2, #3, #4 and #5, todas O5.5V Blum et al., 2001) não são muito brilhantes na imagem do Spitzer. A imagem do Spitzer indica a presença de material nebular, principalmente forte emissão de PAHs (do inglês, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), exibida em vermelho e não detectada em  $4,5 \mu m$ , pois é mais intensa em  $\approx 6 \mu m$ . Já a

banda de  $4,5 \mu\text{m}$  (azul) contém forte emissão de linhas de recombinação, livre-livre, de  $Br\alpha$  em  $4,05 \mu\text{m}$ . Poeira está representada em todas as quatro bandas do IRAC, mas é mais intensa em  $8,0 \mu\text{m}$  (vermelho).

Na Fig. 3.4 estão os respectivos diagramas C-C e C-M. Neles, há dois grupos de objetos: (i) um grupo em  $H - K_s \approx 0,4$  e que representa os objetos de primeiro plano, enquanto que (ii) outro grupo de objetos está em  $H - K_s \approx 1,5$  e representa os membros do aglomerado.

No diagrama C-M (Fig. 3.4, à direita), aparecem alguns objetos brilhantes no segundo grupo: #2, #3, #4 e #5. Uma vez que os objetos #1, #9, #15, #26 e #30 estão à direita da região das CTTs, eles são classificados como MYSOs. Nesta região, existe um aglomerado de estrelas associado com uma nebulosidade. A sequência principal está deslocada para uma distância de  $d = 4,5 \text{ kpc}$ . Esta linha e o vetor de avermelhamento (linha com  $A_K = 1$ ) indicam que os objetos mais brilhantes e que pertencem ao aglomerado (#1 e #9) aparentam ser mais brilhantes que uma estrela de tipo espectral O3 desavermelhada, mas eles apresentam algum excesso de cor e isto pode influenciar nesta análise. Mesmo assim, isto pode sugerir que esta distância cinemática é maior do que o que seria esperado pela distribuição dos objetos no diagrama. De fato, isto foi apontado por Blum et al. (2001) por meio da determinação de sua distância espectrofotométrica.

No diagrama C-C (Fig. 3.4, à esquerda), pode-se notar que as estrelas de tipo espectral O (#2, #3, #4 e #5 Blum et al., 2001), estão entre as linhas de avermelhamento interestelar. Os candidatos a MYSOs estão à direita da linha de estrelas quentes, o que indica excesso de emissão na banda  $K_s$ . Este excesso vem de material circum-estelar que obscurece suas linhas fotosféricas. Utilizando estes diagramas para identificar as estrelas de tipo espectral O, elas foram selecionadas para espectroscopia na banda  $K$ . Blum et al. (2001) determinaram uma distância espectrofotométrica para esta região por meio de comparações entre os espectros destes alvos (objetos #2, #3, #4 e #5) com os espectros do catálogo de estrelas quentes em  $2,0 \mu\text{m}$  de (Hanson et al., 1996). Eles encontraram uma distância de  $d \approx 3,4 \pm 0,3 \text{ kpc}$ ; (veja também Furness et al., 2009). Esta distância é menor até do que o limite inferior da distância cinemática obtida por Wilson (1974) e por Corbel e Eikenberry (2004).

Dado que esta região tem alguns objetos com fotosfera nua, apresenta várias CTTs e alguns MYSOs, pode-se classificá-la como estando no estágio evolutivo  $B$  para  $C$ .

### 3.4.3 G10.3-0.1 (W31 - Norte)

A. R.: 18h08m59s; Dec.: -20d04m50s (J2000)

Distância cinemática: 15,1 kpc (Corbel e Eikenberry, 2004);  $N_{LyC}$ :  $7,94 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Wilson (1974) indicou que esta região é parte do complexo de regiões de formação estelar W31. Como discutido acima, Corbel e Eikenberry (2004) mostraram que esta região está na linha de visada de W31, mas bem mais distante. Eles determinaram uma distância cinemática de 15,1 kpc.

Nas imagens coloridas (principalmente a imagem composta  $JHK_s$ , Fig. 3.5) existe um pequeno aglomerado de estrelas, e a nebulosidade pode estar obscurecendo outros membros. Na imagem do Spitzer ( $PID$ : 146), há nebulosidade, principalmente na direção SE com o objeto #1032, um candidato a MYSO. As imagens têm tamanho em torno de  $2,0 \times 1,5$  minutos de arco. A caixa branca que pode ser vista na imagem colorida (Fig. 3.5, lado esquerdo) compreende a área estudada neste trabalho.

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.6) indicam que os objetos #4, #10 e #31 estão bastante avermelhados, os dois últimos estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes, indicando que são bons candidatos a membros do aglomerado. Os objetos #6 e #7 podem ser objetos projetados em primeiro plano. O objeto #48 é um objeto mais próximo que está na linha de visada desta região. Os objetos #72, #82 e #92, estão bem próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes (diagrama C-C, Fig. 3.6). Os objetos #81 e #106 estão na área das CTTs, e os objetos #96 e #1032 (que é bastante brilhante na imagem do Spitzer) estão à direita da área das CTTs, o que indicam que eles são MYSOs. O objeto #1032 não foi detectado na banda  $J$ , assim, foi necessário usar o valor da magnitude limite na banda  $J$  para uma detecção de 90% dos objetos ( $J = 17,0$  mag).

A distância cinemática de 15,1 kpc aparenta não ser verdadeira para esta região, como pode ser visto no diagrama C-M (Fig. 3.6, à direita). Se for admitido que os objetos #10, #31, #72, #82 e #92 fazem parte do aglomerado, seus avermelhamentos seriam elevados e suas distâncias muito menores que a cinemática. Com dois MYSOs, várias CTTs e um aglomerado estelar bem definido, pode-se indicar que esta região está no estágio evolutivo *B*.

### 3.4.4 G12.8-0.2 (W33)

A. R.: 18h14m14s; Dec.: -17d55m47s (J2000)

Distância cinemática: 3,9 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,35 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

W33 pertence a uma região H II mais extensa, o complexo W33 (Beck, Kelly e Lacy, 1998). Seguindo o trabalho de Conti e Crowther (2004), o fluxo no contínuo de Lyman foi determinado usando  $T_e$  de Downes et al. (1980) e  $S_\nu$  e  $\theta$  de Smith et al. (1978). O valor encontrado foi de  $N_{LyC} = 1,35 \times 10^{50}$  fótons por segundo, o que indica que esta é uma região H II gigante. Keto e Ho (1989) observaram uma concha (“shell”) em expansão por meio de observações em  $NH_3$  e determinaram um tempo de escala dinâmico de  $\sim 10^5$  anos para este complexo.

Nas imagens coloridas (Fig. 3.7), há uma estrutura bipolar que, na verdade, é causada por uma faixa de alto obscurecimento correndo na direção Nordeste para Sudoeste. Não é perceptível um aglomerado estelar. O tamanho das imagens é de  $\sim 1,0$  minuto de arco de lado. Na imagem do Spitzer (*PID*: 146), pode-se ver emissão de PAHs (em verde e em vermelho, combinados), como também uma nuvem escura visualizada na imagem colorida em  $JHK_s$ .

Os objetos #3, #4 e #6 são objetos de primeiro plano projetados na linha de visada. Os objetos #5, #17 e #27 seguem as linhas de avermelhamento interestelar. Os objetos #1, #2, #7, #8 e #10 apresentam excesso de emissão e estão na região dos MYSOs (Fig. 3.8). As pontas das setas indicam as posições dos objetos considerando os limites de magnitude para detecções acima de 90%, estes limites são  $J = H = 17,5$  mag (e são utilizados para objetos não detectados nestas bandas). As inclinações destas setas são devidas ao efeito de avermelhamento interestelar. O objeto #8 foi detectado somente na banda  $K_s$ , a inclinação da seta que o representa segue a lei de extinção adotada. Os objetos com setas verticais foram detectados nas bandas  $H$  e  $K_s$ , de forma que suas cores  $H - K_s$  foram bem determinadas.

A distância parece ser bem menor que a cinemática, mas o diminuto número de objetos dificulta uma análise neste sentido. A ausência de um aglomerado estelar, a falta de CTTs detectadas e poucos MYSOs (diagramas C-C e C-M, Fig. 3.8) indicam que esta região está no estágio evolutivo de tipo A.

### 3.4.5 G15.0-0.7 (M17)

A. R.: 18h20m30s; Dec.: -16d10m48s (J2000)

Distância cinemática: 2,4 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,66 \times 10^{51}$  fótons  $s^{-1}$

Hanson, Howarth e Conti (1997) realizaram um estudo no infravermelho próximo desta região, e identificaram nove estrelas de tipo espectral O, usando para isso espectroscopia na banda  $K$ . Estas estrelas foram utilizadas para determinar uma distância espectrofotométrica de 1,3 kpc, menor que o valor de 2,4 kpc obtido por meio de técnicas cinemáticas (Russeil, 2003). Chini, Elsässer e Neckel (1980) realizaram um estudo multicolor (UBVRI) no conteúdo estelar de M17, e em subsequentes trabalhos, (por exemplo: Chini e Wargau, 1998; Chini, Hoffmeister, Kimeswenger, Nielbock e et al., 2004) mostraram a presença de MYSOs nesta região.

A região H II M17 é maior do que está exibido nas imagens coloridas (Fig. 3.9), mas nossos dados estão focalizados no aglomerado central. As imagens em  $JHK_s$  e do Spitzer ( $PID$ : 107) mostram uma nuvem escura para o Leste, enquanto que na imagem do Spitzer pode-se ver emissão nebulosa na direção Sudoeste. No trabalho de Hanson et al. (1997), o objeto #189 está resolvido no que são nossos objetos #100 e #200. Infelizmente, estes objetos estão saturados, e as imagens do 2MASS não oferecem resolução espacial suficiente para separá-los.

Os objetos #1, #2, #3, #4 e #7 são estrelas que exibem linhas fotosféricas (fotosferas “nuas”) e que pertencem ao aglomerado de M17, uma vez que apresentam cores similares (Fig. 3.10). Os objetos #8 e #17 seguem as linhas de avermelhamento interestelar, enquanto que os objetos #10 e #24 são candidatos a MYSOs. O objeto #24 não foi detectado na banda  $J$ , assim, foi adotada uma magnitude para um limite de 90% de detectabilidade, que para esta região vale  $J = 16,0$  mag. Os objetos #5, #6 e #23 estão na área das CTTs.

A discrepância entre o topo da linha de sequência principal e os objetos mais brilhantes associados à região M17 mostra que a distância cinemática é maior que o necessário para ajustar nossos dados (consistente com Hanson et al., 1997). A presença de um aglomerado estelar, várias CTTs e alguns objetos candidatos a MYSOs indicam que esta região está no estágio evolutivo  $B$ .

### 3.4.6 G22.7-0.4

A. R.: 18h34m09s; Dec.: -09d14m26s (J2000)

Distância cinemática: 10,6 kpc;  $N_{LyC}$ :  $5,37 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Esta região é razoavelmente evoluída, como pode ser visto na pequena nebulosidade no Spitzer (*PID*: 146). É um aglomerado pouco estudado e que está incluído no catálogo de novos aglomerados de estrelas do Glimpse (Mercer et al., 2005). Em um campo maior, imagens do Spitzer mostram que esta região está na linha de visada do complexo de regiões de formação estelar W41, cujas coordenadas em rádio estão a cerca de 7,0 minutos de arco a Nordeste, mas que tem um diâmetro de  $\theta = 18,93$  minutos (Smith, Mezger e Biermann, 1978). O aglomerado é facilmente visualizado e pode-se ver uma pequena e difusa nebulosidade na imagem do Spitzer (Fig. 3.11, lado direito). O tamanho das imagens é de cerca de 2,0 minutos de arco em cada lado. Se o aglomerado pertencer ao complexo W41, o que não é algo óbvio, pode-se assumir que sua distância cinemática é de 10,6 kpc (Russeil, 2003).

Nos diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.12), nota-se dois grupos de objetos. Um em  $H - K_s \approx 0,8$  e outro em  $H - K_s \approx 1,0$ . Os diagramas nos mostram que os objetos #1, #2, #3, #4 e #6 estão no local esperado para estrelas afetadas somente pela extinção interestelar. Como estes objetos brilhantes estão saturados em nossas imagens, foram adotadas as magnitudes do catálogo do 2MASS. A linha da sequência principal para esta distância, claramente, não ajusta nossos dados observacionais.

Fica claro, portanto, que este aglomerado está muito mais próximo do que o esperado por técnicas cinemáticas e, de fato, ele não deve pertencer ao complexo W41. Este aglomerado deve estar na frente de W41, mas em projeção na linha de visada. A pequena nebulosidade no infravermelho médio, a falta de MYSOs e a presença de poucas CTTs indicam um estágio *C* para *D*.

### 3.4.7 G25.4-0.2 (W42)

A. R.: 18h38m15s; Dec.: -06d47m58s (J2000)

Distância cinemática: 11,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $8,51 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

W42 está localizada no quarto quadrante galáctico. Lester et al. (1985) determinaram que ela está na distância cinemática “próxima” de 3,7 kpc (para  $R_{\odot} = 8,0$  kpc). Blum,

Conti e Daminieli (2000) realizaram um estudo detalhado desta região. Eles apresentaram imagens de alta resolução espacial nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ . Na Fig. 3.13, lado esquerdo, pode-se ver a reprodução da imagem colorida do trabalho de Blum et al. (2000). No lado direito da Fig. 3.13, está a imagem do Spitzer ( $PID$ : 186) que mostra intensa emissão nebulosa (principalmente em vermelho,  $8,0 \mu\text{m}$ ) na área central. Ambas as imagens têm tamanhos de  $\approx 1,5$  minutos de arco cada lado.

Os respectivos diagramas (C-C and C-M) com a fotometria no infravermelho próximo estão representados na Fig. 3.14 e corrigidos para o sistema 2MASS. Blum et al. (2000) obtiveram espectros na banda  $K$  das três estrelas mais brilhantes do centro deste aglomerado (objetos #1, #2 e #3). O objeto W42 #1, a estrela mais brilhante do aglomerado, foi classificada como sendo kO5-O6. Com estes espectros, Blum et al. (2000) determinaram uma distância espectrofotométrica de 2,2 kpc (considerando que as estrelas estavam na fase de sequência principal de idade zero), este valor é quase a metade do valor obtido por técnicas cinemáticas. Se for considerado que os objetos estão na classe de luminosidade V, ao invés de sequência principal de idade zero, a distância de W42 é de 2,46 kpc. Para isso foi utilizada a mesma lei de extinção que do trabalho original, Mathis (1990). Os objetos #2 e #3 não exibem linhas fotosféricas. Este fato, combinado com suas posições no diagrama C-C onde exibem excesso de emissão, leva-nos a classificar o objeto #3 como um MYSO e o objeto #2 como uma estrela CTT. O objeto #57 é bastante brilhante na imagem Spitzer, mas quase imperceptível na imagem no infravermelho próximo. Uma vez que ele não foi detectado na banda  $J$ , foi adotada a magnitude limite para 90% de detectabilidade de  $J = 16,5$  mag, o que sugere que este objeto é um excelente candidato a MYSO.

A linha da sequência principal não ajusta bem nossos dados; como pode ser percebido, a distância cinemática é bem maior do que é necessário para um bom ajuste de nossos dados fotométricos. A presença de nebulosidade, estrelas CTTs e alguns MYSOs indicam que esta região está no estágio evolutivo  $B$ .

#### 3.4.8 G30.8-0.2 (W43)

A. R.: 18h47m37s; Dec.: -01d56m42s (J2000)

Distância cinemática: 6,2 kpc;  $N_{LyC}$ :  $6,76 \times 10^{50}$  fótons  $\text{s}^{-1}$

Blum, Daminieli e Conti (1999) realizaram um estudo detalhado do conteúdo estelar de W43. Eles apresentaram dados fotométricos nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$  e uma distância espectrofotométrica para esta região.

Na imagem colorida no infravermelho próximo, há um pequeno e cerrado aglomerado estelar. Este aglomerado está circundado por uma faixa escura com alguns objetos em primeiro plano, na linha de visada. Na imagem do Spitzer ( $PID$ : 186), pode-se ver a presença de uma modesta emissão nebular (Fig. 3.15). Blum et al. (1999) obtiveram espectros na banda  $K$  das três estrelas mais brilhantes do centro deste aglomerado estelar. Os objetos #1, #2 e #3 estão na área das CTTs (Fig. 3.16), mas seus espectros já mostram linhas fotosféricas. Blum et al. (1999) indicaram que a estrela W43 #1, a mais brilhante do aglomerado, tem um espectro similar ao da estrela WR131 classificada, opticamente, como WN7 (Figer, McLean e Najarro, 1997). As estrelas #2 e #3 são do tipo espectral O (ambas foram identificadas como OIa). A distância espectrofotométrica a esta região foi determinada como sendo 4,3 kpc, enquanto que Russeil (2003) determinou uma distância (cinemática) de 6,2 kpc. Conti e Crowther (2004), utilizando a distância cinemática de Russeil (2003), encontraram um valor do fluxo no contínuo de Lyman de  $N_{LyC} = 6,76 \times 10^{50}$  fótons por segundo. O objeto #9 é bastante brilhante na imagem do Spitzer e não tem um brilho intenso na imagem no infravermelho próximo. Entretanto não se espera um MYSO neste aglomerado. O objeto #9 poderia ser peculiar, como uma estrela fria, evoluída e circundada pela poeira. Para os objetos não detectados na banda  $J$ , foi utilizada a magnitude limite para 90% de detectabilidade,  $J = 17,0$  mag.

A presença de um aglomerado estelar com a maior parte dos objetos na área das CTTs, alguns poucos MYSOs, mais a presença de uma estrela Wolf-Rayet (#1 como uma WN7), indicam que esta região não é tão jovem e pode-se classificá-la como estando no estágio evolutivo  $C$ .

### 3.4.9 G45.5+0.1 (K47)

A. R.: 15h09m59s; Dec.: -58d17m26s (J2000)

Distância cinemática: 7,0 kpc;  $N_{LyC}$ :  $4,27 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Seguindo o trabalho de Conti e Crowther (2004), K47 tem um fluxo no contínuo de Lyman de  $N_{LyC} = 4,27 \times 10^{49}$  fótons por segundo. Esta é uma região angularmente

pequena com apenas algumas estrelas detectadas a ela associadas. Na imagem do Spitzer (*PID*: 187) a nebulosidade domina todo o campo de visão (Fig. 3.17, lado direito) e é possível ver a brilhante região central. As imagens têm lados de  $\approx 1,5$  minutos de arco.

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.18) indicam que os objetos #1, #10 e #12 são prováveis estrelas em primeiro plano e em sua linha de visada. Os objetos #2, #5, #8 e #9 estão no local esperado para estrelas de tipo espectral O (Fig. 3.18, lado esquerdo). O objeto #20 não foi detectado na banda *J*, assim sua magnitude foi assumida como o valor limite para uma detectabilidade de 90% para esta região,  $J = 16,5$ . Sua cor  $J - H$  está indicada pela seta. O objeto #6 está na região das CTTs e vários objetos com grande excesso de emissão podem ser vistos também. Aparentemente, nenhuma estrela do aglomerado foi detectada nas bandas (*J*, *H* e  $K_s$ ).

A emissão na banda  $K_s$ , a emissão elevada no Spitzer e a falta de um aglomerado indicam distâncias elevadas, mas a ausência de um aglomerado torna a análise da veracidade da distância cinemática inconclusiva. A quantidade de objetos com excesso na banda  $K_s$  e as imagens coloridas nos indicam que esta região está no estágio evolutivo A.

#### 3.4.10 G48.9-0.3

A. R.: 19h22m15s; Dec.: +14d04m20s (J2000)

Distância cinemática: 5,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,07 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem  $JHK_s$  (Fig. 3.19, lado esquerdo), existe um aglomerado estelar bem definido, como também nebulosidade associada a ele. Na imagem Spitzer (*PID*: 187, Fig. 3.19, lado direito) a nebulosidade é facilmente visualizada. O objeto vermelho brilhante na parte central é uma contaminação do objeto #63 por algum artefato da imagem.

As estrelas mais brilhantes deste aglomerado apresentam uma cor  $H - K_s \approx 0,5$ , mas é possível encontrar objetos associados à nebulosidade com valores menores: #7, #15, #49, #62, #63, #65 e #202 em  $H - K_s \approx 0,25$ , como também objetos mais avermelhados com  $H - K_s \approx 1,0$  (#31, #40 e #144). Os objetos #91, #240 e #540 estão na área das CTTs. As setas indicam o local dos MYSOs não detectados na banda *J*: objetos #203, #238, #526 e #1063. As posições destes objetos no diagrama C-C seguem as setas cujas pontas indicam as cores para as magnitudes limites de uma detectabilidade de 90% (para esta região,  $J = 17,0$  e  $H = 16,0$  mag). Kang et al. (2009) realizaram um estudo

de vários objetos embebidos em um complexo de regiões H II da qual esta região faz parte (o complexo W51) e apontaram que os objetos que estão aqui numerados como #526 e #1063 são MYSOs. O objeto #63 é a estrela mais brilhante do aglomerado, mas pode ser no primeiro plano (diagrama C-C, Fig. 3.20). Nos diagramas, sua posição sugere que ele pode ser uma estrela de tipo espectral O, enquanto que na imagem do Spitzer ele é ainda bastante brilhante.

Nesta região, é perceptível que o topo da sequência principal termina numa posição menos brilhante que os objetos #7 e #15. Caso eles não sejam muito evoluídos (como é de se esperar já que a nebulosidade e os objetos ainda jovens indicam que esta é uma região também jovem) nem objetos de primeiro plano, a distância cinemática pode estar errada e ser maior do que a verdadeira distância desta região. Isto é consistente com o baixo valor de avermelhamento para o aglomerado também. Alternativamente, se #7 e #15 não fazem parte do aglomerado, então a distância cinemática pode ser correta. A presença de algumas estrelas CTTs e alguns poucos MYSOs, além de uma nebulosidade associada à região e um bem definido aglomerado estelar sugere que esta região está no estágio evolutivo *B*.

### 3.4.11 G49.5-0.4 (W51A)

A. R.: 19h23m42s; Dec.: +14d30m33s (J2000)

Distância cinemática: 5,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $8,71 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Este é um dos complexos de regiões de formação de estrelas de alta massa mais luminosos da Via Láctea (Goldader e Wynn-Williams, 1994), com múltiplas regiões H II (Wilson et al., 1970), todos opticamente embebidos (Kumar, Kamath e Davis, 2004). W51A é uma das regiões mais brilhantes do complexo de regiões H II W51, o qual é dividido em oito rádiosfontes menores: W51A até W51H. Nesta região, não se percebe um aglomerado estelar. E a nebulosidade (Fig. 3.21, Spitzer *PID*: 187) está bem distribuída através do campo de visão da imagem, com componentes brilhantes e escuros.

Figuerêdo et al. (2008) realizaram um estudo detalhado do conteúdo estelar desta região. Eles determinaram uma distância espectrofotométrica de  $2,0 \pm 0,3$  kpc, utilizando para isso quatro estrelas que identificaram como de tipo espectral O (#44, #50, #57 e #61; tipos espectrais O5, O6.5, O4 e O7.5, respectivamente). As setas no diagrama

C-C são baseadas na magnitude para uma detectabilidade de 90% (para esta região  $J = 16,5$  mag), e portanto indicam os objetos que não foram detectados na banda  $J$ . Barbosa et al. (2008) apresentaram espectroscopia de alta resolução de duas estrelas bastante jovens e massivas e em um estágio de formação bem recente, W51 IRS 2E e IRS 2W, (Fig. 3.19, lado esquerdo). Ambos estão embebidos na região H II W51 IRS2. Eles encontraram uma distância de 5,1 kpc baseada no espectro da fonte associada com W51d em IRS2. Além disso, Xu et al. (2009) determinaram uma distância por paralaxe trigonométrica para a fonte IRS2W utilizando maser de metanol em 12 GHz e obtiveram um valor de 5,1 kpc, em concordância com o valor cinemático e os resultados de Barbosa et al. (2008). A discrepância entre as distâncias de W51A e IRS2 indicam que estas duas regiões de formação estelar podem não estar fisicamente conectadas e que as estrelas observadas por Figuerêdo et al. (2008) estão em primeiro plano e projetadas na linha de visada de W51A. O aglomerado tem objetos na área das CTTs, são eles: objetos #7, #17, #24, #25, #44, #50, e #103. Também, existem alguns MYSOs, por exemplo: objetos #45, #61, #62, #73 e #98. Os objetos #21, #32, #57 e #60 estão bem próximos da linha de avermelhamento de estrelas quentes. E, os objetos #52 e #59 são estrelas na linha de visada de W51A, mas em primeiro plano.

Há alguns objetos mais brilhantes que o topo da linha da sequência principal, mas eles são provavelmente objetos projetados na linha de visada de W51A e não pertencentes a esta região. Os objetos IRS2E e IRS2W estão associados com regiões de formação estelar em um estágio evolutivo do tipo *A*, enquanto que os demais objetos estão associados a regiões no estágio evolutivo *B*.

#### 3.4.12 G133.7+1.2 (W3)

A. R.: 02h26m34s; Dec.: +62d00m45s (J2000)

Distância cinemática: 4,2 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,78 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

W3 está situada no braço de Perseu, e está incluída na amostra de regiões H II gigantes de Conti e Crowther (2004). Os dados fotométricos e a imagem colorida, composta por imagens nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ , apresentados neste trabalho foram obtidos do catálogo fotométrico 2MASS.

A imagem colorida  $JHK_s$  mostra um aglomerado estelar no centro do campo, e al-

guma emissão nebulosa na direção Noroeste e Sudeste, circundando o aglomerado. Cada uma das imagens  $J$ ,  $H$  e  $K_s$  foi composta por um mosaico de imagens individuais do 2MASS e abrangendo no final uma área de  $18' \times 18'$ . Na imagem do Spitzer ( $PID: 127$ ), é possível ver a nebulosidade deste campo em detalhe, e a imagem indica que se trata de um conglomerado de regiões H II, o que não é tão óbvio na imagem no infravermelho próximo.

A estrela mais brilhante no centro do aglomerado (#159) foi utilizada por Humphreys (1978) para determinar uma distância espectrofotométrica, no visível, para esta região. Ela encontrou uma distância de 2,2 kpc, quase a metade da distância cinemática (4,2 kpc). Usando paralaxe trigonométrica, Xu et al. (2006) determinaram um valor para a distância à região de formação estelar W3OH,  $d = 1,95$  kpc. W3OH é uma região que pertence ao complexo de regiões W3, e pode ser vista nas imagens coloridas no infravermelho próximo e do Spitzer na linha de visada da estrela #248 (Fig. 3.23). As distâncias obtidas por paralaxe (tanto a espectrofotométrica no visível como a trigonométrica) estão em boa concordância uma com a outra, e ambas são menores que a distância cinemática por um fator 2. Navarete et al. (2010, em preparação), determinaram uma distância de  $1,85 \pm 0,92$  kpc para W3, utilizando paralaxe espectrofotométrica na banda  $K$ , onde identificaram as estrelas #159, #559, #252 e #347 como sendo de tipo espectral O e B (O6.5-O7V, O7.5-O8V, O9-B1V e O9-B1V, respectivamente). Seus resultados estão de acordo com os resultados de Xu et al. (2006) e Humphreys (1978). O que demonstra que esta metodologia, determinação de distâncias espectrofotométricas na banda  $K_s$ , é consistente com a paralaxe trigonométrica.

No diagrama C-C (Fig. 3.24, lado esquerdo) percebe-se que os objetos #252, #347, #390 e #559 estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes, e que os objetos #444 e #248 estão na área das CTTs.

O topo da sequência principal termina numa região menos brilhante que o objeto mais brilhante desta região (#159), como é esperado já que a distância cinemática (utilizada para pôr a sequência principal nos diagramas) é maior que a verdadeira distância de W3, fato provado por três diferentes metodologias. Esta região tem um aglomerado bem definido, pode-se ver nebulosidade em ambas as imagens, especialmente na imagem do Spitzer. Há várias estrelas CTTs e MYSOs. Desta forma, esta região foi classificada como de estágio evolutivo  $B$ , embora o aglomerado central esteja no estágio  $C$ .

### 3.4.13 G274.0-1.1 (RCW42)

A. R.: 09h24m30s; Dec.: -51d59m07s (J2000)

Distância cinemática: 6,4 kpc;  $N_{LyC}$ :  $2,00 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

RCW42 pertence a uma estrutura maior e em forma de concha chamada *GSH 277+00+36* (McClure-Griffiths et al., 2003, que determinaram uma distância de 6,5 kpc) que tem 600 pc de diâmetro e se estende em 1 kpc acima e abaixo do plano Galáctico. Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.25, lado esquerdo), pode-se ver um aglomerado estelar bastante cerrado e circundado por uma nebulosa avermelhada. Existe, na parte Nordeste desta região, uma nuvem que obscurece a maior parte dos objetos de fundo. Regiões como esta são bastante difíceis de analisar seu conteúdo estelar devido ao campo cerrado e muito embebido em nebulosidade. A imagem do Spitzer (*PID*: 40791) mostra um campo dominado por emissão nebular não muito intensa, com a região que circunda o aglomerado emitindo principalmente em  $8,0 \mu\text{m}$  (vermelho).

Os diagramas (C-C e C-M) mostram que os objetos #20, #24, #30 e #32 estão no local esperado para objetos com fotosferas “nuas” afetados somente pela extinção interestelar. Além disso, estas estrelas estão bem próximas de sítios com emissão nebular, algumas delas próximas também do centro do aglomerado. Isto sugere que estes objetos devem ser as fontes ionizantes desta região H II. O objeto #6 está na frente desta região e na linha de visada. Também, o objeto #14, que é uma estrela bastante brilhante e menos afetada por avermelhamento que os outros citados logo acima, pode ser uma estrela de tipo espectral O5-O6V. Os objetos #21, #36, #40 e #42 exibem excesso de cor, e os objetos #31 e #33 são brilhantes na banda  $K_s$  e estão a direita da linha das CTTs (ver o diagrama C-C na Fig. 3.26).

Nesta região, não está claro se a linha da sequência principal (portanto, a distância cinemática adotada) está em concordância com nossos dados observacionais. Contudo, o topo desta sequência principal é mais brilhante (como seria de se esperar) que nossos dados, o que indica que a distância cinemática pode ser a correta. Os membros do aglomerado apresentam um grande intervalo de cores, indicando que estão bastante embebidos, além disso, há uma grande quantidade de CTTs como também alguns MYSOs. Pode-se indicar que esta região está em um estágio evolutivo *B*.

#### 3.4.14 G282.0-1.2 (RCW46)

A. R.: 10h06m38s; Dec.: -57d12m28s (J2000)

Distância cinemática: 5,9 kpc;  $N_{LyC}$ :  $2,09 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.27, lado esquerdo) existe um pequeno e denso aglomerado estelar. Nebulosidade, na parte central, é visível em ambas imagens e na imagem do Spitzer (*PID*: 30374) pode-se perceber uma estrutura nebulosa em forma de concha com poeira aquecida (cor vermelha) circundando a parte central e emitindo em  $8,0 \mu\text{m}$ . Na direção Sudeste desta região, há uma nuvem negra obscurecendo a maioria das estrelas de fundo.

Nos diagramas (C-C e C-M, ambos na Fig. 3.28), os objetos #9, #10, #11, #12, #13, #18 e #20 estão próximos ao esperado para fotosferas “nuas” afetados somente pela extinção interestelar. Além disso, estas estrelas estão projetadas próximas ao centro do aglomerado. Isto sugere que elas podem ser as fontes ionizantes desta região H II. O objeto #5, que é a estrela mais brilhante e menos avermelhada, está na linha de avermelhamento de uma estrela fria (diagrama C-C). Os objetos #8, #15 e #16 aparentam estar em primeiro plano e projetados na linha de visada. Por outro lado, o objeto #10 aparenta ser uma estrela fria e obscurecida, possivelmente no lado oposto (por trás) do aglomerado estelar. No diagrama C-M, os objetos #31 e #46 aparentam ser MYSOs.

A distância cinemática pode estar correta neste caso, uma vez que o topo da sequência principal é mais brilhante que nossos dados observacionais e na linha de avermelhamento. A imagem do Spitzer mostra uma estrutura em forma de concha com algumas estrelas dentro dela. Há dois MYSOs, várias CTTs e quase nenhuma nebulosidade na imagem no infravermelho próximo, onde é mais visível na imagem do Spitzer, além de podermos ver um aglomerado estelar bem definido. Esta região está no estágio evolutivo *B*.

#### 3.4.15 G284.3-0.3 (NGC3247)

A. R.: 10h24m17s; Dec.: -57d45m36s (J2000)

Distância cinemática: 4,7 kpc;  $N_{LyC}$ :  $9,12 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

NGC3247 é uma região H II típica. Pode-se ver um aglomerado estelar bem definido circundado por uma forte nebulosidade. No aglomerado podem-se notar algumas estrelas candidatas ao tipo espectral O. Na imagem do Spitzer (Spitzer *PID*: 195, Fig. 3.29, lado

direito), existem algumas estrelas brilhantes. Nela, podem-se ver os objetos com excesso de emissão no infravermelho e a nebulosidade. Nota-se que a emissão em  $5,8 \mu\text{m}$  (verde) domina o campo na direção Noroeste do aglomerado central, enquanto que na direção Sudeste é a emissão em  $8,0 \mu\text{m}$  que domina. Esta região se estende por uma área maior, e este trabalho está focalizado na sua parte central. A imagem maior (e não exibida aqui) mede cerca de 10 minutos de arco de lado, mas a região reproduzida na Fig. 3.29 cobre apenas  $\approx 3,3$  minutos de arco de lado.

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.30), apresentam dois grupos de objetos. Um agrupado em  $H - K_s \approx 0,5$  e outro em  $H - K_s \approx 1,0$ . Os principais candidatos a fontes ionizantes desta região (#3, #4, #7, #8, #10, #11, #12, #13, #14, #20, #21 e #25) fazem parte do primeiro grupo de objetos. Infelizmente, os objetos #3 e #4 estão saturados em nossas imagens, então foi necessário usar fotometria do 2MASS. Os objetos #54, #60 e #70 são candidatos a MYSOs. O objeto #13 é bem destacado e exhibe um jato na direção Norte.

Aqui, está bem claro que o topo da sequência principal é menos brilhante (mais distante) que nossos dados observacionais, o que sugere que o aglomerado estelar está mais próximo de nós do que o indicado pelos resultados cinemáticos. Uma vez que há uma grande quantidade de CTTs e vários MYSOs, além de um aglomerado estelar circundado com nebulosidade (como pode ser visto em ambas as imagens, no infravermelho próximo e médio), esta região está no estágio evolutivo *B* para *C*.

### 3.4.16 G287.4-0.6 (NGC3372)

A. R.: 10h43m50s; Dec.:  $-59^{\circ}32'47''$  (J2000)

Distância cinemática: 2,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,29 \times 10^{50}$  fótons  $\text{s}^{-1}$

A região G287.4-0.6 também é conhecida como a nebulosa de Carina (ou NGC3372). Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.31, lado esquerdo) está focalizado o aglomerado estelar central. Em um campo maior (não exibido aqui), nota-se uma nebulosidade bem definida circundando o aglomerado estelar. Na imagem do Spitzer (*PID*: 30374) a emissão em  $5,8 \mu\text{m}$  (verde, e não muito intensa) domina o campo. Nesta imagem, pode-se notar que ela não está muito distante, uma vez que suas estrelas podem ser facilmente distinguidas e elas não estão fortemente avermelhadas pela extinção interestelar (diagramas C-M e C-C).

Os diagramas (C-C e C-M), indicam que os objetos #100, #1, #2, #4, #5, #8, #10, #14, #17 e #45 estão na área esperada para objetos com fotosferas “nuas” quentes afetados somente pela extinção interestelar. Além disso, estas estrelas estão projetadas próximas ao centro da região (exceto os objetos #1, #2 e #5, que não aparentam estar conectados ao aglomerado principal), o que indica que elas podem ser as fontes ionizantes desta região. O objeto #45 é bem destacado devido à presença de uma concha de choque ao Norte. Existem alguns objetos obscurecidos (imagens coloridas e diagramas, C-C e C-M), mas aparentam estar atrás da cortina de gás e poeira desta região H II. O objeto #138 está localizado em uma posição de uma estrela de tipo espectral O e com grande excesso de emissão no infravermelho. No diagrama C-C, este objeto está localizado à direita da linha das CTTs, o que indica ser um MYSO. Os objetos mais brilhantes (#100, #1, #2, #3, #4, #5 e #8) estão saturados em nossas imagens, então foi necessário adotar os valores do catálogo do 2MASS para as três bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$ . Como nossas imagens, nas três bandas, apresentam resoluções espaciais melhores que as do 2MASS os respectivos fluxos destas estrelas podem estar afetados por companheiras em suas vizinhanças. Mas, assumindo que seus fluxos estão bem determinados pelo catálogo do 2MASS, as estrelas mais brilhantes do aglomerado são mais brilhantes que a ponta da sequência principal. Isto vem indicar que a distância cinemática deve estar errada, e que a real distância deve ser menor.

Esta região pode ser classificada no estágio evolutivo  $C$ , uma vez que percebe-se a presença de um aglomerado estelar central e muito pouca emissão nebular. Na área central, existe uma pequena nebulosidade em ambas as imagens, há várias CTTs e apenas um MYSO, mas que não está bem claro se está associado ao aglomerado central.

#### 3.4.17 G291.6-0.5 (NGC3603)

A. R.: 11h15m07s; Dec.: -61d15m37s (J2000)

Distância cinemática: 7,9 kpc;  $N_{LyC}$ :  $3,16 \times 10^{51}$  fótons  $s^{-1}$

NGC3603 tem uma distância determinada por paralaxe espectrofotométrica no visível por Melena et al. (2008). Eles realizaram um estudo detalhado do conteúdo estelar de NGC3603 e encontraram várias estrelas de tipo espectral O. Eles determinaram uma distância de 7,6 kpc. Utilizando isócronas, Stolte et al. (2004) determinaram uma distância de 6,0 kpc para esta região, que é um pouco menor que a distância determinada utilizando

técnicas cinemáticas ( $d = 7,9$  kpc obtida por Russeil, 2003).

Em ambas as imagens,  $JHK_s$  e Spitzer (Spitzer *PID*: 40791, Fig. 3.33), pode-se ver nebulosidade permeando um aglomerado estelar bem definido. Excetuando-se os objetos #6, #19 e #20, que estão demarcados na imagem no infravermelho próximo ( $JHK_s$ ), todos os demais objetos aqui citados estão localizados dentro do retângulo preto.

No aglomerado denso (#6, #10, #25, #29, #34, #49, #51, #55, #68 e #71) no centro da imagem estão as fontes ionizantes desta região. Todos os objetos na brilhante região central estão localizados dentro do retângulo vermelho no diagrama C-C e são brilhantes no diagrama C-M (Fig. 3.34). O objeto #6 está saturado em nossas imagens, então foi utilizada fotometria do 2MASS ( $J = 8,60$ ;  $H = 8,03$  and  $K_s = 7,72$  mag). O objeto #20 está na área das CTTs, e o objeto #19 está na área dos MYSOs.

O aglomerado estelar aparenta estar mais próximo de nós do que o previsto pela distância cinemática, dado que o topo da sequência principal fica abaixo dos objetos mais brilhantes. A presença deste aglomerado, alguma nebulosidade nas vizinhanças do aglomerado (como pode ser visualizado nas duas imagens), várias CTTs e alguns MYSOs indicam que esta região apresenta um estágio evolutivo entre os tipos *B* e *C*.

#### 3.4.18 G298.2-0.3

A. R.: 12h09m58s; Dec.: -62d50m00s (J2000)

Distância cinemática: 10,4 kpc;  $N_{LyC}$ :  $7,41 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.35, lado esquerdo), percebe-se a nebulosidade que permeia o aglomerado. Há um aglomerado bastante embebido e, na região central, algumas estrelas brilhantes. A imagem do Spitzer (*PID*: 189) mostra que esta região é bastante jovem. Foram detectados poucos objetos (Fig. 3.36) que possam ser associados com o aglomerado embebido. O melhor candidato a fonte ionizante desta região é o objeto #4. Este objeto aparenta estar menos afetado pela nebulosidade que os demais (diagrama C-C, Fig. 3.36). Como pode ser visto, este objeto está na linha de visada da nebulosidade, e aparenta estar circundado por ela. Os objetos #5, #10, #21, #58 e #26 são estrelas quentes afetadas por extinção. O objeto #32 está próximo à linha de avermelhamento de estrelas quentes no diagrama C-C. O objeto #23 é um objeto brilhante localizado na área das CTTs.

Como pode ser visto na imagem colorida no infravermelho próximo, o aglomerado de estrelas (#21, #23 e #32) é pequeno e muito denso, isto pode significar que sua distância verdadeira é grande, como sugerido pelos resultados cinemáticos. Os objetos mais brilhantes podem estar na linha de visada, não pertencendo à esta região de formação estelar. Além de serem mais evoluídos, o que poderia explicar a discrepância com o topo da sequência principal. A presença de um aglomerado estelar com bastante nebulosidade indica que esta região está em um estágio evolutivo *B*.

#### 3.4.19 G298.9-0.4

A. R.: 12h15m25s; Dec.: -63d01m13s (J2000)

Distância cinemática: 10,4 kpc;  $N_{LyC}$ :  $7,41 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.37, lado esquerdo), há uma pequena nebulosidade e várias estrelas no campo de visão. Na linha de visada da pequena nebulosidade, existem algumas poucas estrelas. A imagem do Spitzer (*PID*: 189) mostra uma área vermelha brilhante ( $8,0 \mu\text{m}$ ) que coincide com a nebulosidade em  $\text{Br}\gamma$ .

O objeto #21 é bastante brilhante na imagem do Spitzer. A seleção das fontes ionizantes desta região não é óbvia. No diagrama C-M (Fig. 3.38), os objetos #12 e #13 estão na área esperada para fontes ionizantes de uma região de formação estelar. Entretanto, no diagrama C-C o objeto #13 está próximo à linha de avermelhamento de estrelas frias, assim é possível excluí-lo como fonte ionizante. O objeto #12 está próximo à linha de avermelhamento de estrelas quentes, sem excesso de emissão no infravermelho, mas sua conexão com a nebulosidade não é tão evidente quando inspecionado nas imagens coloridas. Por outro lado, o objeto #21, que é bastante brilhante e exibe grande excesso de emissão na banda  $K_s$ , é um candidato a MYSO.

Neste caso, é bastante difícil indicar estrelas associadas à nebulosidade. Os objetos mais brilhantes (#12 e #13) podem ser estrelas na frente desta região e projetadas em sua linha de visada. Desta forma, não está óbvio se a distância cinemática adotada aqui está correta ou não. A presença de emissão nebular, algumas CTTs com um candidato a MYSO, indica que esta região está no estágio evolutivo *A*.

### 3.4.20 G305.2+0.0

A. R.: 13h11m15s; Dec.: -62d45m20s (J2000)

Distância cinemática: 3,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $3,39 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Esta região foi dividida em duas partes (Fig. 3.39), e a fotometria foi extraída para os objetos dentro de ambos retângulos. Forte emissão nebulosa pode ser vista em ambas sub-regiões, principalmente em maiores comprimentos de onda (imagem do Spitzer). Mas, um aglomerado estelar não está perceptível. A nebulosidade torna-se mais evidente na imagem do Spitzer (*PID*: 189), onde em alguns locais a imagem ficou saturada. Também, há conchas e uma cavidade no canto inferior esquerdo (direção Sudeste, que também é evidente na imagem no infravermelho próximo).

Nos diagramas (Fig. 3.40) os objetos #134 e #266 apresentam cores bastante similares, enquanto que o objeto #126 aparenta ser uma estrela em primeiro plano projetada na linha de visada da nebulosidade. Os objetos #86, #125 e #252 aparentam ser objetos de fundo com grande quantidade de material nebuloso em sua frente. No diagrama C-C, o objeto #873 está na área dos MYSOs.

Nos diagramas (Fig. 3.40) existem dois conjuntos de objetos. Um em torno de  $H - K_s \approx 0,30$  mag e outro, mais espalhado, em torno de  $H - K_s \approx 0,75$  mag. Os candidatos a membros do aglomerado estão no segundo grupo de objetos dos diagramas, e o primeiro grupo de objetos é referente às estrelas de primeiro plano. Uma vez que não se percebe um aglomerado estelar bem definido, fica difícil analisar se a distância cinemática adotada está correta.

A ausência de um grande número de membros do aglomerado, a intensa emissão em Br $\gamma$  e a existência de, pelo menos, um MYSO (objeto #873) com algumas CTTs, é possível indicar que esta região está em um estágio evolutivo A.

### 3.4.21 G305.2+0.2

A. R.: 13h11m40s; Dec.: -62d33m09s (J2000)

Distância cinemática: 3,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $4,36 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Esta região aparenta ser razoavelmente evoluída, uma vez que a emissão nebulosa não é tão intensa e a presença de um rico aglomerado estelar é evidente. A nebulosidade é melhor vista na imagem do Spitzer (*PID*: 189), onde ela aparece circundando o aglomerado estelar.

Na verdade, esta é uma imagem maior, com  $\approx 10$  minutos de arco de lado (campo de visão do ISPI), mas a região do aglomerado estelar foi o foco deste estudo, mostrando uma área de  $\approx 2,0$  minutos de arco de lado (Fig. 3.41).

Nos diagramas (C-C and C-M, Fig. 3.42), nota-se que os objetos #38, #39, #40, #59 e #65 estão no local previsto para estrelas quentes da sequência principal afetados somente por extinção interestelar. Além disso, estas estrelas estão próximas da nebulosidade, como pode ser confirmado na imagem do Spitzer (Fig. 3.41, lado direito), o que indica que elas são candidatas a fontes ionizantes desta região H II.

Nos diagramas (Fig. 3.42), há dois grupos de objetos. Um em torno de  $H - K_s \approx 0,30$  e um outro em torno de  $H - K_s \approx 0,75$ . Os membros do aglomerado estelar estão no segundo grupo de objetos, enquanto que o primeiro grupo corresponde a objetos de primeiro plano em sua linha de visada. Há alguns objetos com excesso na banda  $K_s$ . Os objetos #129 e #174 seguem as linhas de avermelhamento para estrelas com fotosferas “nuas”, enquanto que o objeto #134 apresenta um excesso em emissão na banda  $K_s$  e está próximo da área das CTTs.

O diagrama C-M indica que a distância real do aglomerado coincide ou pode ser um pouco maior que a cinemática. O aglomerado estelar bem definido com emissão nebular circundando-o, várias CTTs e alguns MYSOs indicam que esta é uma região em um estágio evolutivo entre os tipos *B* e *C*.

### 3.4.22 G308.7+0.6

A. R.: 13h40m12s; Dec.: -61d43m46s (J2000)

Distância cinemática: 4,8 kpc;  $N_{LyC}$ :  $3,89 \times 10^{48}$  fótons  $s^{-1}$

Ela aparenta ser uma região H II já evoluída, uma vez que os membros do aglomerado já são bem distinguíveis, e não se vê nebulosidade circundando o aglomerado estelar na imagem colorida no infravermelho próximo, nem na imagem do Spitzer (*PID*: 190). Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.43, lado esquerdo), há um aglomerado estelar bastante cerrado. Também é perceptível que esta região não está muito distante do Sol, uma vez que as estrelas podem ser individualmente distinguidas umas das outras e não estão fortemente avermelhadas pela extinção interestelar ( $H - K_s$  é menor que 1,0).

Nos diagramas (C-C e C-M), os objetos #28, #31, #44 e #51 estão no local esperado

para fotosferas “nuas” afetadas apenas de extinção interestelar. Além disso, estas estrelas estão projetadas próximas do centro do aglomerado e estão localizadas no primeiro grupo de objetos com  $H - K_s \approx 0,2$ . Há um segundo grupo de objetos em torno de  $H - K_s = 0,8$ . Neste segundo grupo de objetos, estão as estrelas #4, #9 e #22. Os objetos #4 e #22 estão afetados somente pela extinção interestelar, mas o objeto #9 apresenta um excesso de emissão na banda  $K_s$  como pode ser visto no diagrama C-C (Fig. 3.44, lado esquerdo). A ausência de nebulosidade é uma indicação da idade avançada do aglomerado. Os objetos #1 e #4 estão saturados em nossas imagens, então obtivemos suas magnitudes através do catálogo do 2MASS. Entretanto, eles aparentam ser objetos no primeiro plano na linha de visada do aglomerado.

No diagrama C-M, percebe-se que a localização da sequência principal está em concordância com nossos dados observacionais, o que indica que a distância cinemática adotada pode estar correta. Esta região apresenta um aglomerado estelar muito bem definido, não há nebulosidade em ambas as imagens coloridas e há algumas poucas CTTs. Assim, esta região está no estágio evolutivo *D*.

### 3.4.23 G320.1+0.8 (RCW87)

A. R.: 15h05m25s; Dec.: -57d30m57s (J2000)

Distância cinemática: 2,7 kpc;  $N_{LyC}$ :  $7,08 \times 10^{48}$  fótons  $s^{-1}$

RCW87 aparenta ser uma jovem região H II, uma vez que os membros do aglomerado ainda estão circundados por emissão nebular (Fig. 3.45). Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.45, lado esquerdo), pode ser visto um aglomerado estelar denso e uma nebulosa em forma de bolha é facilmente perceptível na imagem do Spitzer (*PID*: 190). Na imagem do Spitzer, a contribuição do gás é mais evidente e as estrelas #3 e #15 são pontos brilhantes em azul (canal de  $4,5 \mu\text{m}$ ). Os diagramas (C-C e C-M) indicam que os objetos #9 e #14 estão no local esperado para objetos com fotosferas “nuas”, mas somente o objeto #14 está próximo ao centro da região H II, o que pode indicar que este objeto é uma das fontes ionizantes desta região H II.

Há objetos brilhantes na banda  $K_s$  com excesso de emissão no infravermelho: #3, #15 e #106. No diagrama C-C, o objeto #10 está bem próximo à linha de avermelhamento de estrelas frias. No diagrama C-C é possível ver que o objeto #106 está próximo à linha

de avermelhamento de estrelas quentes. O objeto #3 está na área das CTTs. O objeto #15 é bastante brilhante na banda  $K_s$  e apresenta um grande excesso de emissão no infravermelho. Uma vez que ele não foi detectado na banda  $J$ , foi adotada uma magnitude limite para uma detectabilidade de 90%,  $J = 17,0$  mag. Sua posição real no diagrama C-C segue a seta e ele seria um MYSO.

A concordância entre a distância cinemática (linha da sequência principal) e os dados observacionais não é tão óbvia neste caso. A presença de um aglomerado, nebulosidade em ambas as imagens, e um MYSO com várias CTTs também presentes, indicam que esta região está no estágio evolutivo  $B$ .

#### 3.4.24 G320.3-0.2

A. R.: 15h09m59s; Dec.: -58d17m26s (J2000)

Distância cinemática: 12,6 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,29 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Nesta região não há forte emissão nebulosa na imagem colorida no infravermelho próximo. Também, não se nota um aglomerado estelar. Contudo, na imagem do Spitzer (Spitzer *PID*: 190, Fig. 3.47, lado direito), pode-se encontrar nebulosidade, principalmente em 8,0  $\mu\text{m}$  (vermelho).

Nos diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.48), os objetos #4 e #6 aparentam estar no local esperado para estrelas na sequência principal, mas eles não aparentam ser de tipo espectral O (diagrama C-C), e são afetadas somente pelo avermelhamento interestelar. Entretanto, ambos objetos estão saturados em nossas imagens, desta forma, foi utilizada fotometria do 2MASS para estes objetos. Além disso, estas estrelas estão próximas da nebulosidade, como pode ser visto na imagem do Spitzer (Fig. 3.47, lado direito). O objeto #13 apresenta um alto avermelhamento e é brilhante na banda  $K_s$ , mas olhando no diagrama C-C (Fig. 3.48, lado esquerdo) percebe-se que este objeto não exibe excesso de cor no infravermelho. Na verdade, estes objetos (#4, #6, #13, e também os objetos #55 e #142) podem estar na frente desta região e em sua linha de visada, projetada na direção da nebulosidade.

A ausência de um aglomerado, junto com a emissão nebulosa vista na imagem do Spitzer, indica que esta região parece estar mesmo mais distante, como indicado pelos resultados fotométricos, e as estrelas mais brilhantes podem estar em primeiro plano e em sua linha de visada. Mas ainda não está claro se o valor da distância cinemática está correto. Uma vez

que não se vê o aglomerado estelar, há pouca nebulosidade na imagem no infravermelho próximo e bastante na imagem do Spitzer e não há MYSOs é possível indicar que esta região está no estágio evolutivo *A* ou *B*.

#### 3.4.25 G322.2+0.6 (RCW92)

A. R.: 15h18m39s; Dec.: -56d38m49s (J2000)

Distância cinemática: 4,0 kpc;  $N_{LyC}$ :  $3,31 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.49), há um aglomerado com pouca nebulosidade e, na imagem do Spitzer (*PID*: 146) a nebulosidade domina todo o campo de visão.

Os objetos #1, #4, #6, #7 e #9 parecem pertencer ao aglomerado, como pode ser visto na imagem colorida no infravermelho próximo e suas localizações nos diagramas. Os objetos #2, #3 e #8 são provavelmente objetos em primeiro plano e em sua linha de visada. Enquanto que os objetos #6 e #9 apresentam excesso na banda  $K_s$  e estão na área das CTTs. O objeto #7, também apresenta um excesso na banda  $K_s$ , mas é mais acentuado; nos diagramas ele se comporta como um MYSO.

A pouca nebulosidade na banda  $K_s$  e a alta nebulosidade no infravermelho médio podem indicar uma grande distância, mas não está claro se o valor da distância cinemática está correto. O aglomerado estelar, a presença de CTTs e um MYSO, com a forte nebulosidade que se vê na imagem do Spitzer indicam que esta região está em um estágio evolutivo do tipo *A* para *B*.

#### 3.4.26 G327.3-0.5 (RCW97)

A. R.: 15h53m02s; Dec.: -54d35m16s (J2000)

Distância cinemática: 3,0 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,38 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

RCW97 aparenta ser uma região não muito evoluída como pode ser visto nas imagens (Fig. 3.51), de fato não é possível identificar um aglomerado estelar bem definido. Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.51) há emissão nebular e algumas estrelas não pertencentes ao aglomerado, mas que estão em primeiro plano projetadas na linha de visada. Contudo, esta região é provavelmente mais complexa do que o que sugere a imagem no infravermelho próximo. Ela pode ser um aglomerado com uma cortina escura correndo

pelo meio do campo de visão. De fato, a imagem do Spitzer (*PID*: 191) mostra uma bolha de gás e poeira na direção Nordeste e outra menor próxima do centro da imagem, e uma terceira na posição do objeto #5. Isto pode indicar a ação de estrelas de alta massa.

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.52) indicam que os objetos #13 e #36 são mais azuis que os objetos #2 e #5, o que sugere que estes objetos estão à frente desta região e que não estão a ela conectados. Além disso, os objetos #2 e #5 estão próximos da nebulosidade, e no diagrama C-C eles não exibem excesso na banda  $K_s$ . O objeto #2 está próximo à linha de avermelhamento de estrelas frias, enquanto que #5 e #19 estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes. Estes fatos indicam que #5 e #19 podem ser as fontes ionizantes desta região H II. O objeto #23 pode estar por trás, em um segundo plano e sem conexão com esta região, enquanto que os objetos #16 e #87 (não detectado na banda  $J$ ) apresentam grande excesso de emissão no infravermelho e são MYSOs, apesar de #87 não ser muito brilhante na banda  $K_s$ . Para esta região, a magnitude limite para uma detectabilidade de 90% na banda  $J$  é de  $J = 16,0$  mag.

Nesta região, a distância cinemática adotada aparenta estar em concordância com os dados observacionais. A nebulosidade no infravermelho próximo e a imagem do Spitzer, mais a ausência de um aglomerado, algumas CTTs e alguns poucos MYSOs indicam que esta região está em um estágio evolutivo do tipo *A*.

### 3.4.27 G331.5-0.1

A. R.: 16h12m07s; Dec.: -51d27m03s (J2000)

Distância cinemática: 10,8 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,45 \times 10^{51}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho existem duas regiões com estrelas embebidas. Há um pequeno aglomerado estelar que é dominado pelos objetos #3, #19, #57, #52, #61, #68, #69 e #71. E, na direção Sul da imagem, estão os objetos #1, #2, #99 e #100. A maior parte dos objetos, em ambas as regiões, é composta de objetos no primeiro plano e que estão desconectados da região. Pode-se ver nebulosidade na imagem no infravermelho próximo e na imagem do Spitzer (*PID*: 191), mas a presença de um aglomerado estelar não é clara. Na imagem do Spitzer há algumas cavidades, o que pode indicar a ação dos ventos de estrelas de alta massa sobre o material nebuloso.

Os objetos #1, #2 e #3 estão saturados em nossos dados. Utilizando fotometria do

catálogo do 2MASS: para a estrela #1:  $J = 9,14$ ;  $H = 6,94$  and  $K_s = 5,88$  mag. Para a estrela #2:  $J = 13,10$ ;  $H = 9,66$  and  $K_s = 7,84$  mag. E para a estrela #3:  $J = 10,04$ ;  $H = 8,50$  and  $K_s = 7,96$  mag. Nenhum destes objetos apresenta excesso de cor. Por outro lado, o objeto #100 tem um grande excesso em emissão na banda  $K_s$  (diagrama C-C, Fig. 3.54, lado esquerdo), e é bastante brilhante na imagem do Spitzer, o que sugere que ele é um MYSO.

O topo da sequência principal é menos brilhante que os objetos mais brilhantes e que são candidatos a serem membros do aglomerado (por exemplo: #57, #58, e #61), o que indica que este aglomerado pode estar muito mais perto de nós do que o previsto pelos resultados cinemáticos. Esta região não tem muitas CTTs, entretanto, os objetos #52 e #100 são MYSOs. Estas informações indicam que esta é uma região no estágio evolutivo A.

#### 3.4.28 G333.1-0.4

A. R.: 16h21m03s; Dec.:  $-50^{\circ}36'19''$  (J2000)

Distância cinemática: 3,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,20 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Figuerêdo et al. (2005) realizaram um estudo detalhado do conteúdo estelar desta região. Os objetos #1 e #2 foram identificados como sendo de tipo espectral O (O5V-O7V e O7V-O9V, respectivamente). Eles utilizaram espectros na banda  $K_s$  destes objetos para determinar uma distância espectrofotométrica desta região. Figuerêdo et al. (2005) determinaram uma distância de  $2,6 \pm 0,2$  kpc, o que é menor que o valor determinado pelo método cinemático.

A Fig. 3.55 (reproduzido de Figuerêdo et al., 2005) mostra o aglomerado de estrelas na base da imagem, com alguns objetos ainda muito embebidos no topo da imagem. A imagem do Spitzer ( $PID$ : 191) mostra emissão nebulosa e alguns objetos brilhantes (candidatos a MYSOs). A Fig. 3.56 mostra os resultados fotométricos na forma de diagramas C-C e C-M. Os objetos #10 e #11 estão na área das CTTs. Também, esta região tem vários MYSOs, por exemplo os objetos #4, #6, #9, #13, #14, #18, #416, #472, #488 e #598. O objeto #18 tem um grande excesso de emissão no infravermelho, ele é bastante brilhante na imagem do Spitzer, e não foi detectado na banda  $J$ . Sua magnitude adotada para esta banda foi de  $J = 18,0$  mag, que é a magnitude limite para uma detectabilidade de 90%

nesta banda e para esta região.

A linha de sequência principal aparenta ajustar bem nossos dados, mas a menor distância determinada por paralaxe espectrofotométrica é mais confiável (Figuerêdo et al., 2005). A presença de nebulosidade na imagem no infravermelho próximo e na imagem do Spitzer, a presença de um aglomerado bem definido, algumas CTTs e uma grande porcentagem de objetos candidatos a MYSOs indicam que esta região está em um estágio evolutivo do tipo *B*.

#### 3.4.29 G333.3-0.4

A. R.: 16h21m32s; Dec.: -50d26m23s (J2000)

Distância cinemática: 3,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,10 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Nesta região H II existem duas regiões de emissão nebulosa, uma ao Norte e outra menor ao Sul. Na imagem do infravermelho próximo há pouca nebulosidade, mas aparenta existir um aglomerado pequeno e bastante embebido em torno do objeto #36. Na imagem do Spitzer (Spitzer *PID*: 191, Fig. 3.57, lado direito), a nebulosidade domina todo o campo com algumas estrelas em primeiro plano.

No diagrama C-M (Fig. 3.58, lado direito), os objetos #1, #2 e #4 estão no local esperado para estrelas de tipo O e na sequência principal. O objeto #36 apresenta um alto avermelhamento e é brilhante na banda  $K_s$ , mas olhando no diagrama C-C (Fig. 3.58, lado esquerdo) vê-se que este objeto não se comporta como MYSOs.

A nebulosidade fraca no infravermelho próximo e elevada no infravermelho médio indica uma distância elevada. Mas, devido à ausência de um aglomerado bem definido, ainda não está claro se a distância cinemática é correta. Nesta região há várias CTTs e MYSOs. A região é melhor descrita como sendo de estágio evolutivo *A*.

#### 3.4.30 G333.6-0.2

A. R.: 16h22m12s; Dec.: -50d05m56s (J2000)

Distância cinemática: 3,1 kpc;  $N_{LyC}$ :  $2,69 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Becklin et al. (1973) apontaram que esta é uma das regiões H II mais luminosas da Galáxia nos intervalos de comprimentos de onda entre 1 e 25  $\mu\text{m}$  (apresentando algo como  $5 \times 10^5 L_{\odot}$ , neste intervalo). Esta região apresenta um alto obscurecimento ( $A_V \sim 21$ ,

Rubin, Hollenbach e Erickson, 1983) e é bastante difícil associar um aglomerado estelar à esta região. Hyland et al. (1980) sugeriram que esta região é, na verdade, uma fonte ‘blister’, uma vez que tem uma grande luminosidade intrínseca e apresenta um baixo grau de ionização.

A imagem colorida no infravermelho próximo exhibe muitas estrelas de campo e uma nebulosidade brilhante na região central. Na imagem do Spitzer (*PID*: 191), pode ser visto principalmente o material nebuloso com alguns objetos em primeiro plano e sem associação com esta região (Fig. 3.59, lado direito).

As imagens e diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.60) indicam a presença de dois grupos de objetos, um em torno de  $H - K_s = 0,5$  e um segundo em torno de  $H - K_s = 2,0$ . Ao primeiro grupo de objetos estão associados os membros do aglomerado, enquanto que o segundo grupo (#2, #12 e #25) parece ser composto de objetos em um segundo plano e sem conexão com a região. Também, o objeto #4 tem excesso de emissão no infravermelho e junto com os objetos #10 e #29 está dentro da área brilhante. Como pode ser visto na imagem no infravermelho próximo, a emissão nebulosa é bastante intensa nesta região. Os objetos #4 e #10 aparentam ser MYSOs. Os objetos #7, #16 e #24 estão próximos da linha de avermelhamento de estrelas frias, e os objetos #5, #6, #9, #15, #19, e #55 estão próximos da linha de avermelhamento de estrelas quentes, mas não está claro se existe realmente alguma estrela associada à região H II.

Os objetos mais brilhantes e que estão na linha de visada da nebulosidade (#4 e #10) são ainda mais brilhantes, se desavermelhados, que o topo da sequência principal, mas são MYSOs. Assim, nossos dados não permitem checar a distância cinemática. A intensa nebulosidade no infravermelho próximo e na imagem do Spitzer, a ausência de um aglomerado, a presença de algumas CTTs e alguns MYSOs indicam que esta é uma região de tipo evolutivo A.

### 3.4.31 G336.5-1.5 (RCW108)

A. R.: 16h39m58s; Dec.: -48d52m38s (J2000)

Distância cinemática: 1,5 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,95 \times 10^{48}$  fótons  $s^{-1}$

RCW108 é uma região que exhibe forte emissão nebulosa, tanto no infravermelho próximo como no infravermelho médio (Spitzer *PID*: 112). Devido a esta intensa nebulosidade, é

difícil identificar seu conteúdo estelar.

Um exame cuidadoso nas imagens e diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.64) sugere que os objetos #1 e #18 estão próximos da linha de avermelhamento de estrelas quentes. O objeto #8 está próximo da linha de avermelhamento de estrelas frias, e os objetos #40 e #71 aparentam ser estrelas em um segundo plano e sem conexão com a região. O objeto #27 é uma estrela no primeiro plano. Os objetos #3 e #4 estão próximos a brilhante área central, como pode ser visto nas imagens (Fig. 3.63). Contudo, o objeto #3 apresenta um alto excesso de emissão no infravermelho, é brilhante na banda  $K_s$  e está na área dos MYSOs do diagrama C-C (Fig. 3.64, lado esquerdo). Os objetos #4 e #15 situam-se na área das CTTs.

Se os objetos que se comportam como a estrela #1 forem membros do aglomerado, então a linha da sequência principal pode estar em uma posição correta. O que implica que a distância cinemática pode estar correta. A presença de intensa emissão nebulosa no infravermelho próximo e na imagem do Spitzer, o pequeno aglomerado estelar na área central, alguns MYSOs e várias CTTs indicam que esta é uma região no estágio evolutivo *A* para *B*.

### 3.4.32 G336.8-0.0

A. R.: 16h34m37s; Dec.: -47d36m48s (J2000)

Distância cinemática: 10,9 kpc;  $N_{LyC}$ :  $1,66 \times 10^{50}$  fótons  $s^{-1}$

Na imagem colorida no infravermelho próximo existe pouca nebulosidade, enquanto que na imagem do Spitzer (*PID*: 191) a nebulosidade é mais intensa, incluindo uma brilhante área compacta que domina o campo. Em nenhuma das imagens pode-se ver um aglomerado estelar bem definido (Fig. 3.61).

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.62) indicam que os objetos #4, #5, #6, #10 e #22 aparentam estar no local esperado para estrelas de tipo espectral O na sequência principal e são afetadas somente pela extinção interestelar. Também, os objetos #8, #23 e #29 estão na linha de visada do pequeno aglomerado de estrelas embebidas e estão na área das CTTs. Mas, estas estrelas não parecem ser ligadas à região H II. O objeto #7 é provavelmente um objeto no primeiro plano. Os objetos #55 e #68 estão do lado direito da linha de avermelhamento das CTTs, indicando excessos de emissão na banda  $K_s$ , mas

eles não aparecem na imagem do Spitzer.

Devido à ausência de um aglomerado, e uma pequena nebulosidade, esta região aparenta estar bastante distante o que pode indicar que a distância cinemática adotada pode ser correta. Todos os objetos brilhantes são objetos em um primeiro plano. Não há um aglomerado bem definido, há alguma nebulosidade nas imagens e a presença de algumas CTTs e dois candidatos a MYSOs indicam que esta é uma região no estágio evolutivo *A*.

### 3.4.33 G348.7-1.0 (RCW122)

A. R.: 17h20m06s; Dec.: -38d57m37s (J2000)

Distância cinemática: 2,7 kpc;  $N_{LyC}$ :  $4,26 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Nesta região, a presença de um aglomerado estelar não é clara. A emissão nebular é bastante intensa e as fontes ionizantes aparentam estar por trás da nuvem escura. A maior parte das estrelas na imagem colorida no infravermelho próximo estão no primeiro plano, como pode ser visto no diagrama C-C (Fig. 3.66, lado esquerdo). A componente de fundo é bastante difícil de visualizar devido ao forte obscurecimento. Na imagem do Spitzer (Fig. 3.65, lado direito), há intensa nebulosidade associada às fontes com excesso no infravermelho. Na parte escura da imagem no infravermelho próximo, existem fontes pontuais na imagem do Spitzer (*PID*: 192) o que sugere que o aglomerado está escondido por uma nuvem escura em nossa linha de visada.

Os diagramas C-C e C-M indicam um grupo de objetos em torno de  $H - K_s = 0,3$  (#1, #4, #6, #9, #10, #16 e #22) que aparenta estar no primeiro plano e desconectado da região. Os objetos #2, #7, #18 e #21 estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes. Os objetos #3, #8, #11 e #20 estão na área das CTTs. O objeto #5 é um MYSO. O objeto #1 aparenta ser uma estrela no primeiro plano e não está na linha de visada da nebulosidade.

A linha da sequência principal aparenta ajustar bem os dados fotométricos, o topo desta linha é mais brilhante que os objetos associados à nebulosidade. Os diagramas C-C e C-M (Fig. 3.66) mostram que esta região tem várias CTTs e alguns MYSOs, junto com o fato de que há nebulosidade e ausência de um aglomerado estelar bem definido, indicando que esta região está no estágio evolutivo de *A* para *B*.

### 3.4.34 G351.2+0.7

A. R.: 17h20m04s; Dec.: -35d56m10s (J2000)

Distância cinemática: 1,2 kpc;  $N_{LyC}$ :  $4,26 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

Esta é uma região H II parcialmente obscurecida e é parte do complexo de regiões NGC6334 (Moran et al., 1990). Ela é descrita como uma concha de emissão rádio (Jackson e Kraemer, 1999) com um raio de cerca de 0,5 pc. Nenhuma fonte foi detectada no centro desta concha ou como uma fonte ionizante desta concha (Jackson e Kraemer, 1999). Ela aparenta ser bastante jovem. Uma nuvem molecular escura pode ser vista na direção Sudoeste. Este aglomerado estelar está varrendo e erodindo o material em sua volta (Fig. 3.67, lado esquerdo). A imagem do Spitzer (Spitzer *PID*: 20201, Fig. 3.67, lado direito) também exibe nebulosidade.

Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.68) indicam um grupo de objetos em  $H - K_s = 0,3$ : #16, #18, #20, #23, #24, #27, #28, #32 e #59. Os objetos #18, #24, #23 e #27 estão próximos da linha de avermelhamento de estrelas quentes. Além disso, estas estrelas estão próximas à linha de visada do aglomerado (Fig. 3.67, lado esquerdo). Ainda próximo à linha de avermelhamento de estrelas quentes, mas com um grande excesso de cor no infravermelho, estão os objetos: #7, #12 e #213. Alguns destes objetos devem ser as fontes ionizantes desta região H II. O objeto #7 está saturado, assim foi utilizada fotometria 2MASS. Os objetos #54, #75 e #82 aparentam ser estrelas em um segundo plano, e sem conexão com a região. Os objetos #11, #21, #29, #40, #82 e #83 estão mais próximos à linha de avermelhamento de estrelas frias. O objeto #111 apresenta um alto excesso de emissão na banda  $K_s$  (diagrama C-C, Fig. 3.68, lado esquerdo) e é provavelmente um MYSO. Os objetos #17, #42, #58 e #78 estão na área das CTTs.

O topo da linha da sequência principal é mais brilhante que os mais brilhantes objetos de nossos dados. Isto sugere que a distância cinemática adotada pode estar correta se for adicionada uma certa extinção. Ou esta região está um pouco mais afastada do que o previsto pelos resultados cinemáticos. A presença de um aglomerado de estrelas, nebulosidade em ambas as imagens, alguns MYSOs e várias CTTs indicam que esta região está em um estágio evolutivo de tipo *B*.

### 3.4.35 G353.2+0.6 (RCW131)

A. R.: 17h25m37s; Dec.: -34d21m26s (J2000)

Distância cinemática: 1,0 kpc;  $N_{LyC}$ :  $2,09 \times 10^{49}$  fótons  $s^{-1}$

RCW131 faz parte do complexo de regiões de formação estelar NGC6357 (Massi, Brand e Felli, 1997). Na imagem colorida no infravermelho próximo (Fig. 3.69, lado esquerdo), há um grande número de estrelas. Muitas delas são estrelas no primeiro plano, como pode ser visto nos diagramas. Na imagem do Spitzer (Spitzer *PID*: 20201, Fig. 3.69, lado direito) pode ser visto nebulosidade e algumas estruturas como pilares e filamentos, um resultado da ação de ventos de estrelas de alta massa.

Os objetos #01, #02, #4 e #7 estão saturados, desta forma foi utilizado fotometria do 2MASS. Os diagramas (C-C e C-M, Fig. 3.70) indicam a presença de dois distintos grupos de objetos, um em torno de  $H - K_s = 0,3$  e outro em torno de  $H - K_s = 1,5$ . Neste primeiro grupo, todos os objetos (#01, #02, #4, #7, #37, #41, #44, #54, #60, #65, #66, #76 e #157) estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes, exceto os objetos #02 e #54. Estes dois objetos estão espacialmente muito próximos um do outro, e suas magnitudes podem estar incorretas. As estrelas #68, #74 e #266 sofrem de alta extinção, mas são muito próximos à linha de avermelhamento de estrelas quentes. Além disso, estas estrelas estão muito próximas à nebulosidade (emissão em Brackett gama), isto indica que eles podem ser as fontes ionizantes desta região H II. Os objetos #19 e #33 estão próximos à linha de avermelhamento de estrelas frias. Os objetos #135 e #185 exibem avermelhamento e são brilhantes na banda  $K_s$ , mas suas posições no diagrama C-C indicam que elas também estão na área das CTTs.

O diagrama C-M mostra que o topo da linha da sequência principal é mais brilhante que os membros mais brilhantes desta região H II. Isto mostra que a distância cinemática pode estar correta, ou que se trata de uma região um pouco mais distante do que é sugerido por modelos cinemáticos. A presença de nebulosidade no infravermelho próximo e no infravermelho médio, várias possíveis estrelas de tipo espectral O com fotosferas “nuas”, algumas CTTs e alguns MYSOs indicam que esta região está no estágio evolutivo de tipo B.

### 3.5 Imagens e Diagramas C-C e C-M

Todas as imagens desta seção têm o Norte apontando para cima e o Leste para a esquerda. Aqui são apresentadas imagens coloridas no infravermelho próximo, onde a composição RGB é feita da seguinte forma:  $J$  está em azul,  $H$  está em verde e  $K_s$  está em vermelho. Também são apresentadas imagens coloridas no infravermelho médio do IRAC-Spitzer. As imagens do Spitzer foram combinadas em RGB da seguinte forma: o canal de  $4,5 \mu\text{m}$  está em azul, o de  $5,8 \mu\text{m}$  está em verde e o canal de  $8,0 \mu\text{m}$  está representado em vermelho.

Os resultados fotométricos estão apresentados na forma de diagramas cor-cor e cor-magnitude (C-C e C-M, respectivamente). Em todo o trabalho, as distâncias utilizadas são cinemáticas por questão de consistência. O vetor de avermelhamento é exibido em cada diagrama C-C e C-M. Em algumas regiões, a aparente discrepância entre a posição do topo da linha da sequência principal e os dados fotométricos é usada para sugerir, de forma qualitativa, se a região está mais próxima, mais distante ou sua distância cinemática concorda com os dados observacionais. Maiores detalhes são dados nas respectivas seções de cada região H II.

No diagrama C-C, há duas linhas de avermelhamento interestelar, uma para estrelas de tipo espectral M (Frogel et al., 1978, a linha superior), e outra para as de tipo espectral O (Koornneef, 1983, linha inferior). Para objetos com excesso de emissão no infravermelho, eles estarão deslocados em direção a grandes cores (no lado direito dos diagramas), na área das estrelas CTTs ou até mesmo fora dessa área, na região dos MYSOs. Os candidatos a MYSOs estão listados no Apêndice.

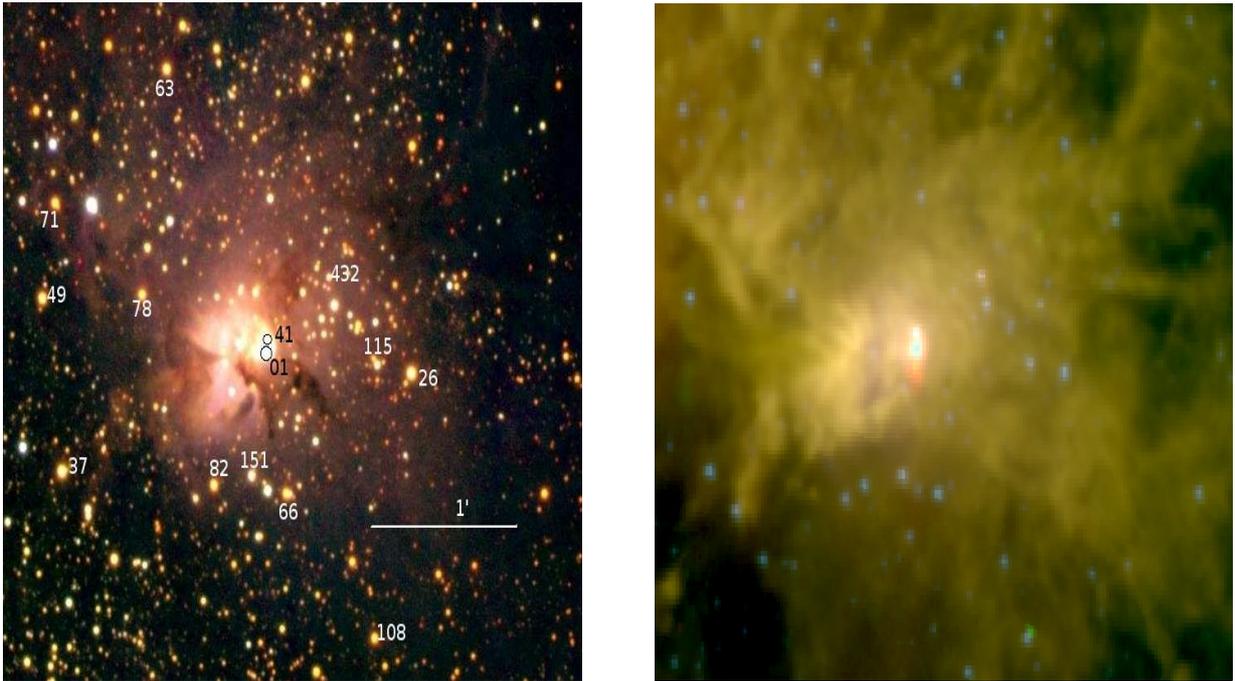


Figura 3.1: Imagens coloridas da região G5.97-1.18 (M8). Esquerda: imagem colorida composta ( $JHK_s$ ). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, os tamanhos são de  $\approx 3,0$  minutos de arco de lado.

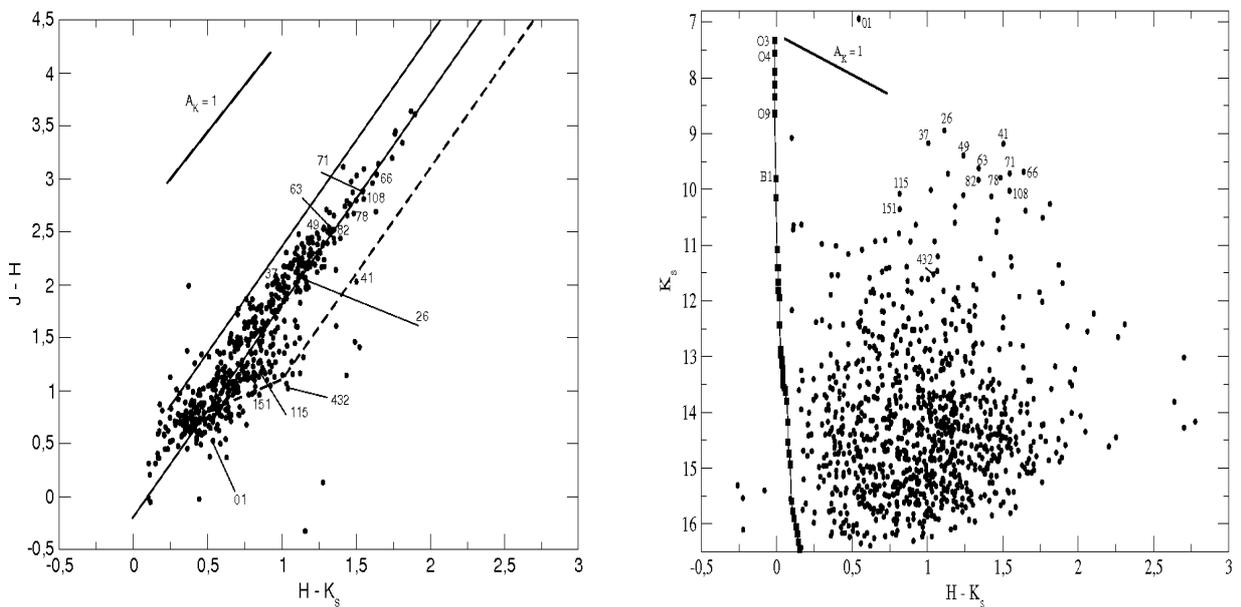


Figura 3.2: Região H II G5.97-1.18 (M8). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Sempre nestes diagramas, a posição da sequência principal (linha vertical no diagrama C-M) é afetada somente pela distância cinemática adotada (maiores detalhes no texto). Extinção e avermelhamento são exibidos para  $A_K = 1$ . As linhas de avermelhamento no diagrama C-C são de Straižys e Laugalys (2008).

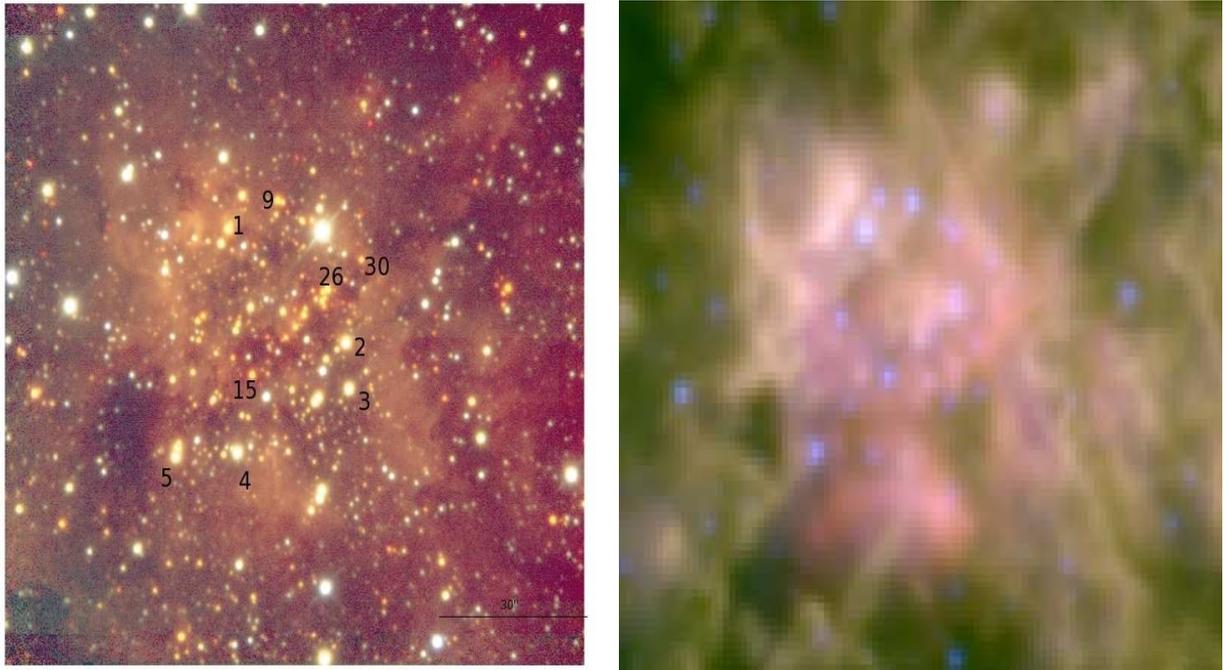


Figura 3.3: Imagens coloridas da região G10.2-0.3 (W31-Sul), reproduzidas de Blum et al. (2001). Esquerda: imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 1,8$  minutos de arco de lado.

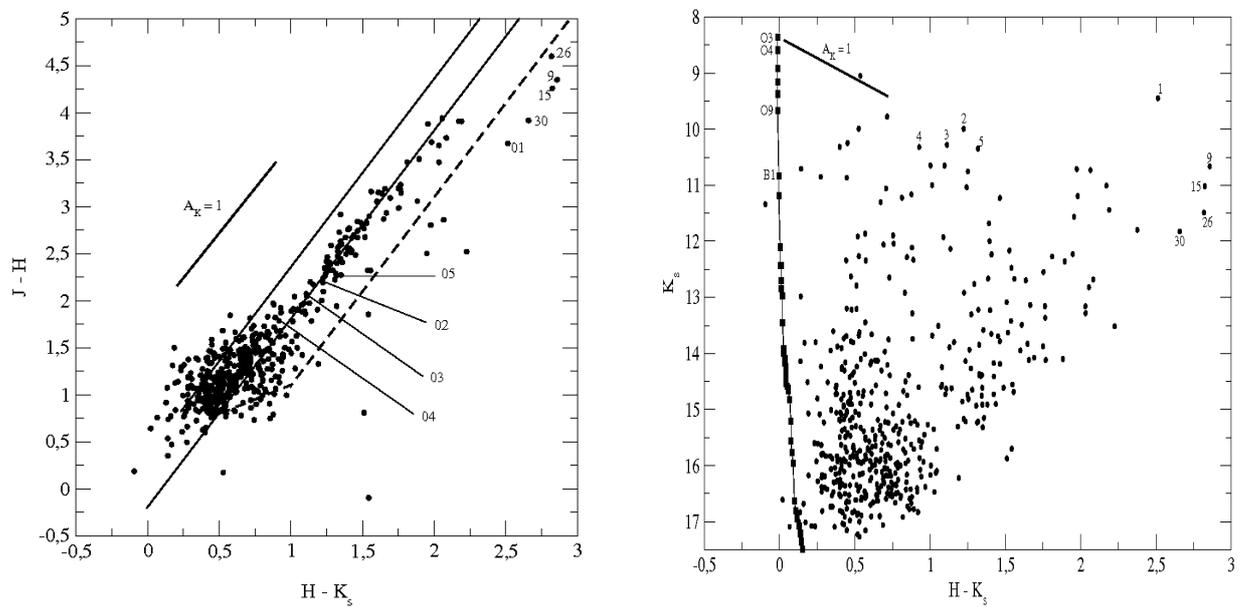


Figura 3.4: Região H II G10.2-0.3 (W31-Sul). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M), a distância cinemática adotada é de 4,5 kpc (Russeil, 2003). A fotometria é de Blum et al. (2001) e foi corrigida para o sistema fotométrico do 2MASS. Blum et al. (2001) utilizaram os objetos #1, #2 e #3 para determinar a distância espectrofotométrica para esta região ( $d_{spec.} = 3,4$  kpc).

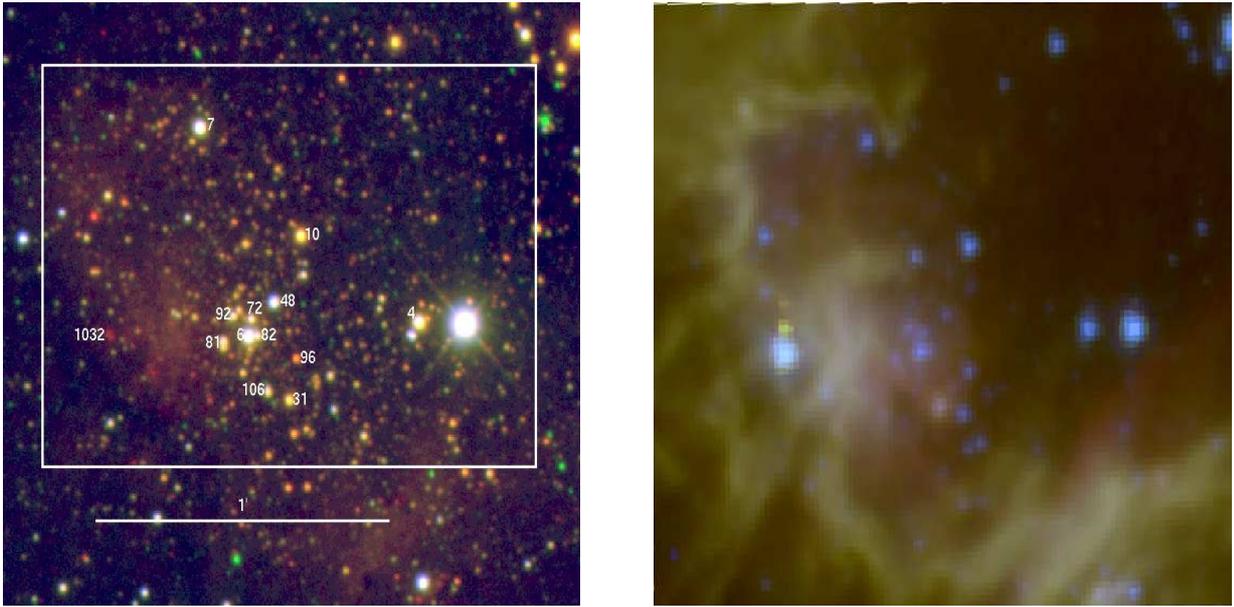


Figura 3.5: Imagens coloridas de G10.3-0.1 (W31-Norte). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é de  $\approx 2,0 \times 1,5$  minutos de arco.

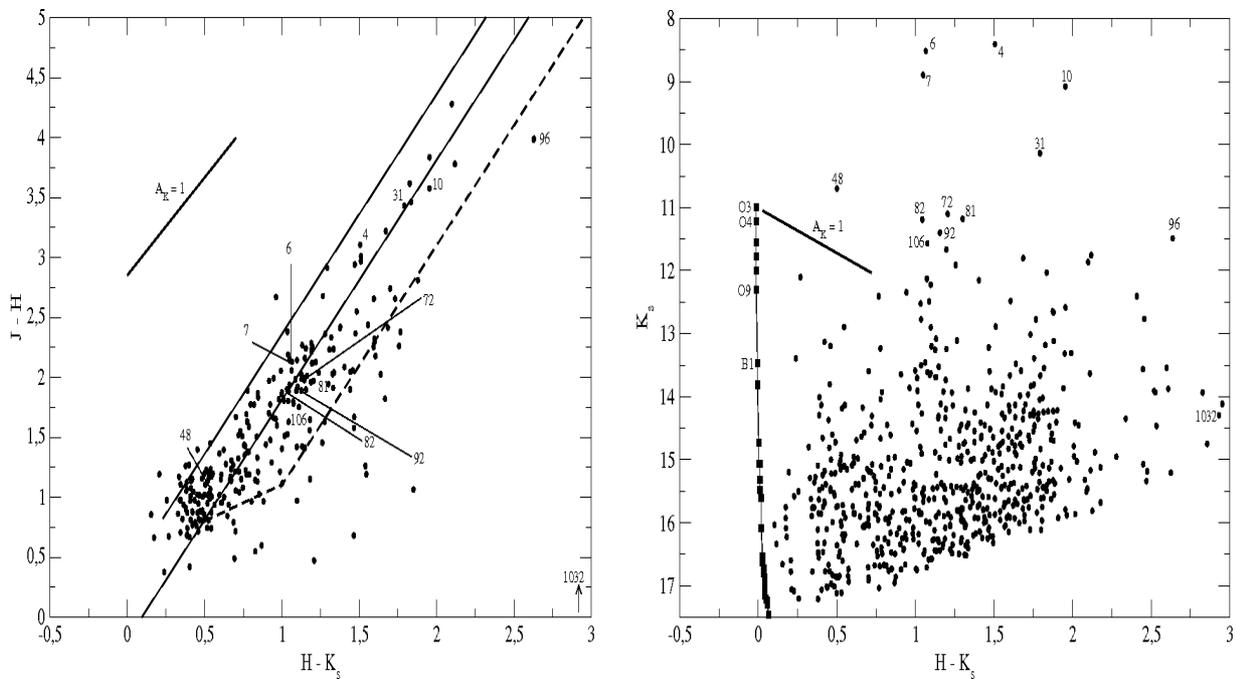


Figura 3.6: Região H II G10.3-0.1 (W31-Norte). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A fotometria foi obtida para as estrelas na caixa exibida na imagem colorida no infravermelho próximo. O objeto #1032 tem uma magnitude limite na banda  $J$  igual a 17,0 mag (veja no texto explicações sobre as magnitudes limites).

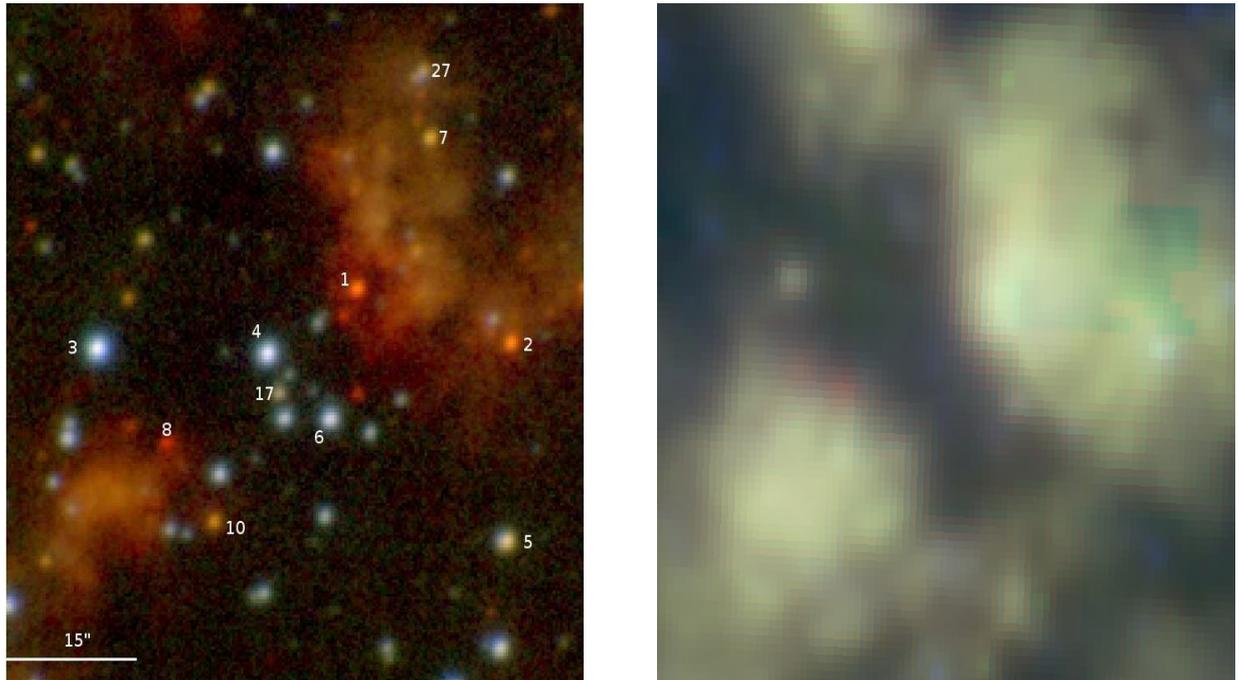


Figura 3.7: Imagens coloridas de G12.8-0.2 (W33). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Os tamanhos são de  $\approx 1,0$  minuto de arco de lado.

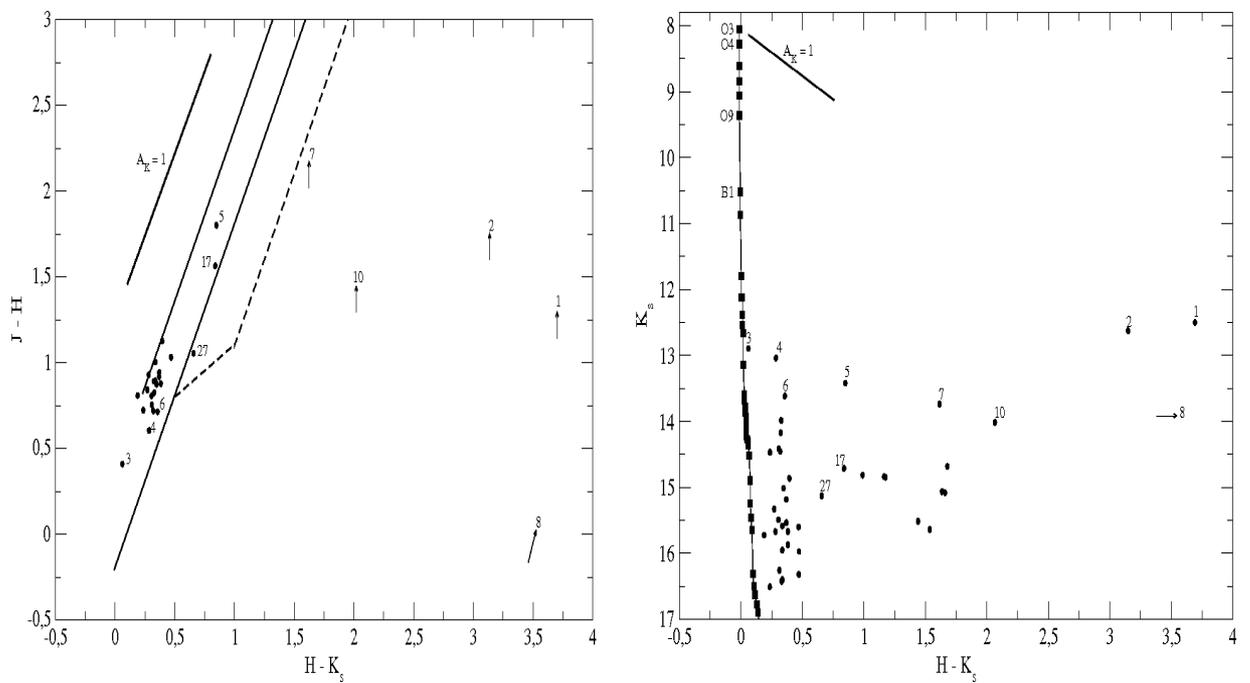


Figura 3.8: Região H II G12.8-0.2 (W33). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos não detectados estão exibidos (na ponta das setas) utilizando as magnitudes limites de  $J = H = 17,5$  mag.

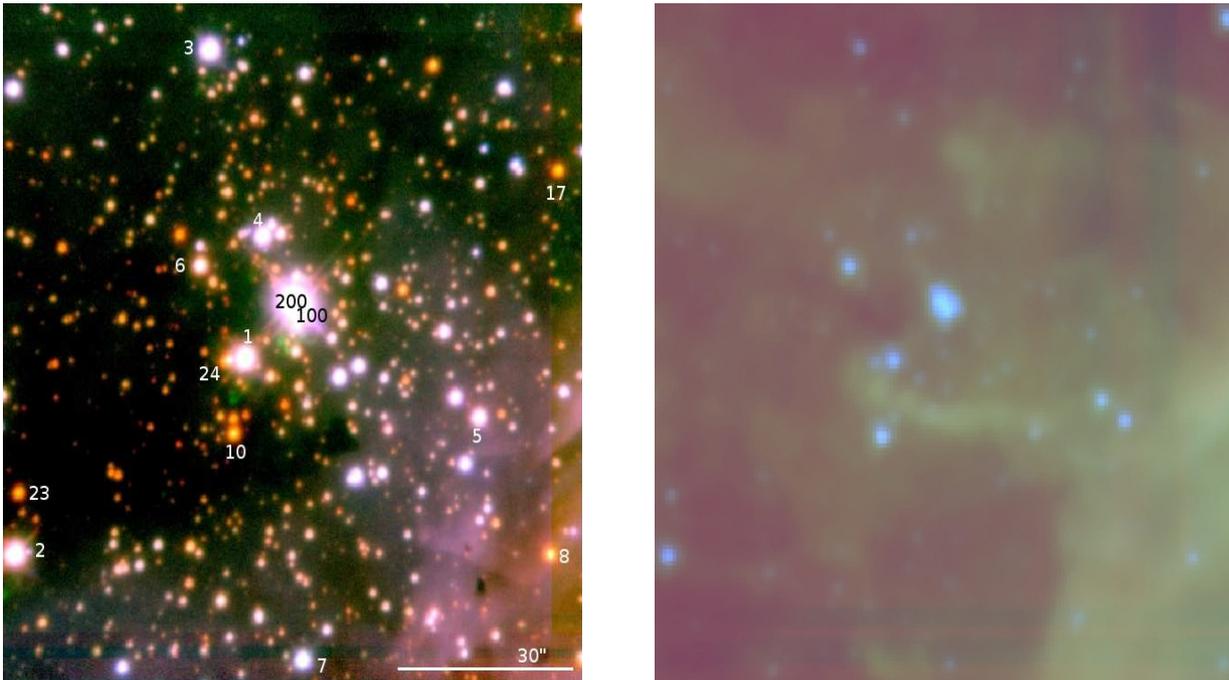


Figura 3.9: Imagens coloridas de G15.0-0.7 (M17). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, o tamanho é de  $\approx 1,5$  minutos de arco de lado.

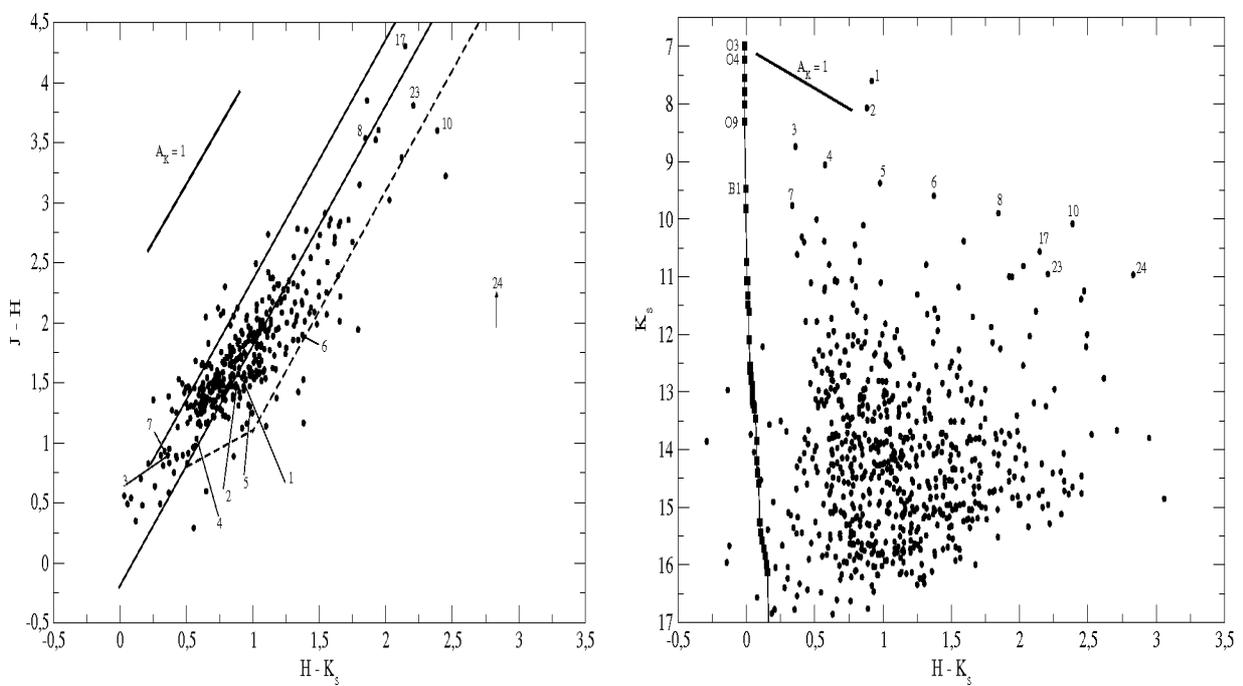


Figura 3.10: Região H II G15.0-0.7 (M17). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita Right: Diagrama cor-magnitude (C-M). O objeto #24 não foi detectado na banda  $J$ , então tivemos que adotar a magnitude limite  $J = 16,0$  mag.

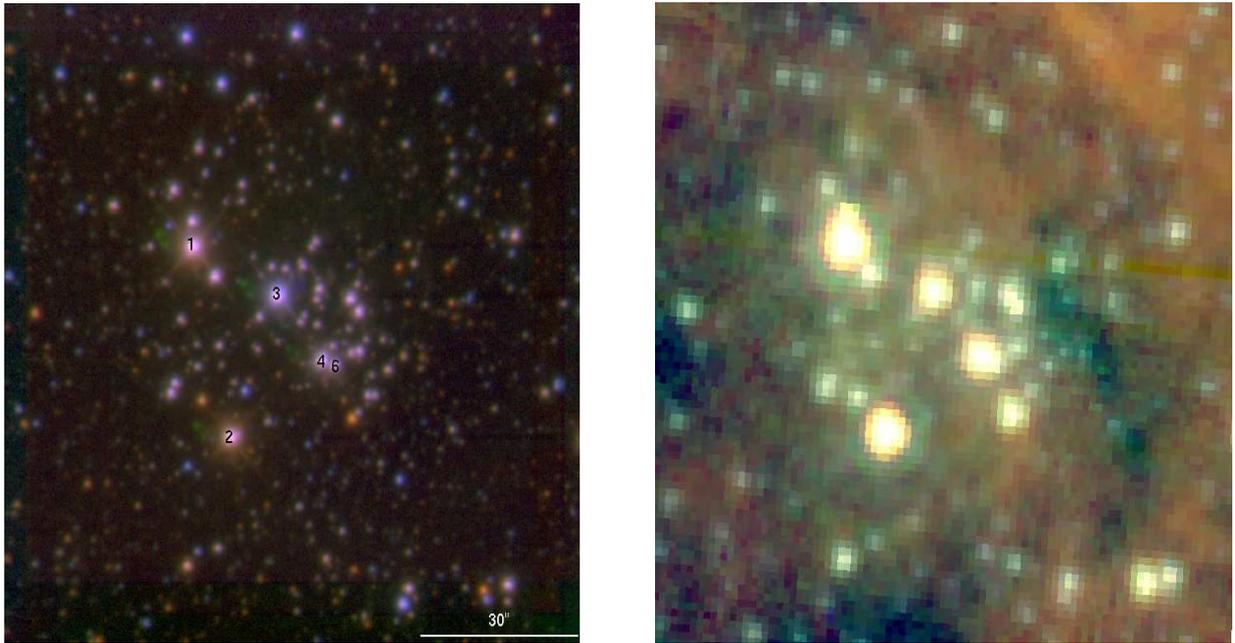


Figura 3.11: Imagens coloridas de G22.7-0.4. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. O tamanho é de  $\approx 2,0$  minutos de arco de lado. Não detectamos nebulosidade na imagem no infravermelho próximo, mas na imagem do Spitzer podemos ver uma fraca emissão nebulosa e que não está claramente conectada ao aglomerado.

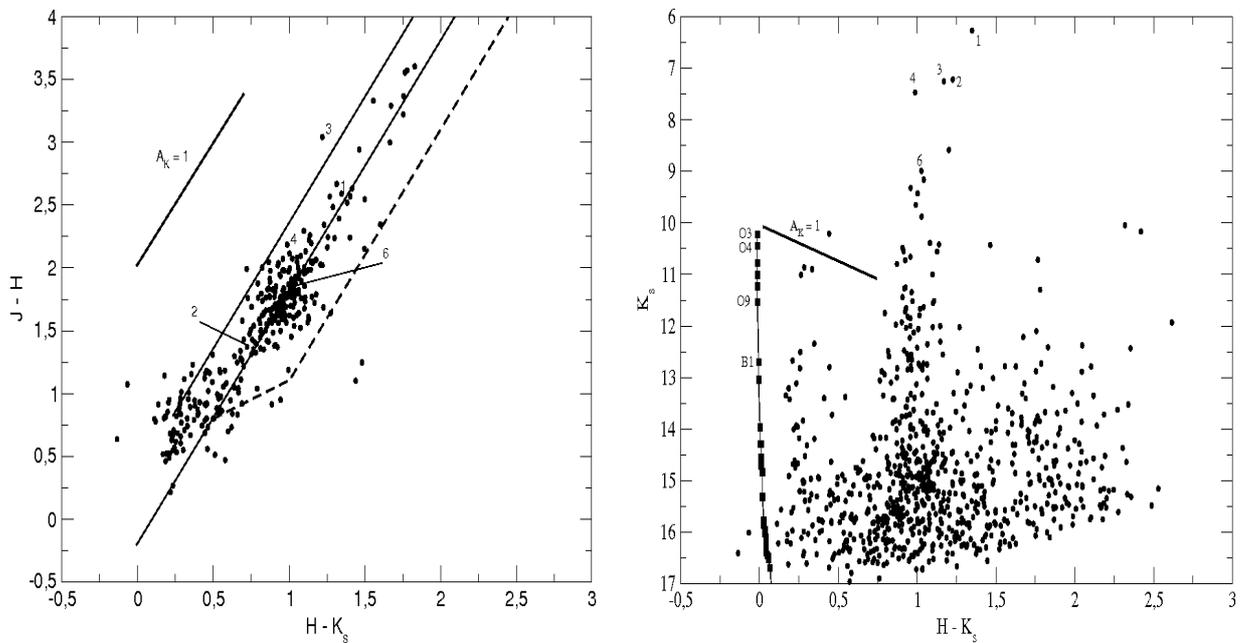


Figura 3.12: Região H II G22.7-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). No diagrama C-M, a distância cinemática aparenta ser maior do que o esperado pela fotometria. A ponta da sequência principal é menos brilhante que os objetos mais brilhantes do aglomerado.

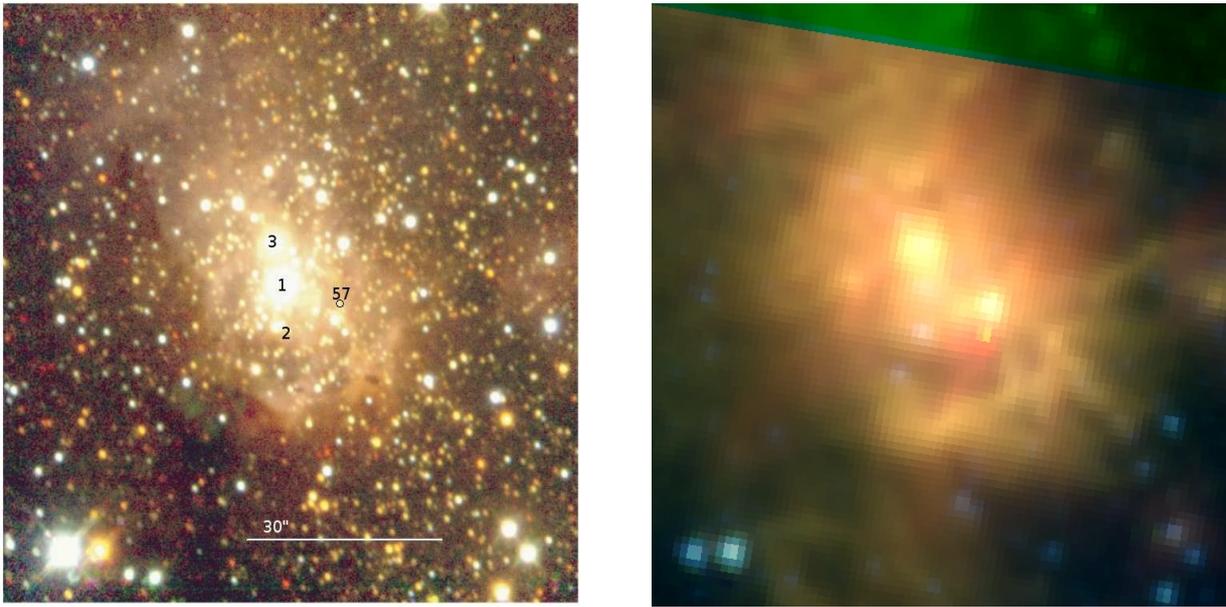


Figura 3.13: Imagens coloridas de G25.4-0.2 (W42). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ , reproduzida de Blum et al. (2000). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Nas imagens, os tamanhos são  $\approx 1,5$  minutos de arco de lado.

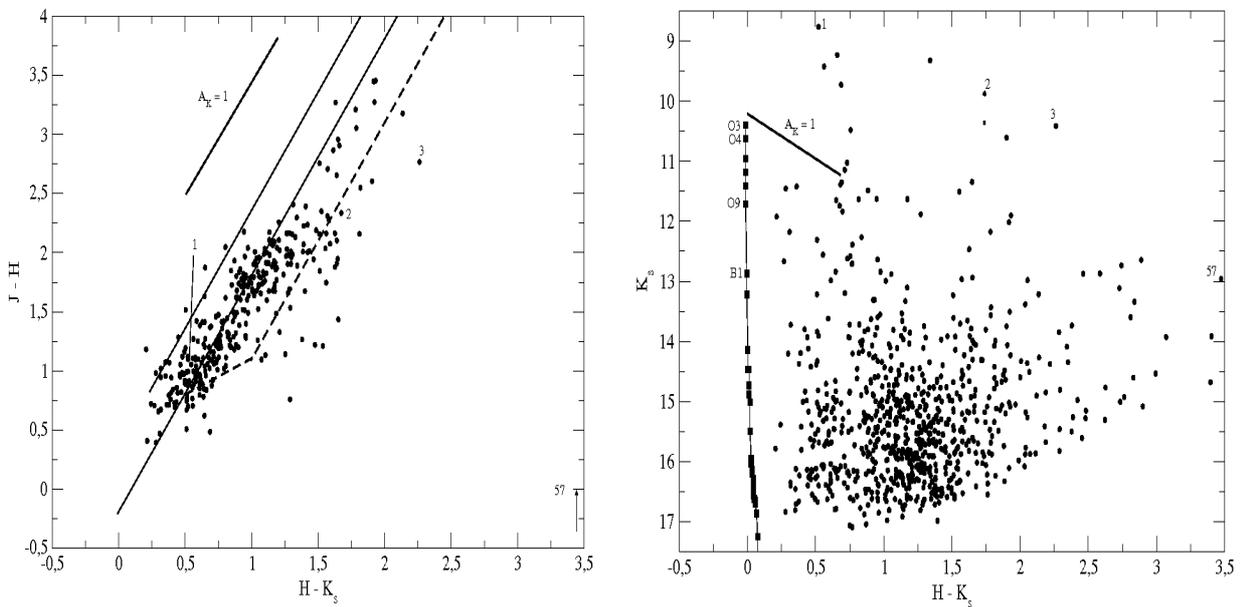


Figura 3.14: Região H II G25.4-0.2 (W42). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Blum et al. (2000) utilizaram #1, #2 e #3 para obter uma distância espectrofotométrica de 2,2 kpc, enquanto que a distância cinemática é de 11,5 kpc. A posição da sequência principal (diagrama C-M) é para a distância cinemática, e vemos que os objetos mais brilhantes pertencentes à W42 são mais brilhantes que o topo da sequência principal. O objeto #57 não foi detectado na banda  $J$ , então adotamos a magnitude limite no valor de  $J = 16,5$  mag.

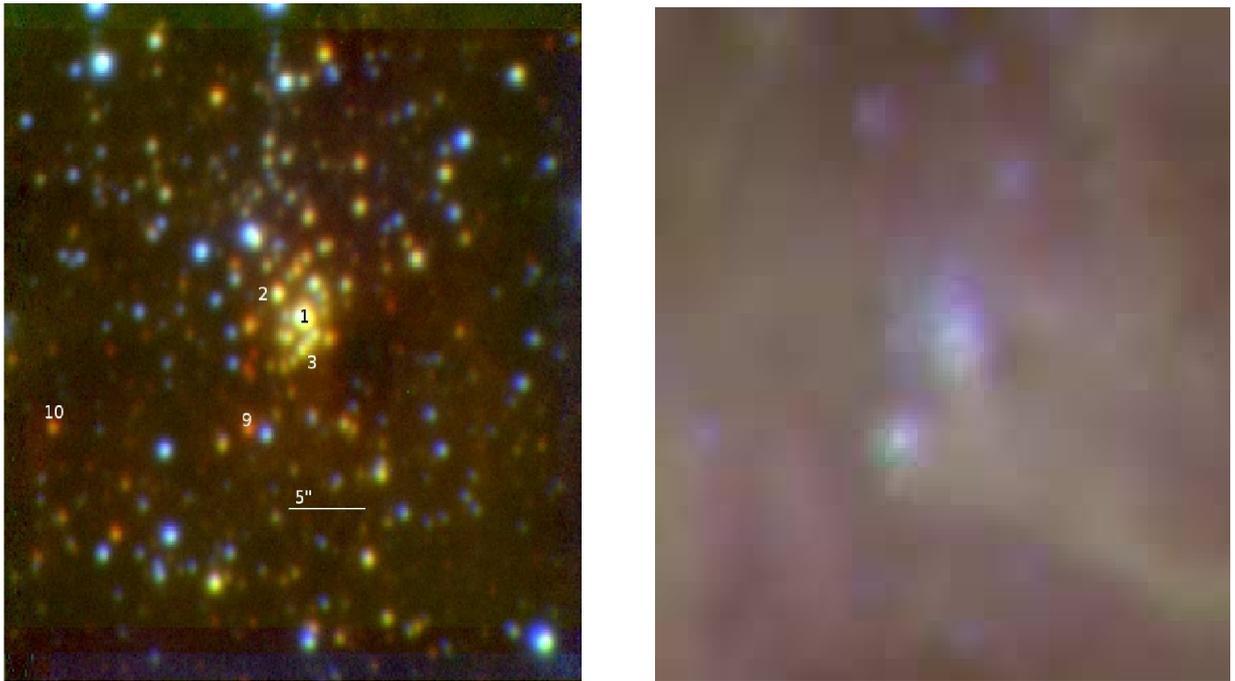


Figura 3.15: Imagens coloridas de G30.8-0.2 (W43). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 0,83$  minutos de arco de lado.

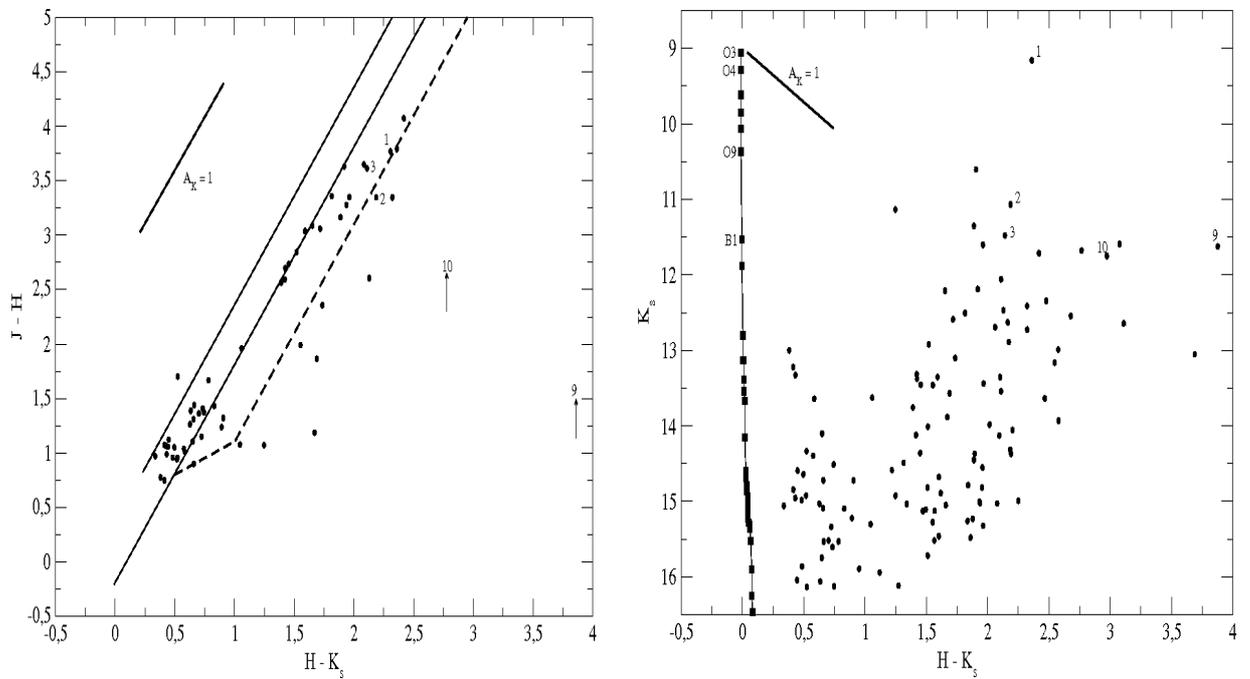


Figura 3.16: Região H II G30.8-0.2 (W43). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos #1, #2 e #3 foram utilizados para a determinação de uma distância por paralaxe espectrofotométrica (4,3 kpc, Blum et al., 1999). O valor da magnitude na banda  $J$  para os objetos #9 e #10 é de  $J = 17,0$  mag.

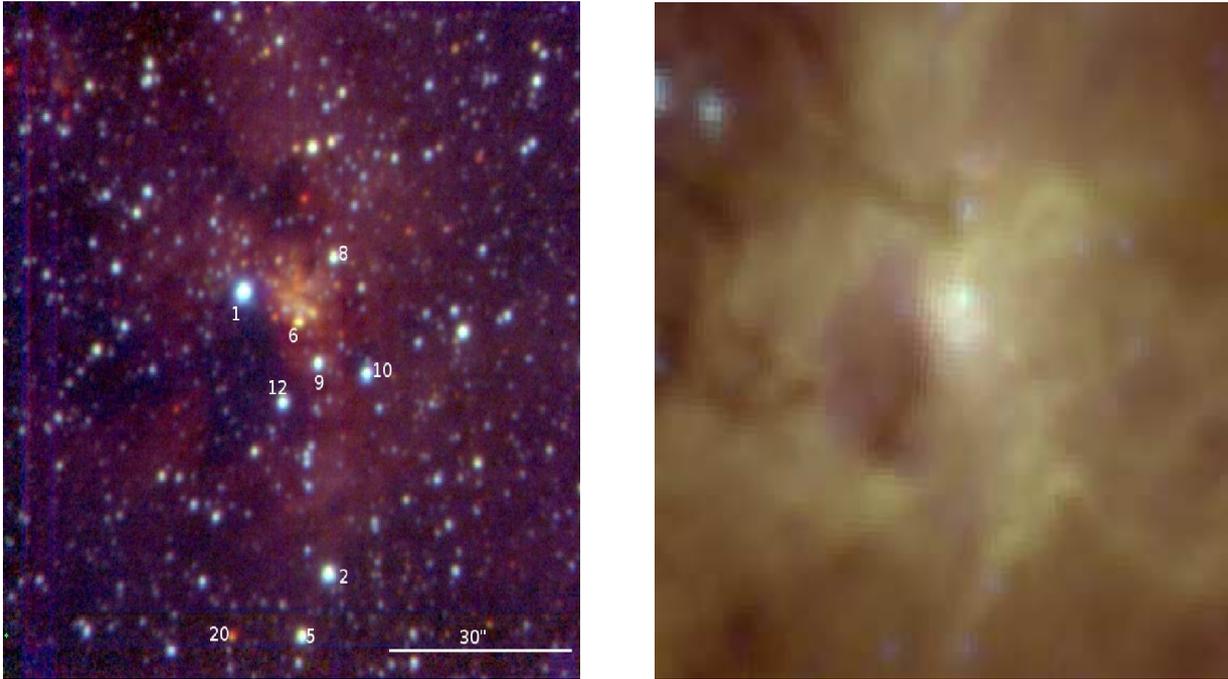


Figura 3.17: Imagens coloridas de G45.5+0.1 (K47). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 1,5$  minutos de arco de lado.

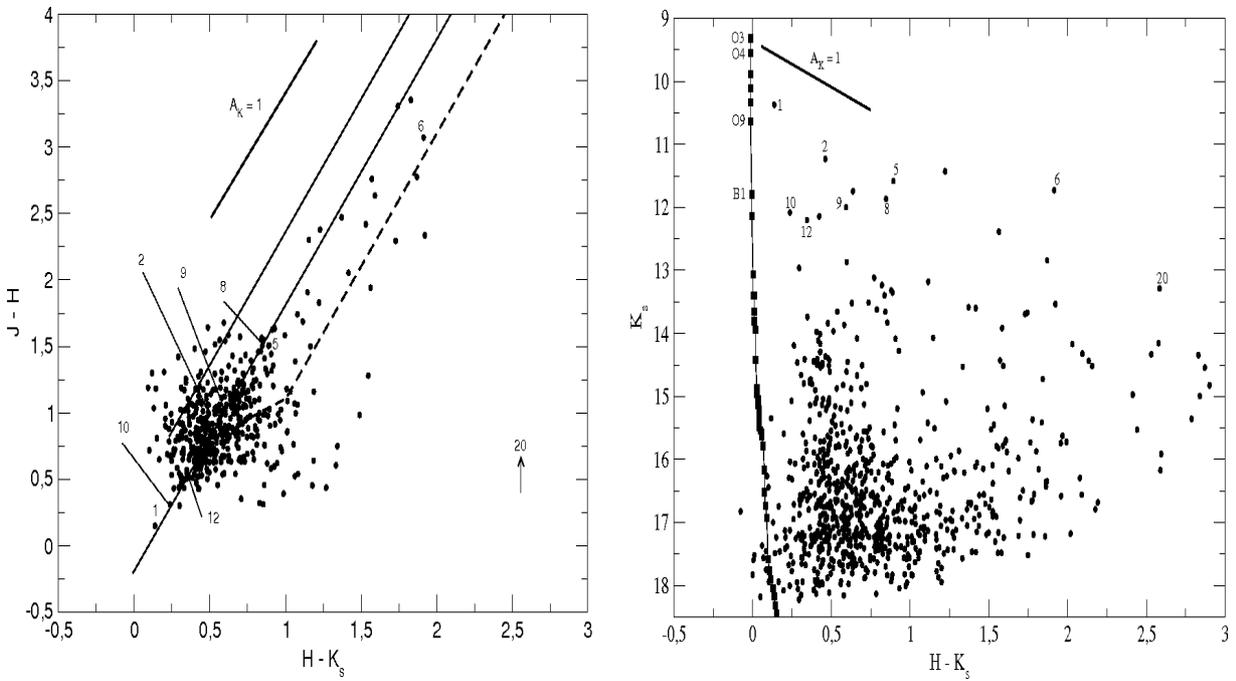


Figura 3.18: Região H II G45.5+0.1 (K47). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A magnitude limite na banda  $J$  é de  $J = 16,5$  mag.

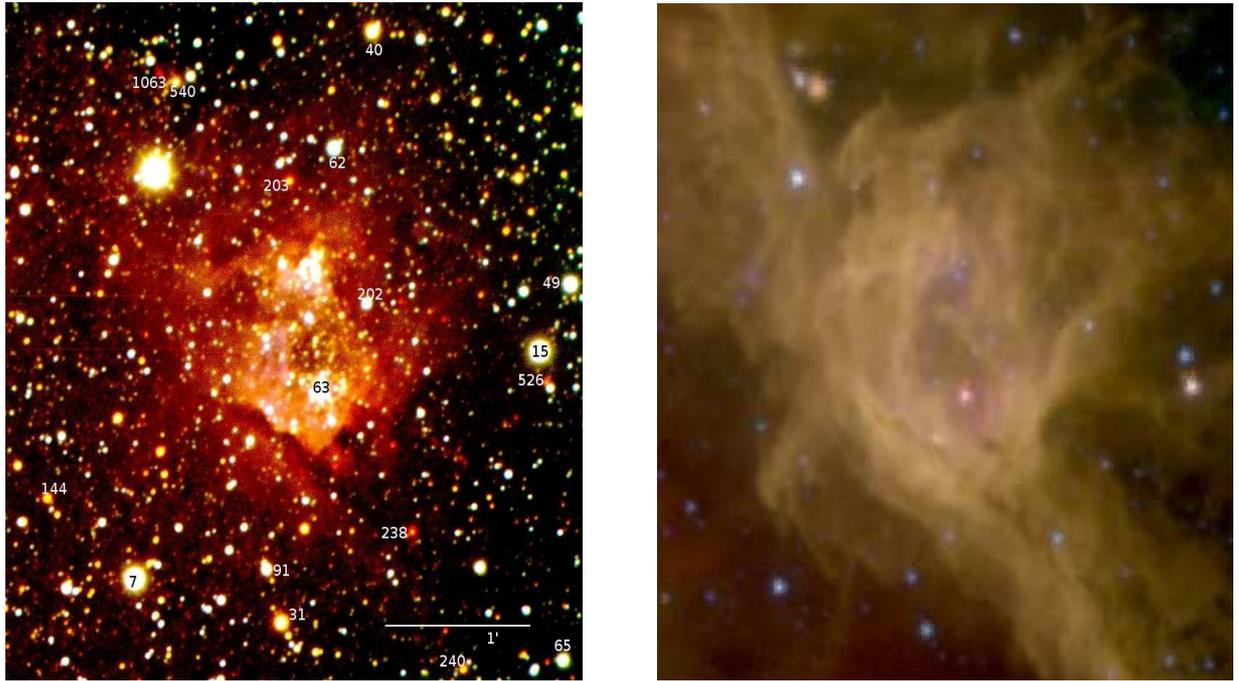


Figura 3.19: Imagens coloridas de G48.9-0.3. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 3,3$  minutos de arco de lado.

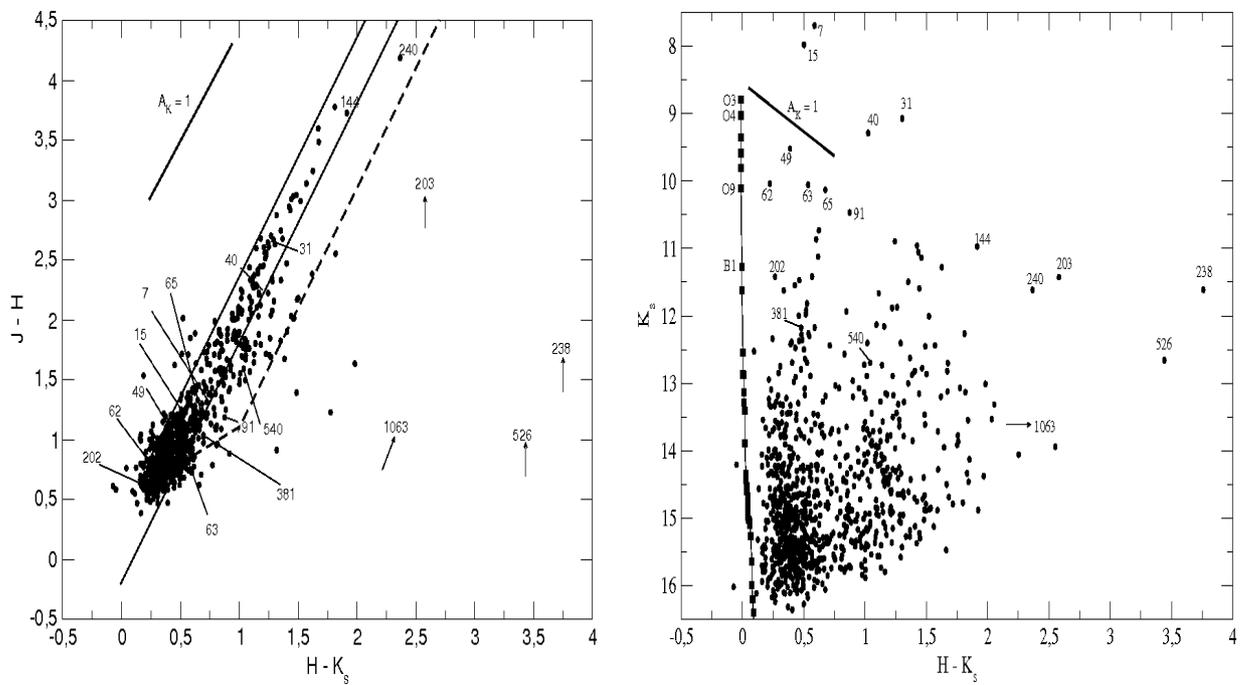


Figura 3.20: Região H II G48.9-0.3. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). As magnitudes limites para esta região (utilizadas nos objetos não detectados nas respectivas bandas):  $J = 17,0$  e  $H = 16,0$  mag.

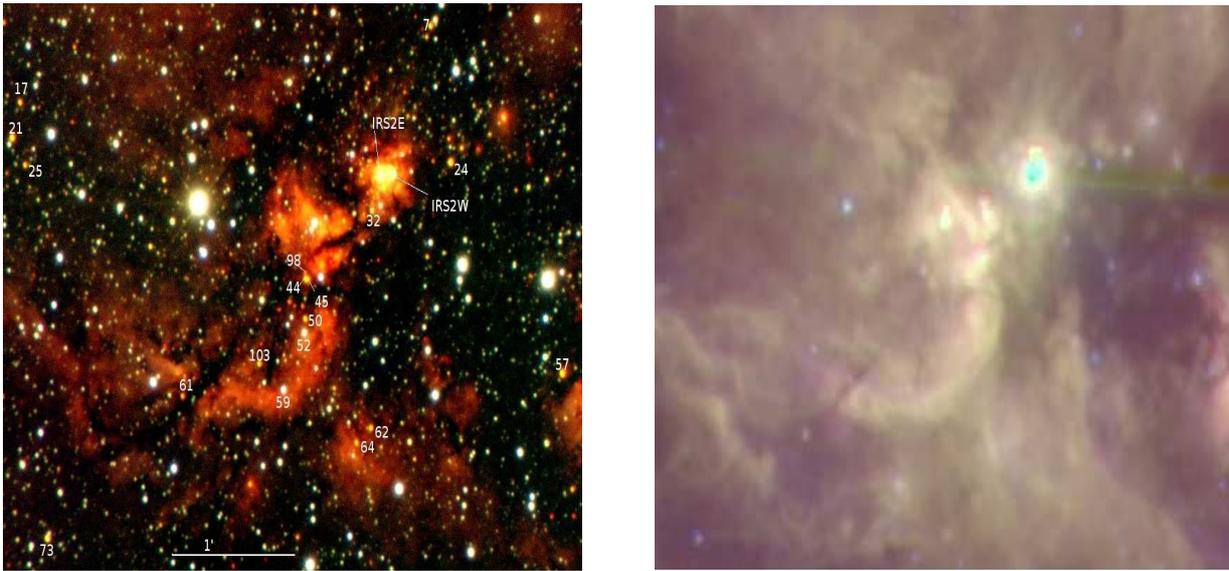


Figura 3.21: Imagem colorida de G49.5-0.4 (W51A). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ , reproduzida de Figuerêdo et al. (2005). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. O campo de visão cobre  $\approx 4,0 \times 3,5$  minutos de arco.

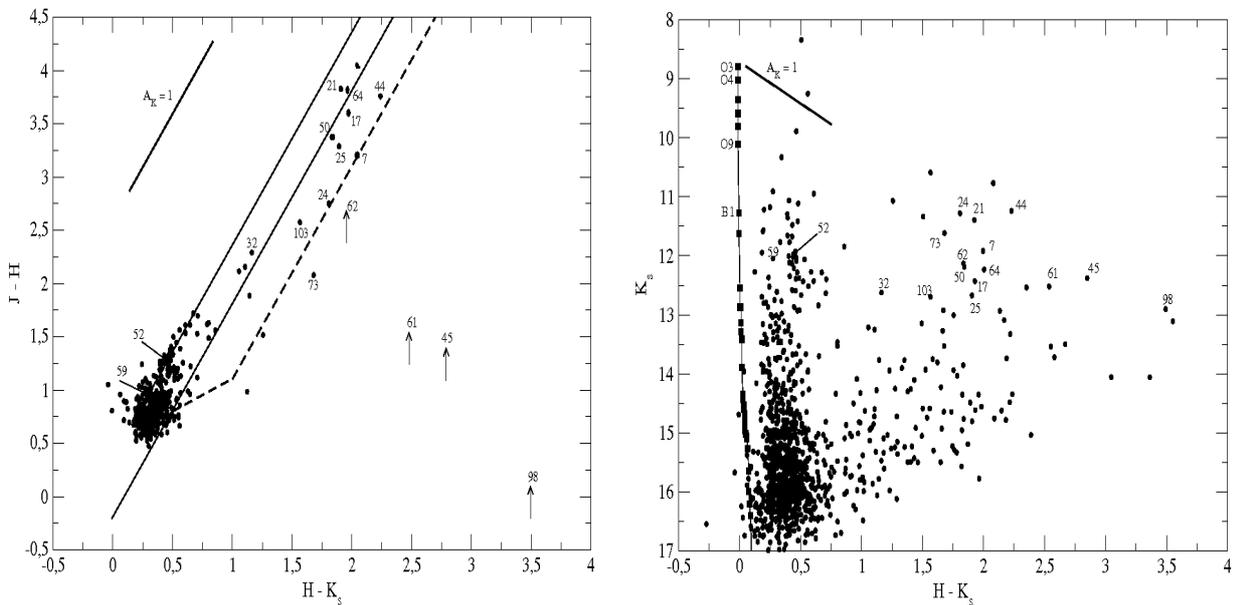


Figura 3.22: Região H II G49.5-0.4 (W51A). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O topo da linha da sequência principal é mais brilhante que as estrelas pertencentes à esta região. Os objetos mais brilhantes que o topo desta sequência principal estão em um primeiro plano. A distância cinemática de 5,5 kpc não difere muito do resultado obtido por Barbosa et al. (2008). A magnitude limite na banda  $J$  é de 16,5 mag.

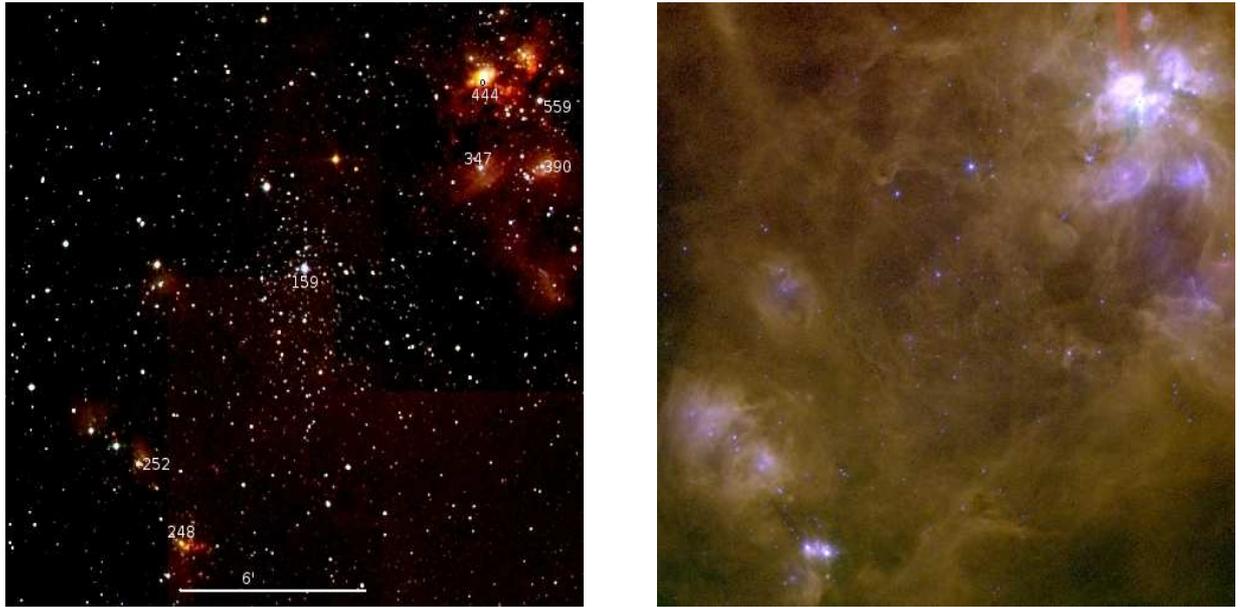


Figura 3.23: Imagens coloridas de G133.7+1.2 (W3). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ , construída a partir de um mosaico de imagens individuais do 2MASS. Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, os tamanhos são  $\approx 18,0$  minutos de arco de lado.

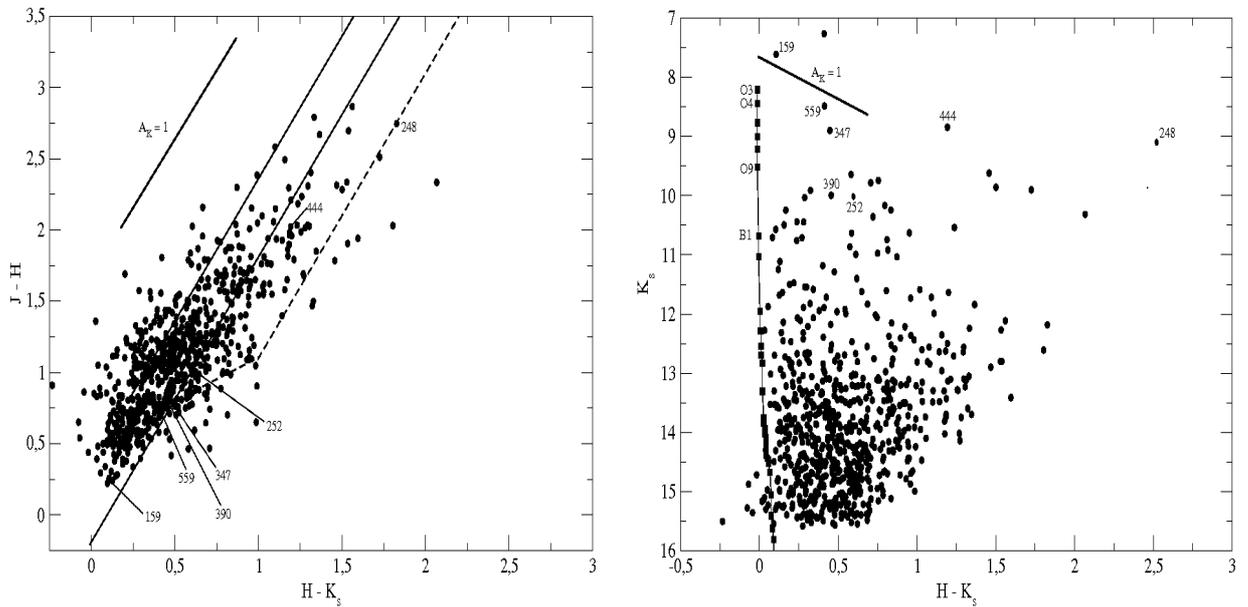


Figura 3.24: Região HII G133.7+1.2 (W3). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Aqui, os dados fotométricos são do catálogo do 2MASS, e foram utilizados para identificar estrelas de tipo espectral O e determinar a distância de W3 por paralaxe espectrofotométrica. Navarete *et al.* (2010, em preparação) determinaram um valor de 1,85 kpc. Este resultado está em concordância com os resultados de Xu *et al.* (2006), cuja distância trigonométrica obtida foi de 1,95 kpc. A distância cinemática para esta região é de 4,2 kpc (Russeil, 2003).

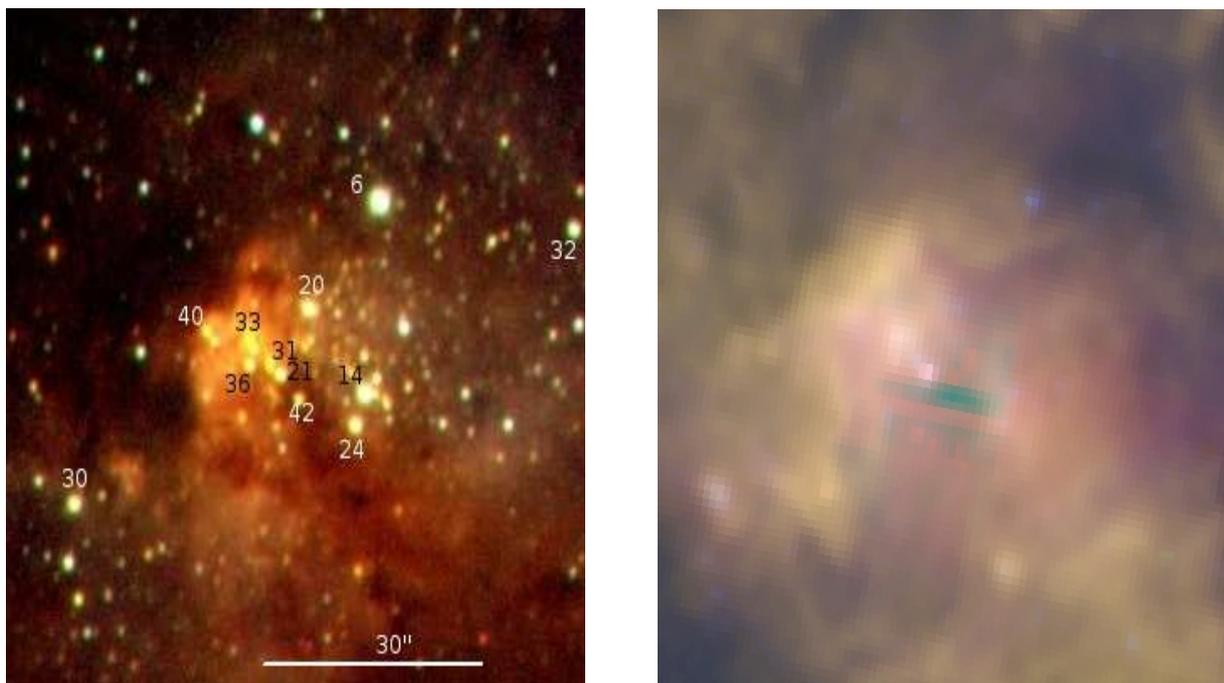


Figura 3.25: Imagens coloridas de G274.0-1.1 (RCW42). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Os tamanhos são  $\approx 1,5$  minutos de arco de lado. Na imagem  $JHK_s$  podemos ver um aglomerado estelar profundamente embebido.

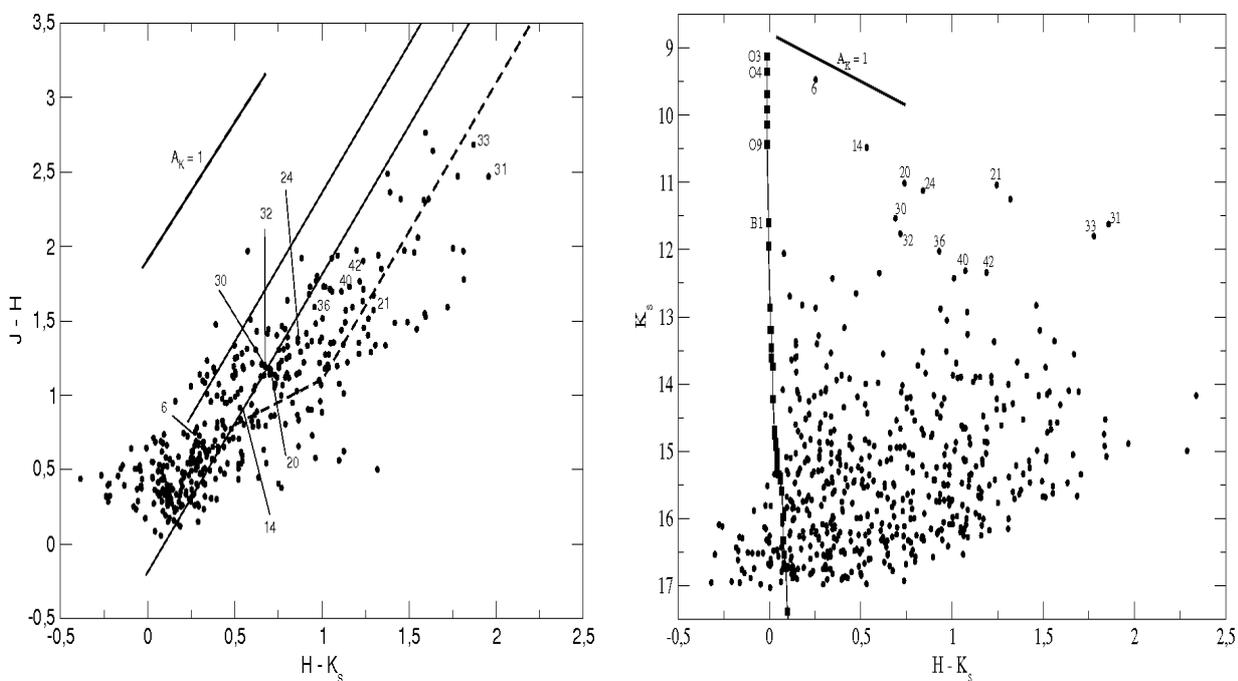


Figura 3.26: Região H II G274.0-1.1 (RCW42). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O diagrama C-M aparenta estar consistente com a distância cinemática adotada.

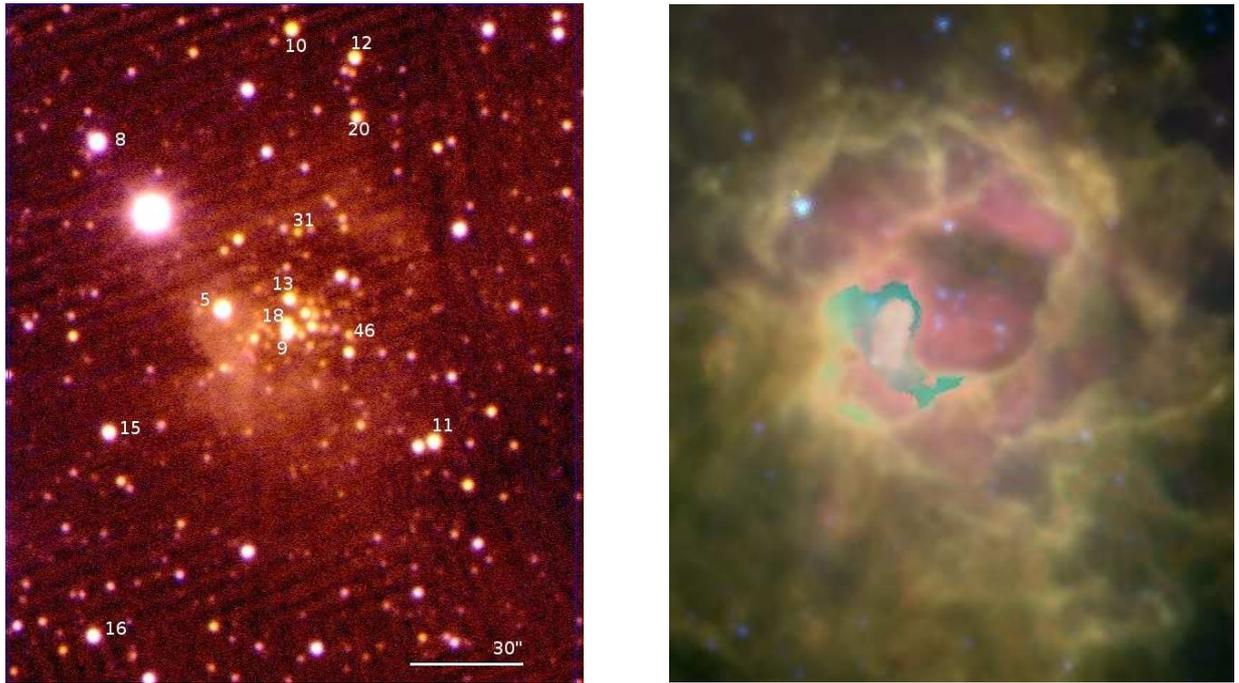


Figura 3.27: Imagem colorida de G282.0-1.2 (RCW46). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagens do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 3,0$  minutos de arco de lado.

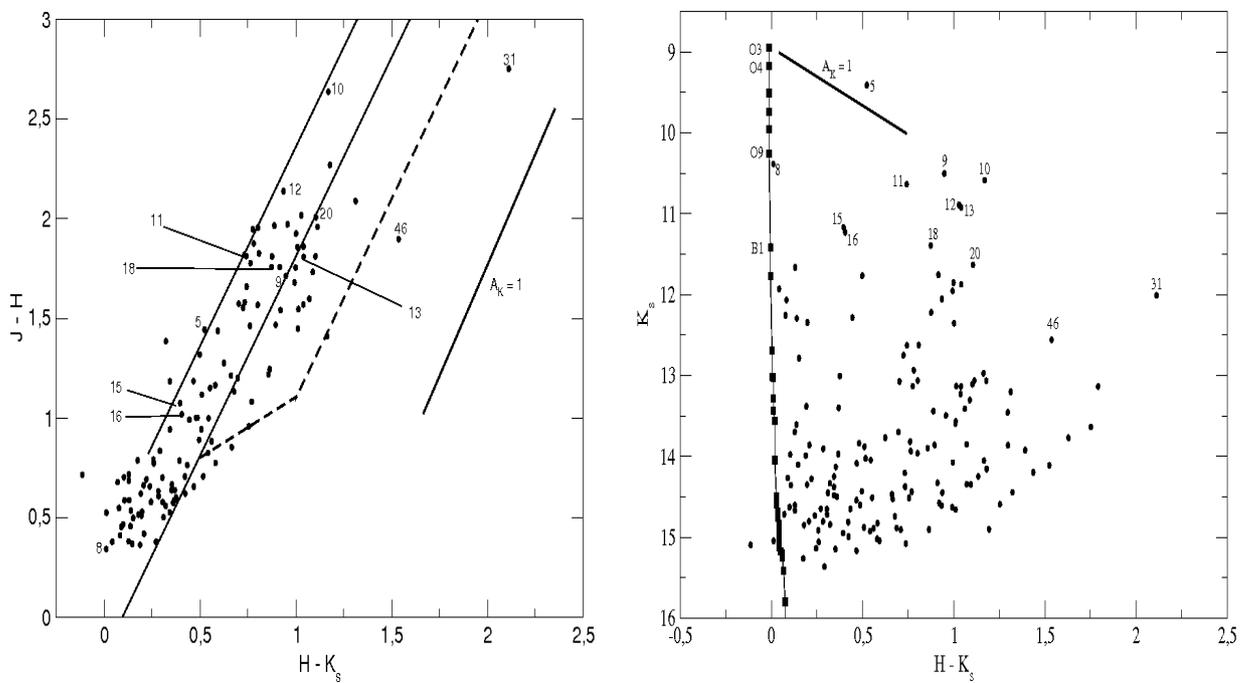


Figura 3.28: Região H II G282.0-1.2 (RCW46). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O topo da linha de sequência principal é mais brilhante que os membros do aglomerado, o que indica que a distância cinemática adotada deve estar correta.

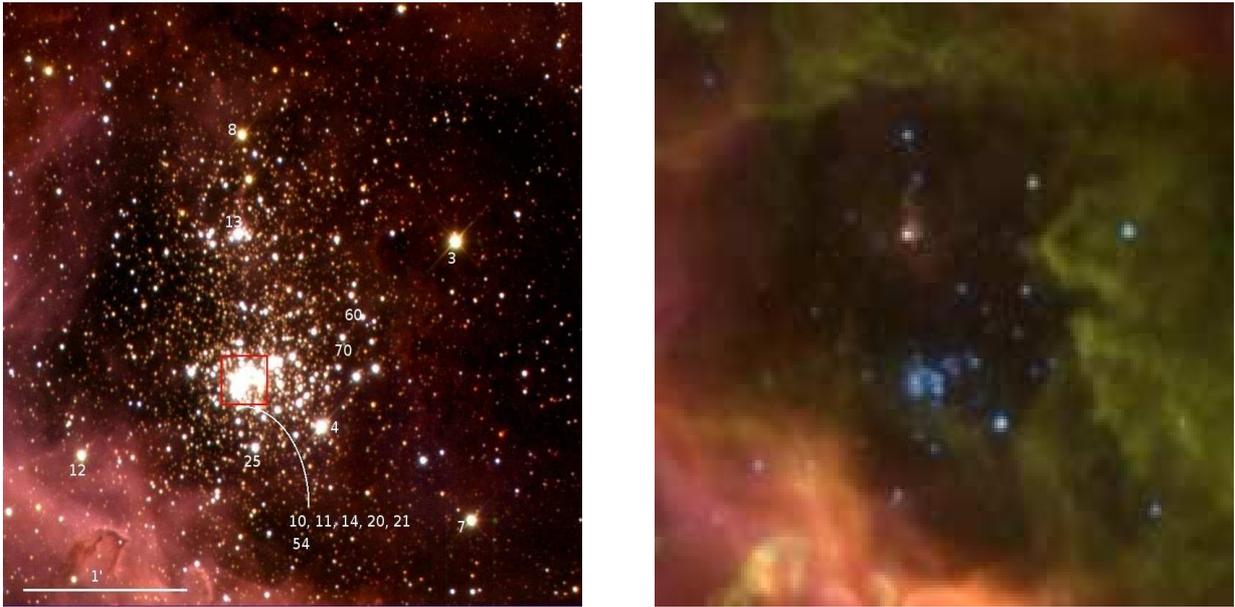


Figura 3.29: Imagens coloridas de G284.3-0.3 (NGC3247). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 3,3$  minutos de arco de lado. Alguns objetos no aglomerado cerrado (caixa vermelha) estão indicados na imagem no infravermelho próximo.

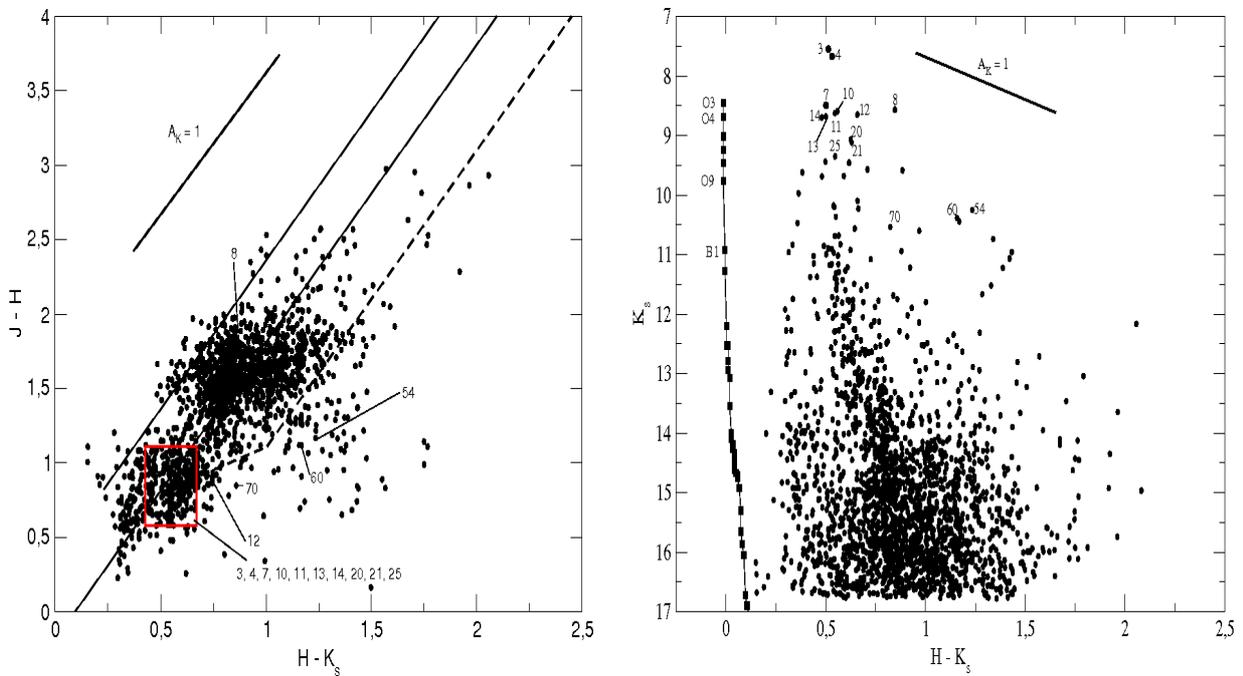


Figura 3.30: Região H II G284.3-0.3 (NGC3247). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os membros do aglomerado estão espacialmente próximos e apresentam  $H - K_s = 0,6$ . Nossa fotometria sugere que esta região é mais próxima do que indica uma distância cinemática de 4,7 kpc (Russeil, 2003).

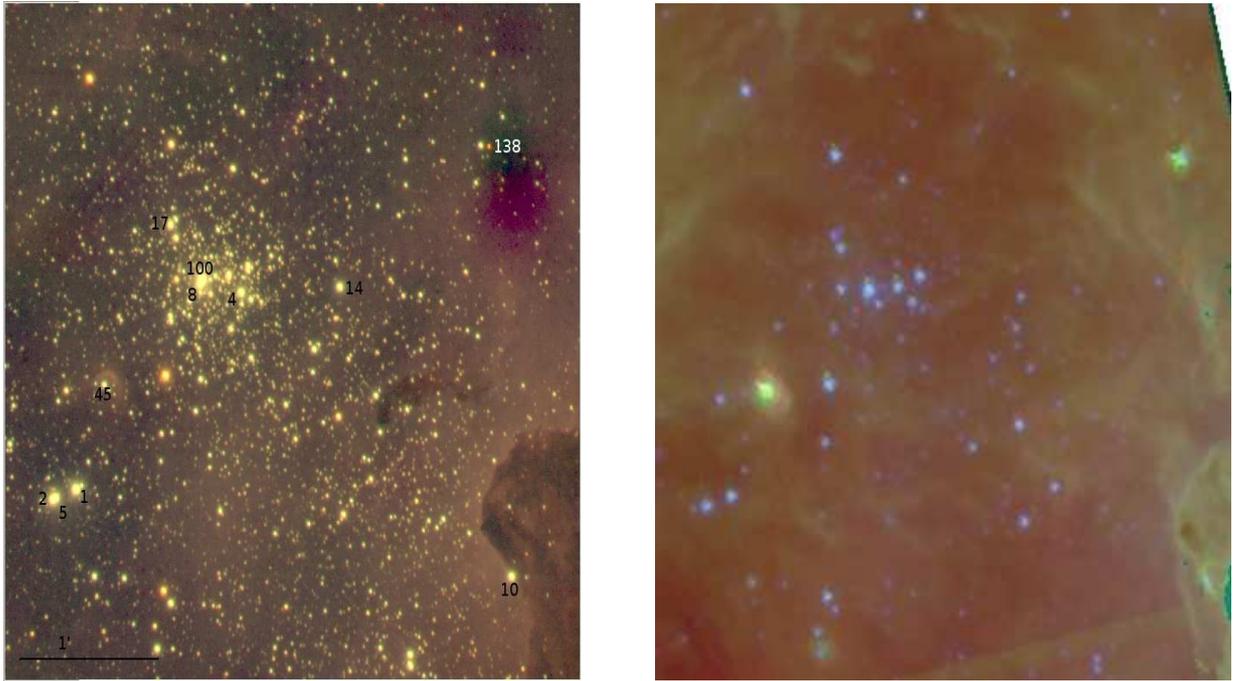


Figura 3.31: Imagens coloridas de G287.4-0.6 (NGC3372). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 4,0$  minutos de arco de lado.

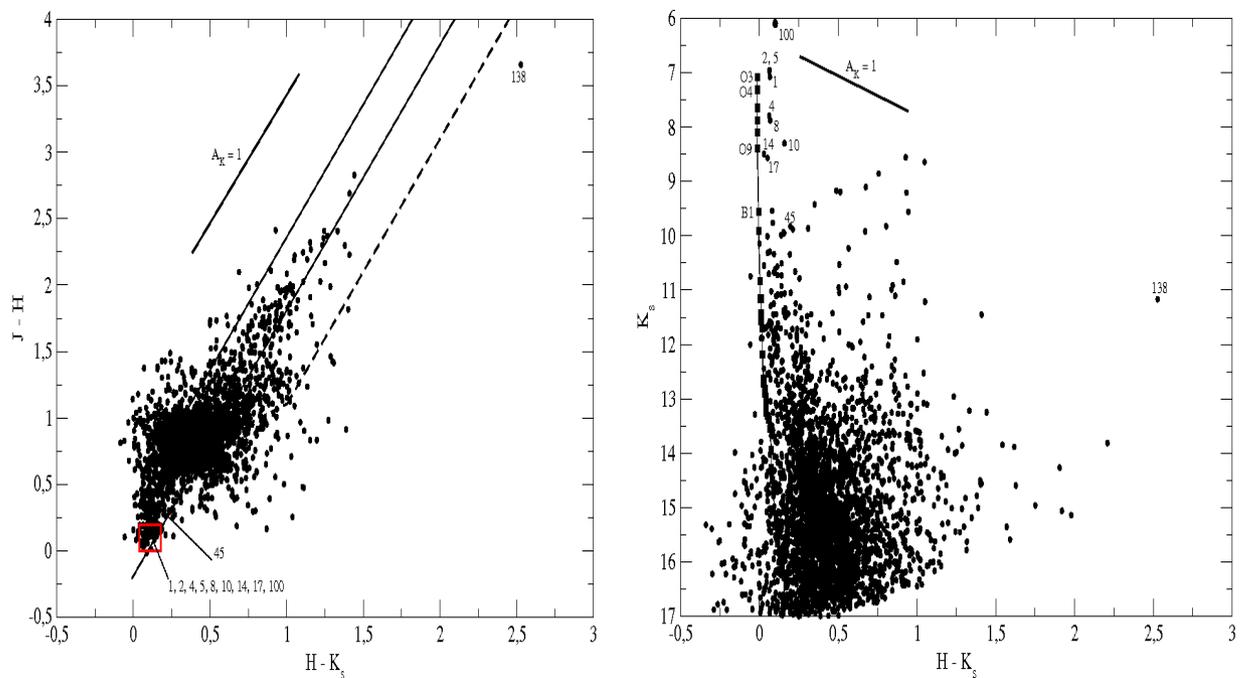


Figura 3.32: Região H II G287.4-0.6 (NGC3372). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância cinemática leva a uma posição da sequência principal cujo topo é menos brilhante que o esperado pelos membros do aglomerado.

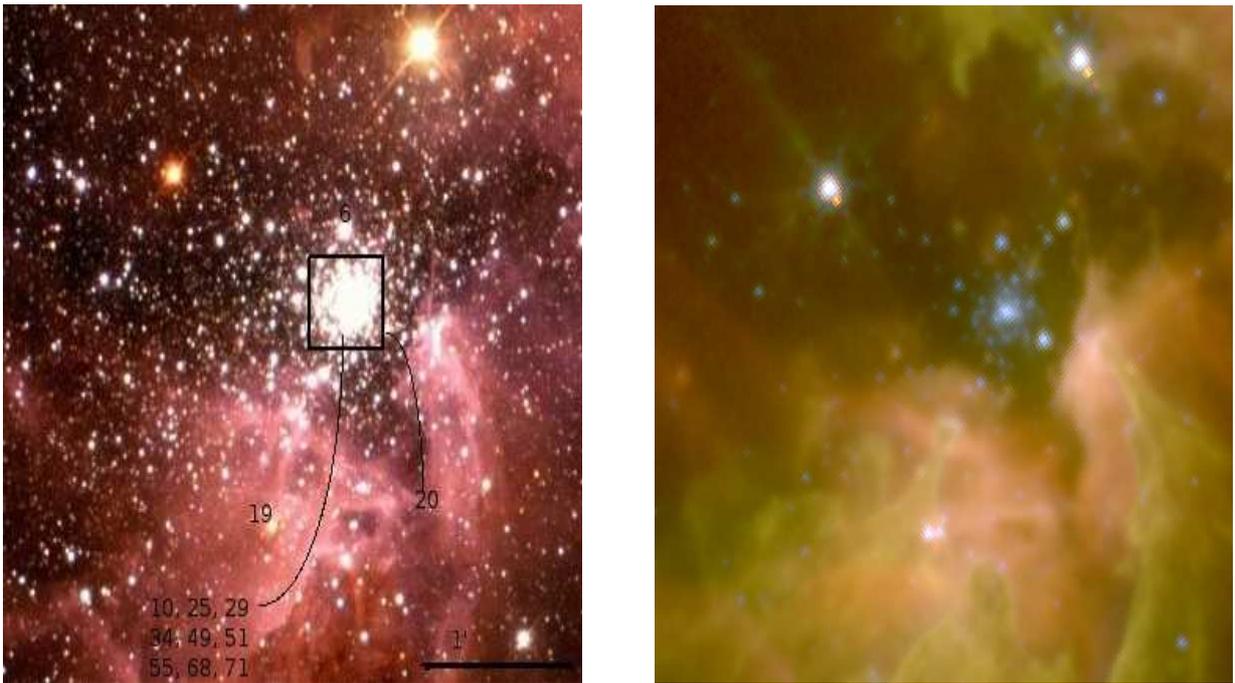


Figura 3.33: Imagens coloridas de G291.6-0.5 (NGC3603). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ , exceto os objetos #6, #19 e #20, os demais estão dentro da área limitada pela caixa preta. Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é  $\approx 4,0 \times 5,0$  minutos de arco.

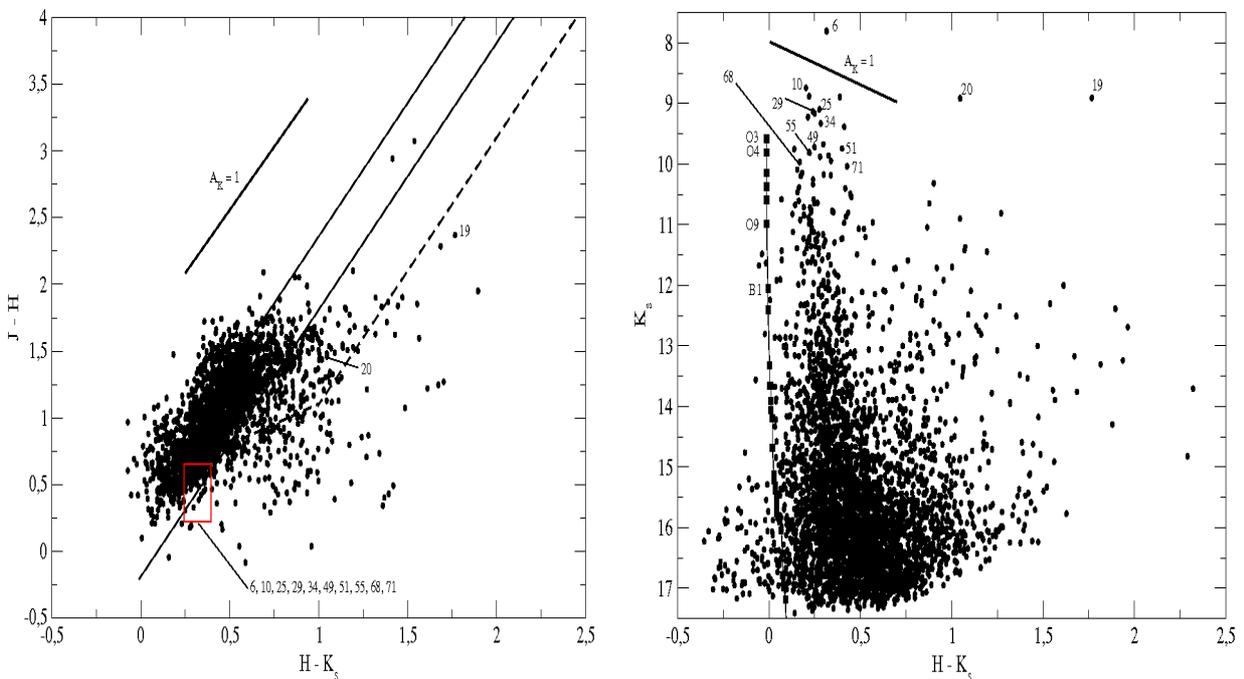


Figura 3.34: Região H II G291.6-0.5 (NGC3603). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). No centro da imagem colorida  $JHK_s$ , podemos ver um aglomerado estelar bastante denso. Os membros deste aglomerado estão indicados pela caixa preta na imagem colorida  $JHK_s$  e pela caixa vermelha no diagrama C-C.

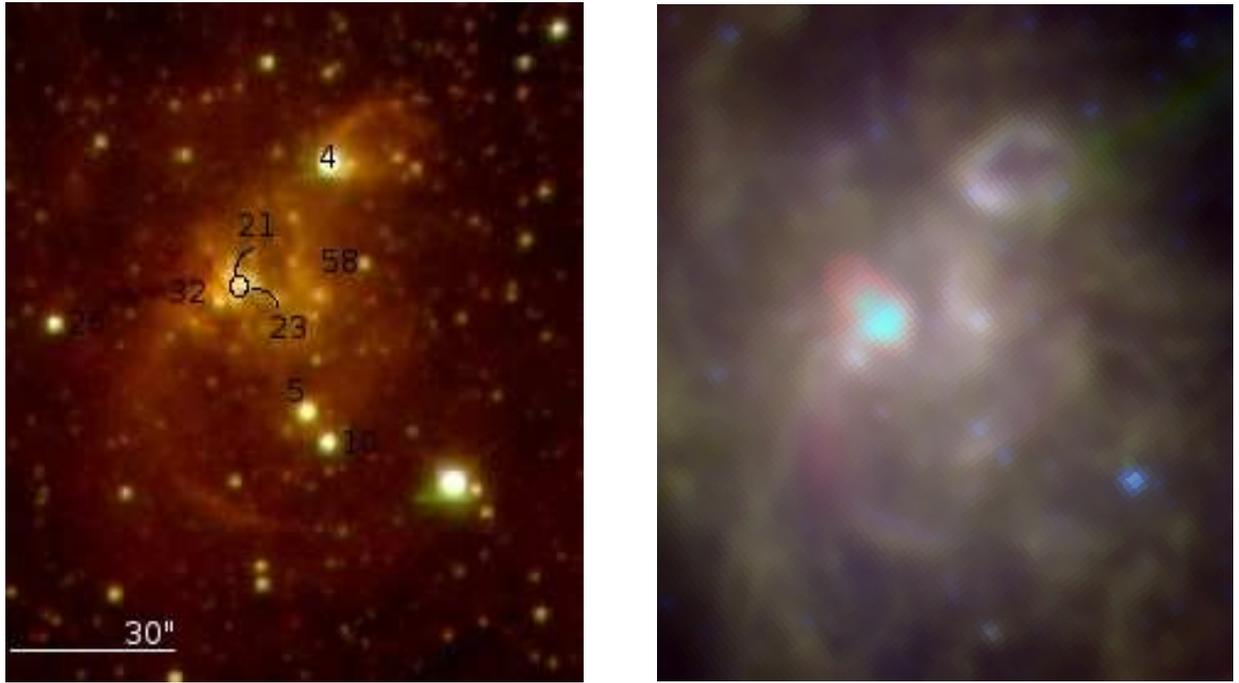


Figura 3.35: Imagens coloridas de G298.2-0.3. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho da base é  $\approx 2,0$  minutos de arco.

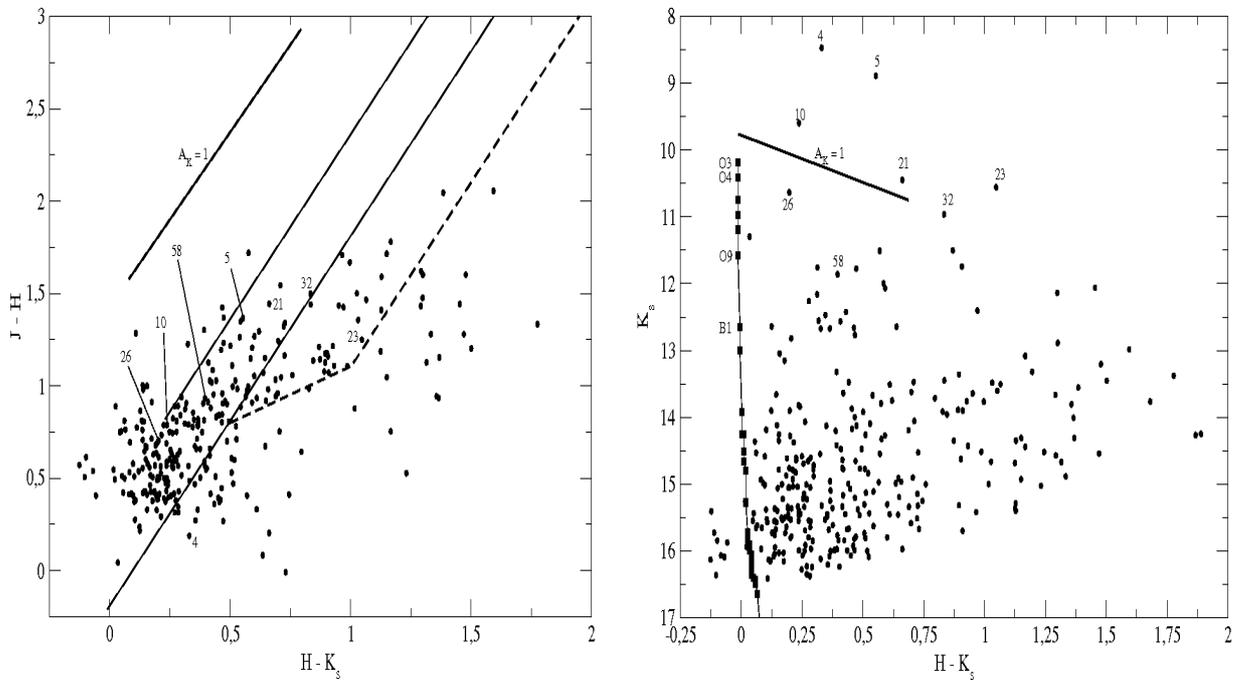


Figura 3.36: Região H II G298.2-0.3. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Poucos objetos foram detectados nesta região.

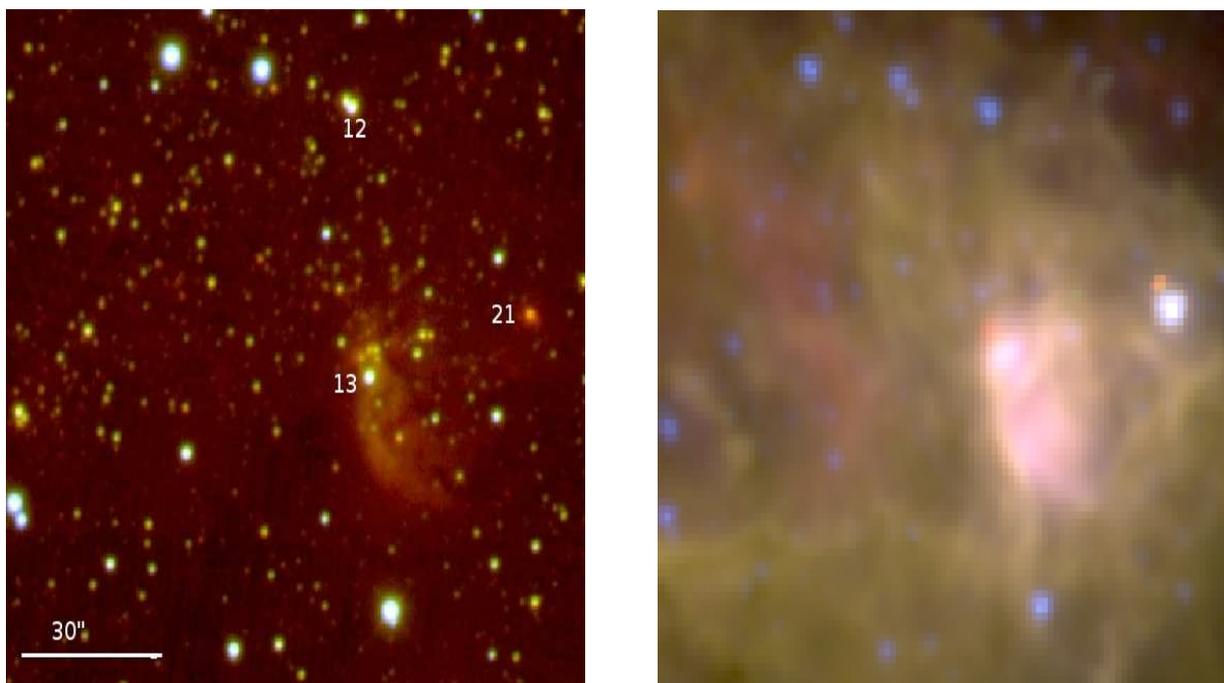


Figura 3.37: Imagens coloridas de G298.9-0.4. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, a base mede  $\approx 2,0$  minutos de arco.

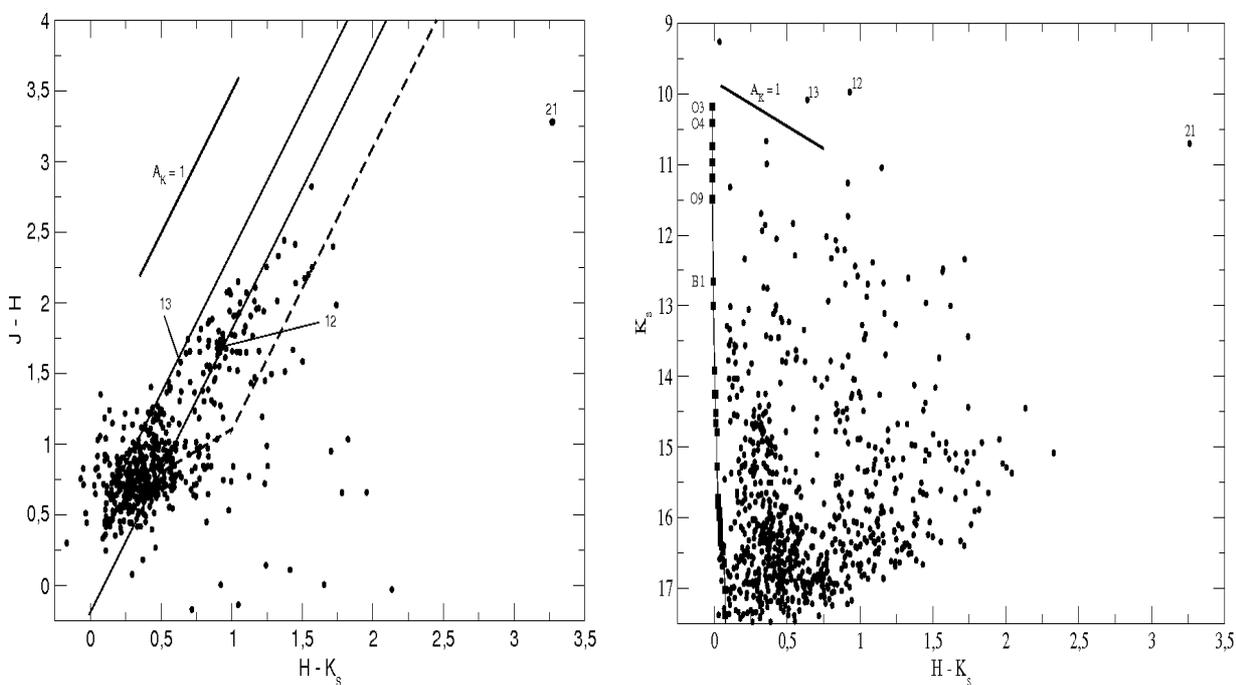


Figura 3.38: Região H II G298.9-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Não há ainda um já evidente aglomerado nesta jovem região.

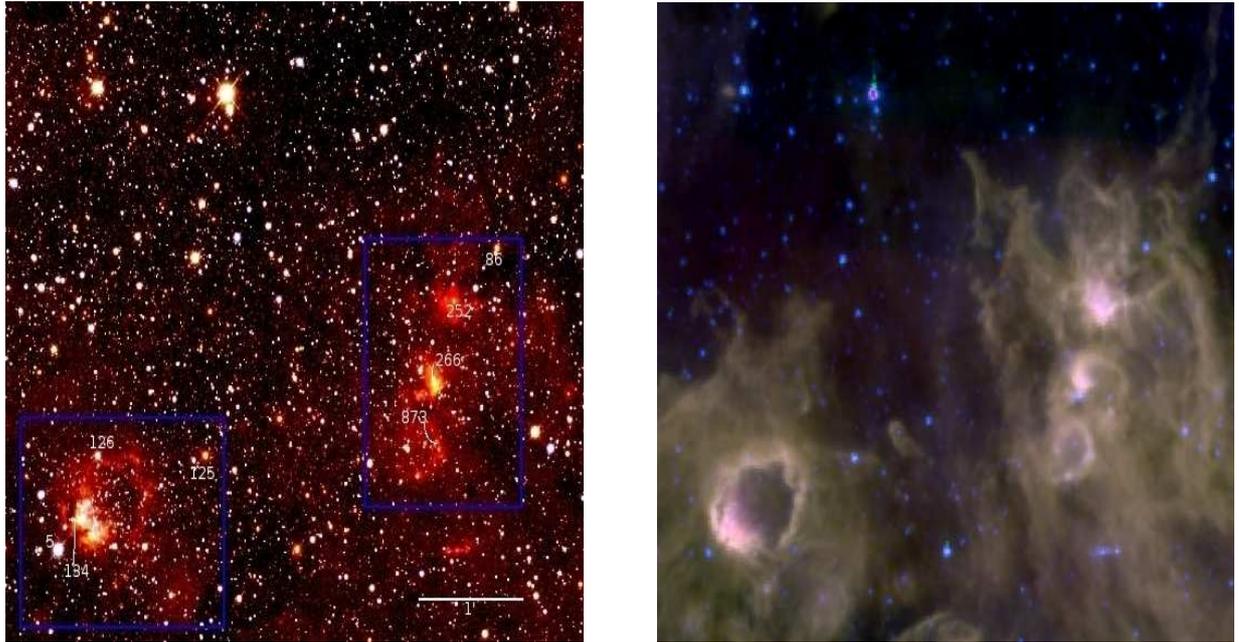


Figura 3.39: Imagens coloridas de G305.2+0.0. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. A imagem do Spitzer está saturada em alguns locais (as zonas mais azuladas). Em ambas as imagens, cada lado mede  $\approx 5,5$  minutos de arco.

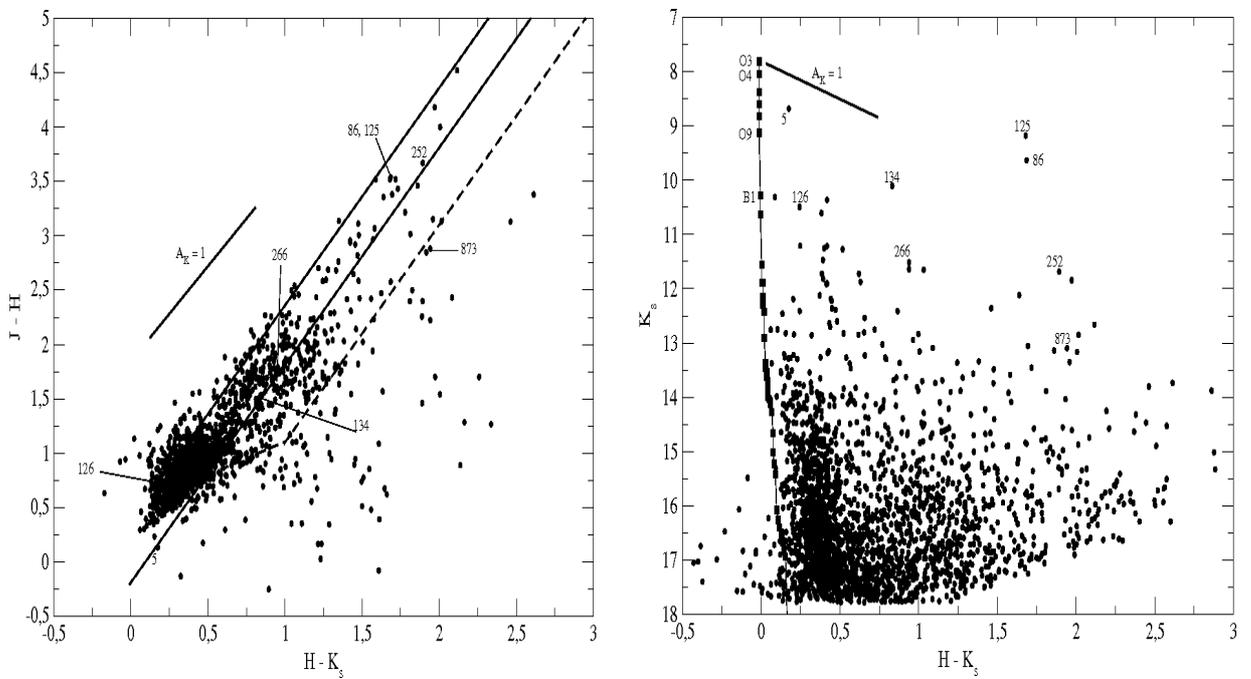


Figura 3.40: Região HII G305.2+0.0. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A fotometria foi realizada dentro das duas regiões demarcadas pelos dois retângulos azuis na imagem colorida  $JHK_s$ .

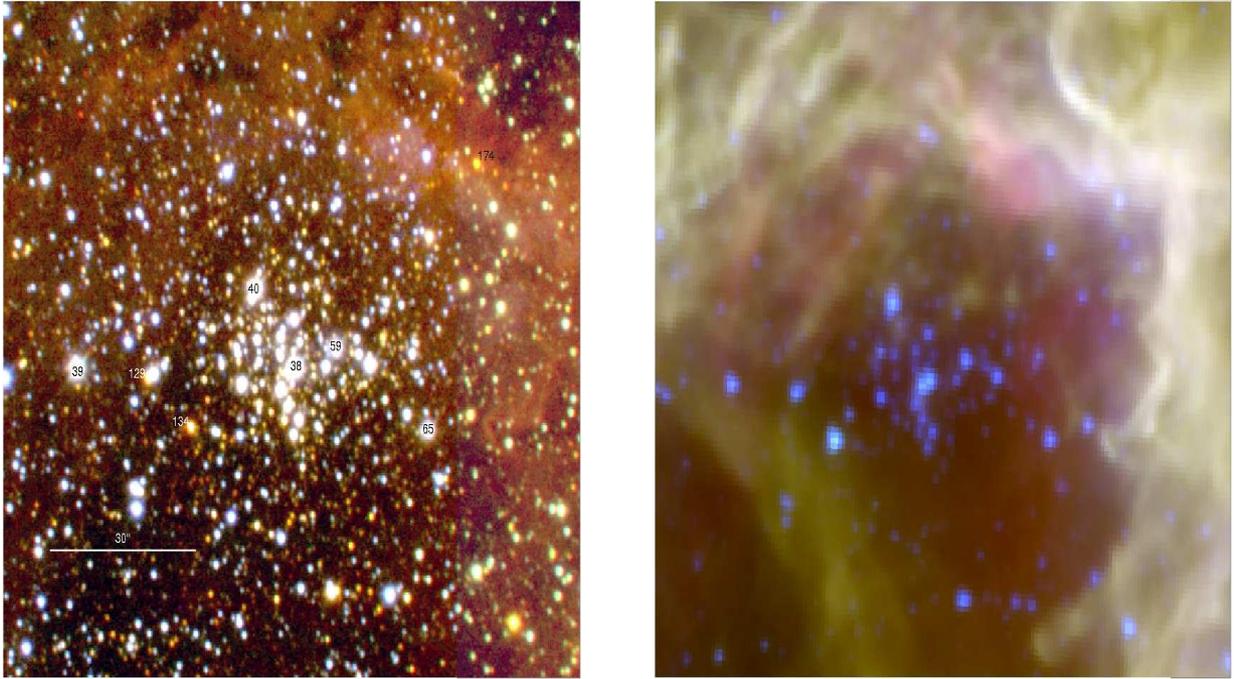


Figura 3.41: Imagens coloridas de G305.2+0.2. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, cada lado tem  $\approx 2,0$  minutos de arco.

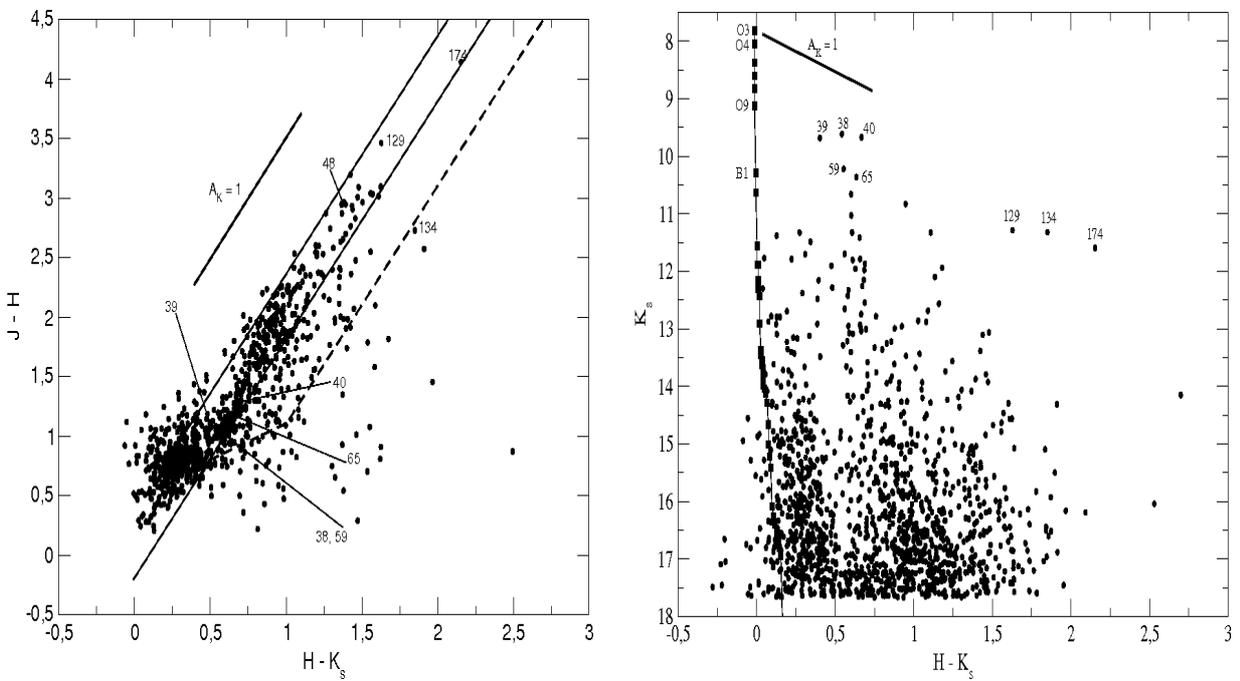


Figura 3.42: Região H II G305.2+0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância cinemática adotada de 3,5 kpc (Russeil, 2003) aparenta estar em consistência com os dados fotométricos.

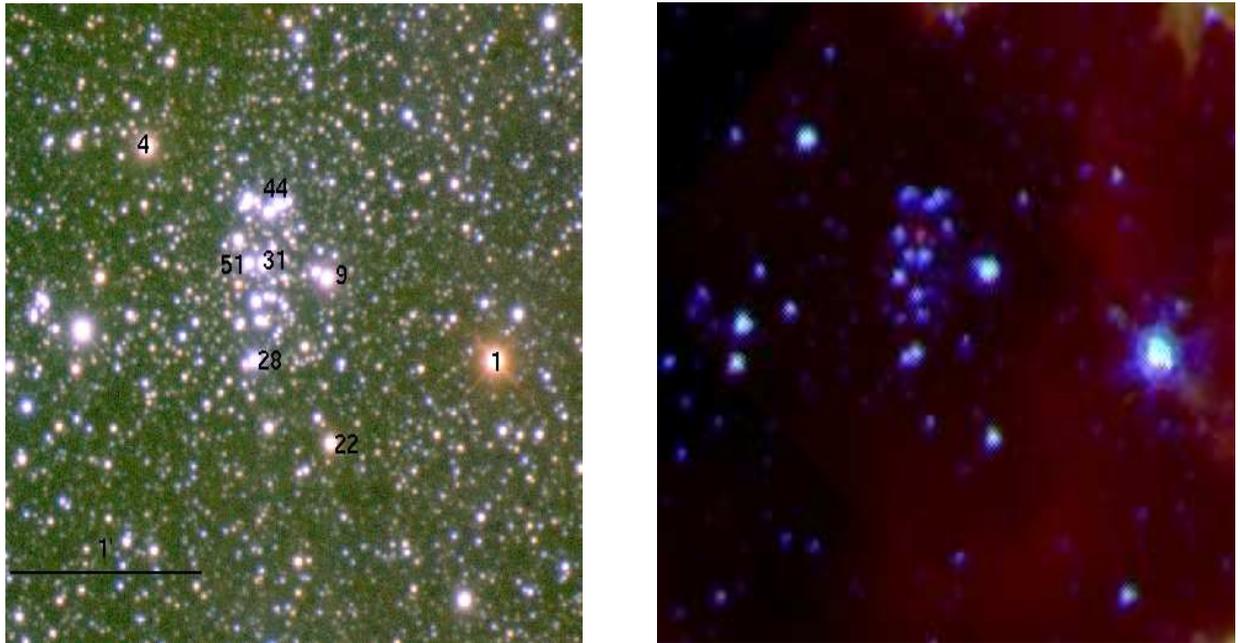


Figura 3.43: Imagens coloridas de G308.7+0.6. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, os tamanhos são  $\approx 3,0$  minutos de arco de lado. Neste pequeno campo de visão, não vemos nebulosidade, mas em um campo maior de  $\approx 8,0$  minutos de arco de lado fornecido pela imagem do ISPI (não exibida aqui em sua totalidade), uma fraca nebulosidade pode ser vista circundando o aglomerado estelar.

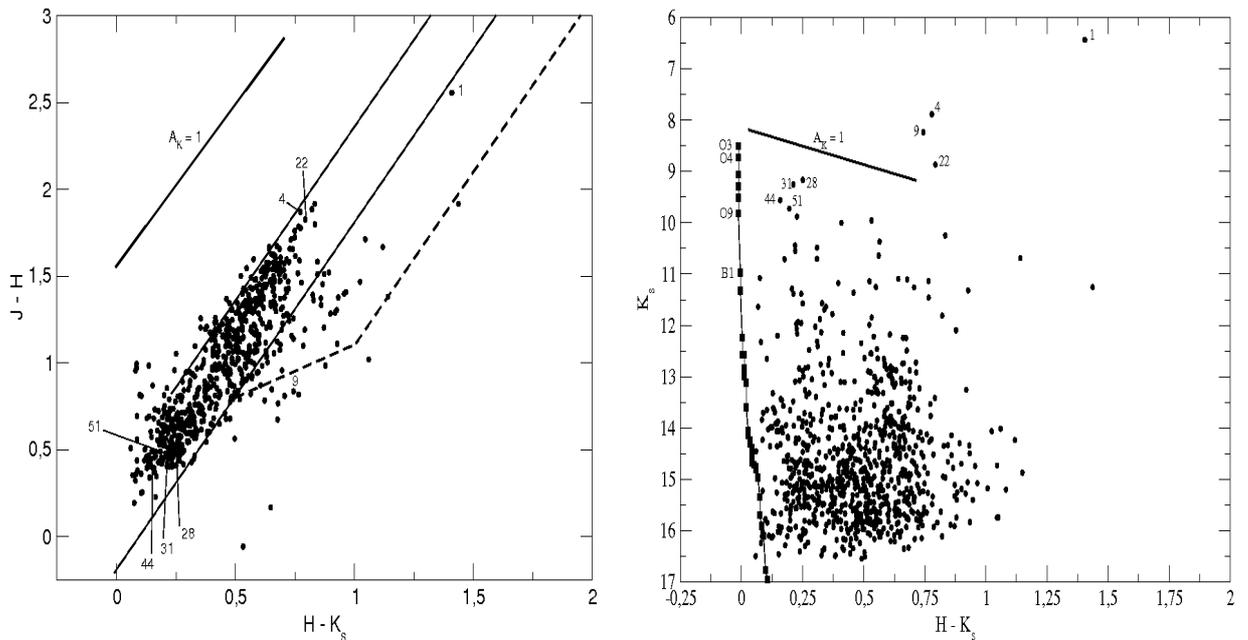


Figura 3.44: Região H II G308.7+0.6. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A sequência principal aparenta estar em um local correto para ajuste dos membros do aglomerado, o que indica que a distância cinemática deve estar correta.



Figura 3.45: Imagens coloridas de G320.1+0.8 (RCW87). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 4,0$  minutos de arco de lado.

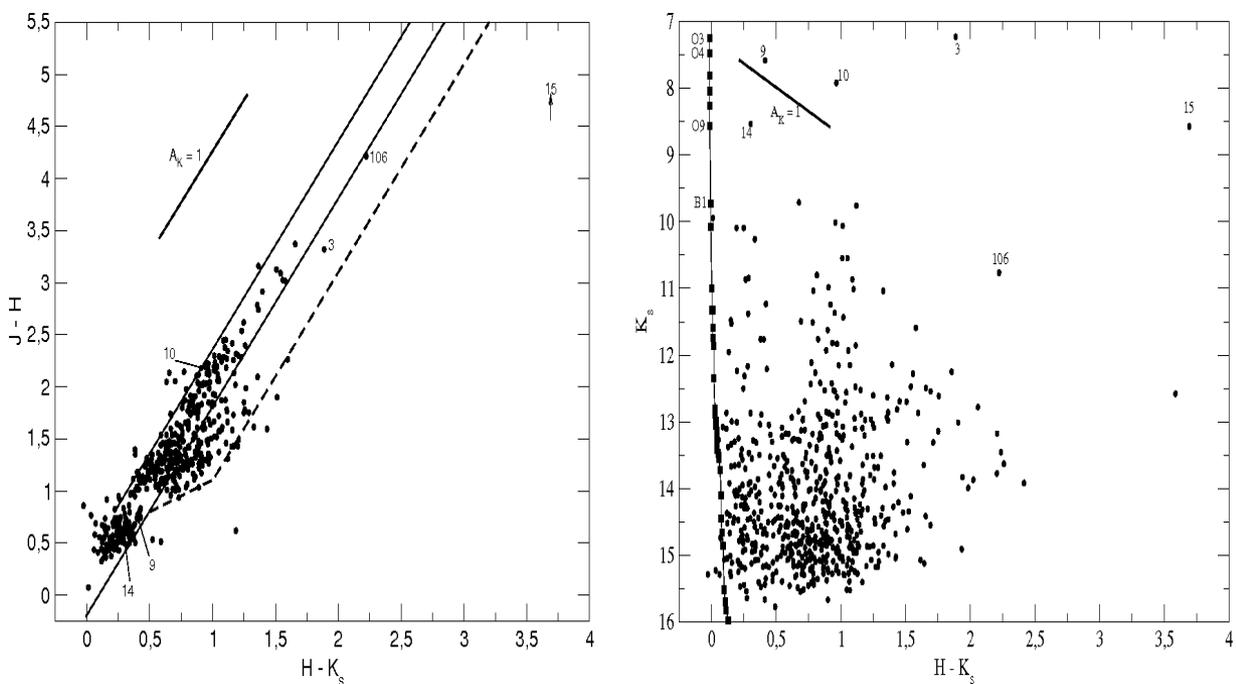


Figura 3.46: Região H II G320.1+0.8 (RCW87). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II bastante embebida e intensa emissão nebular. A magnitude limite para esta região na banda  $J$  é de 17,0 mag.

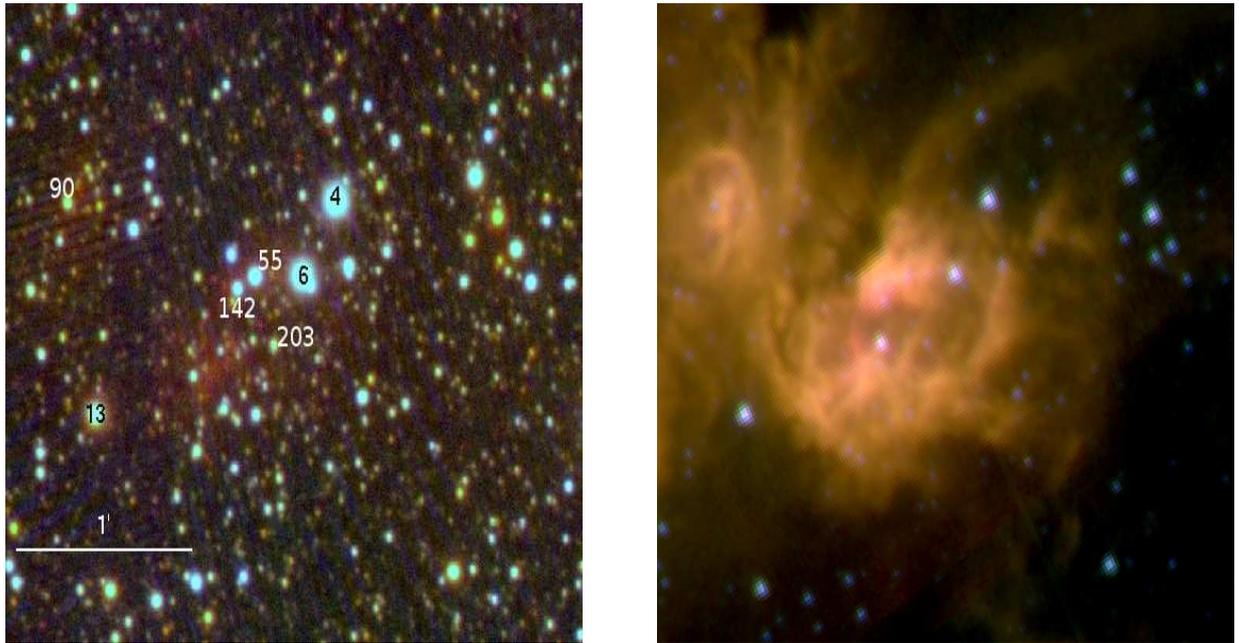


Figura 3.47: Imagens coloridas de G320.3-0.2. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 3,0$  minutos de arco de lado.

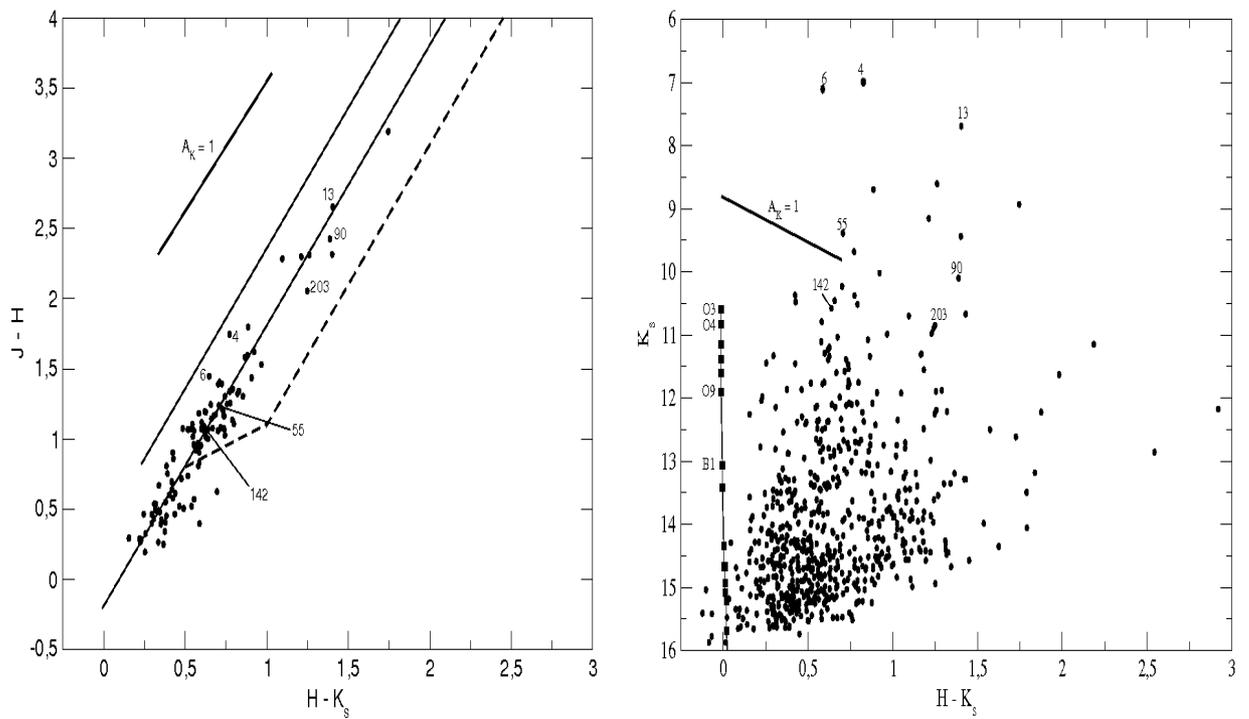


Figura 3.48: Região H II G320.3-0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II evoluída, mas com nebulosidade ainda visível na imagem do Spitzer.

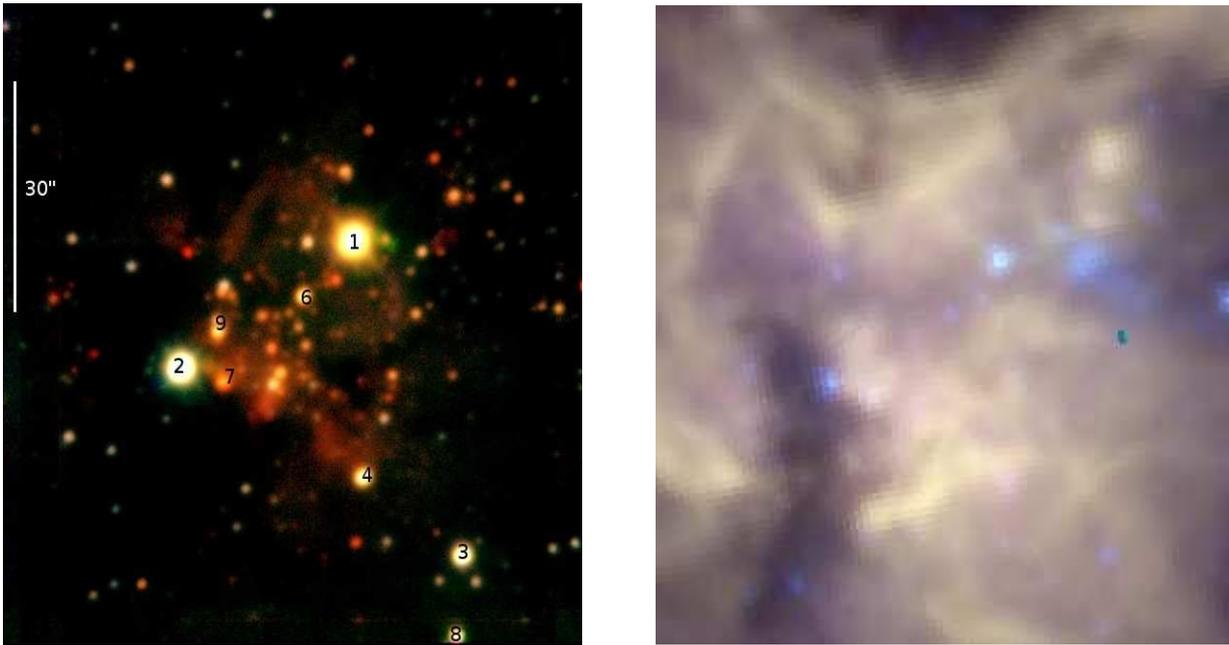


Figura 3.49: Imagens coloridas de G322.2+0.6 (RCW92). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é  $\approx 1,0 \times 1,5$  minutos de arco.

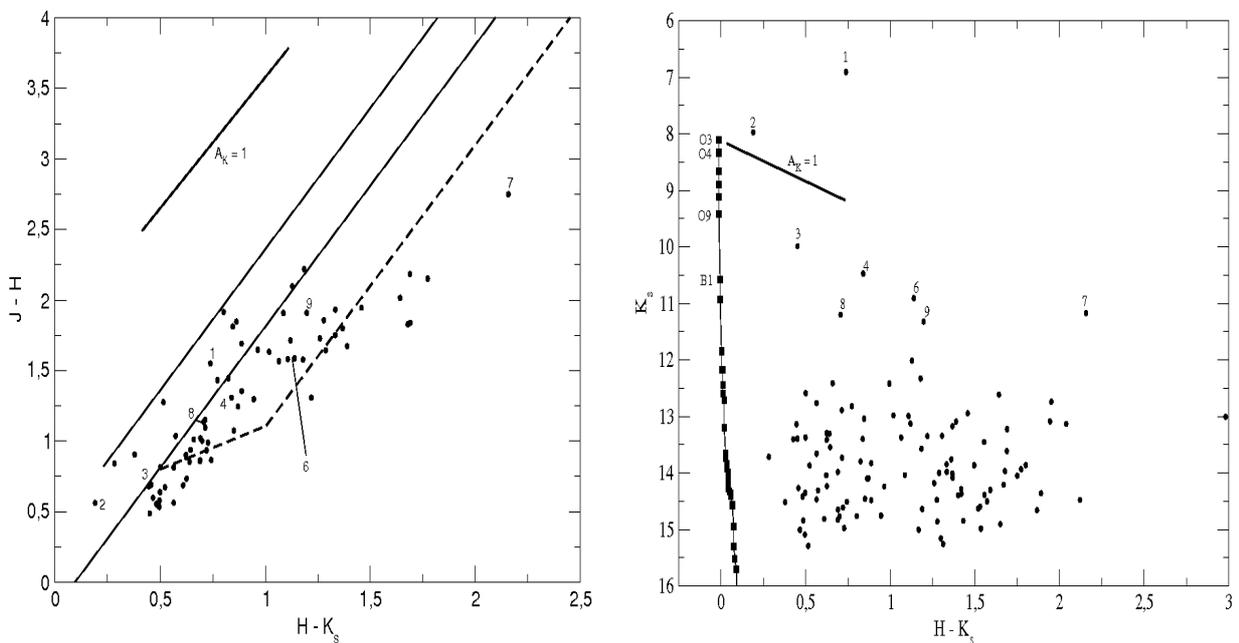


Figura 3.50: Região H II G322.2+0.6 (RCW92). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Uma região H II obscurecida, onde os objetos mais brilhantes aparentemente estão em um plano de frente e um aglomerado escondido na imagem no infravermelho próximo pode ser visto na imagem do Spitzer.

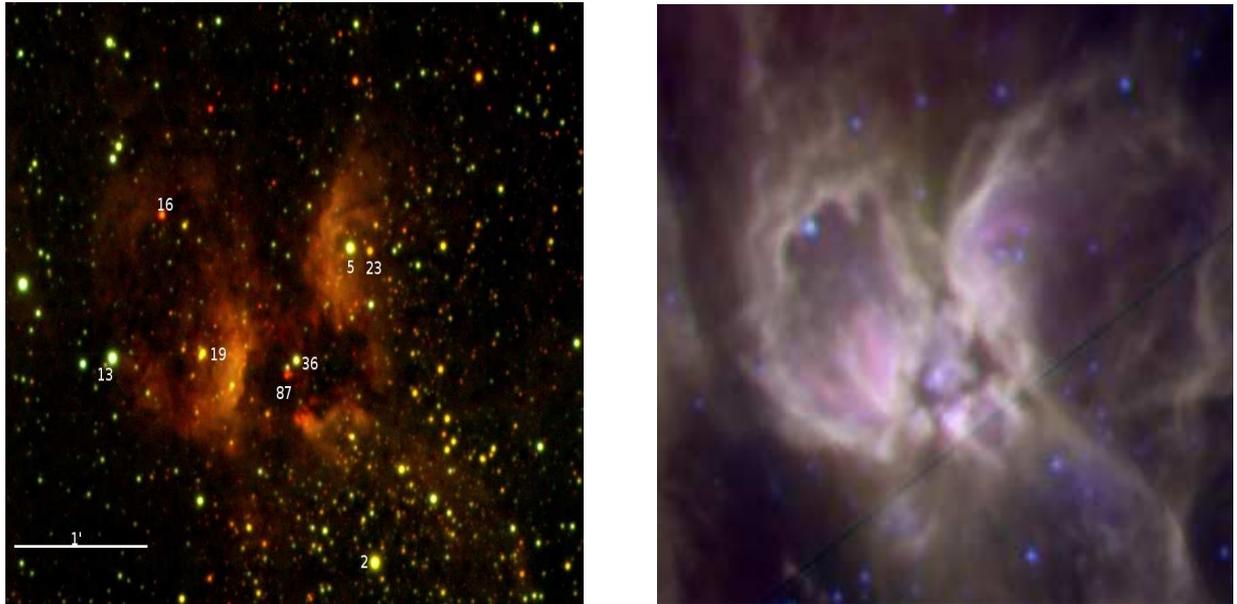


Figura 3.51: Imagens coloridas de G327.3-0.5 (RCW97). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 4,0$  minutos de arco de lado.

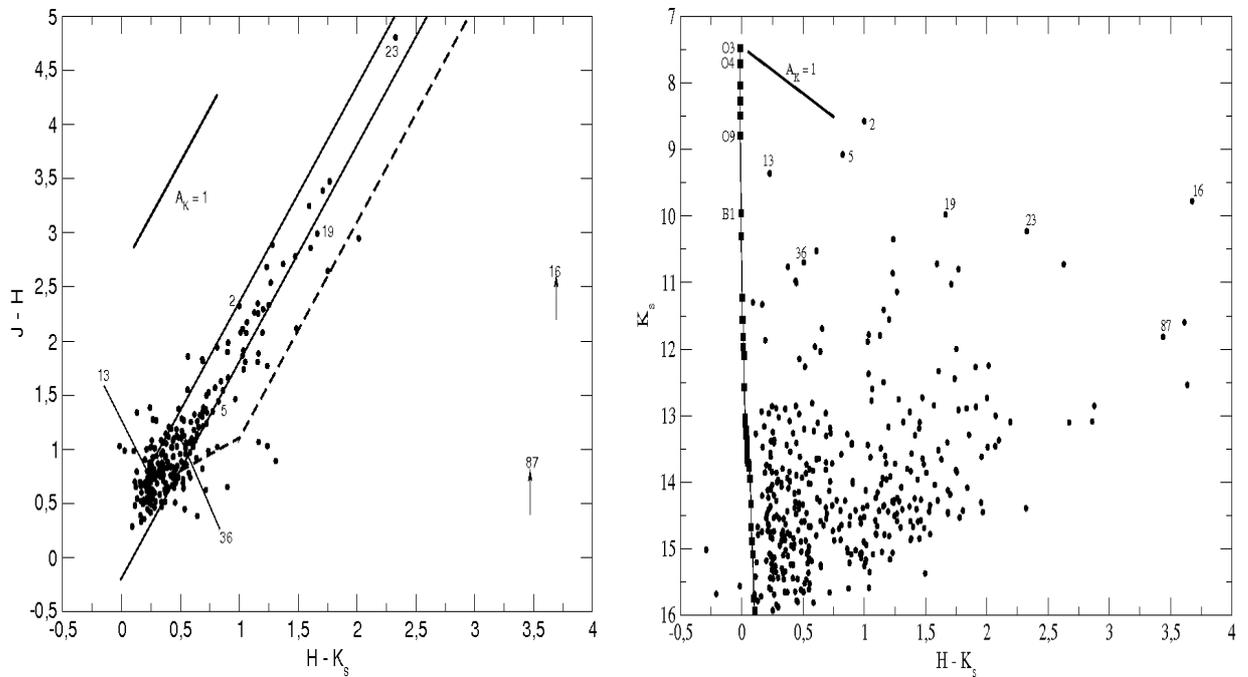


Figura 3.52: Região H II G327.3-0.5 (RCW97). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C), a maioria dos objetos aparentam estar em um primeiro plano. Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A magnitude limite nesta região é de  $J = 16,0$  mag.

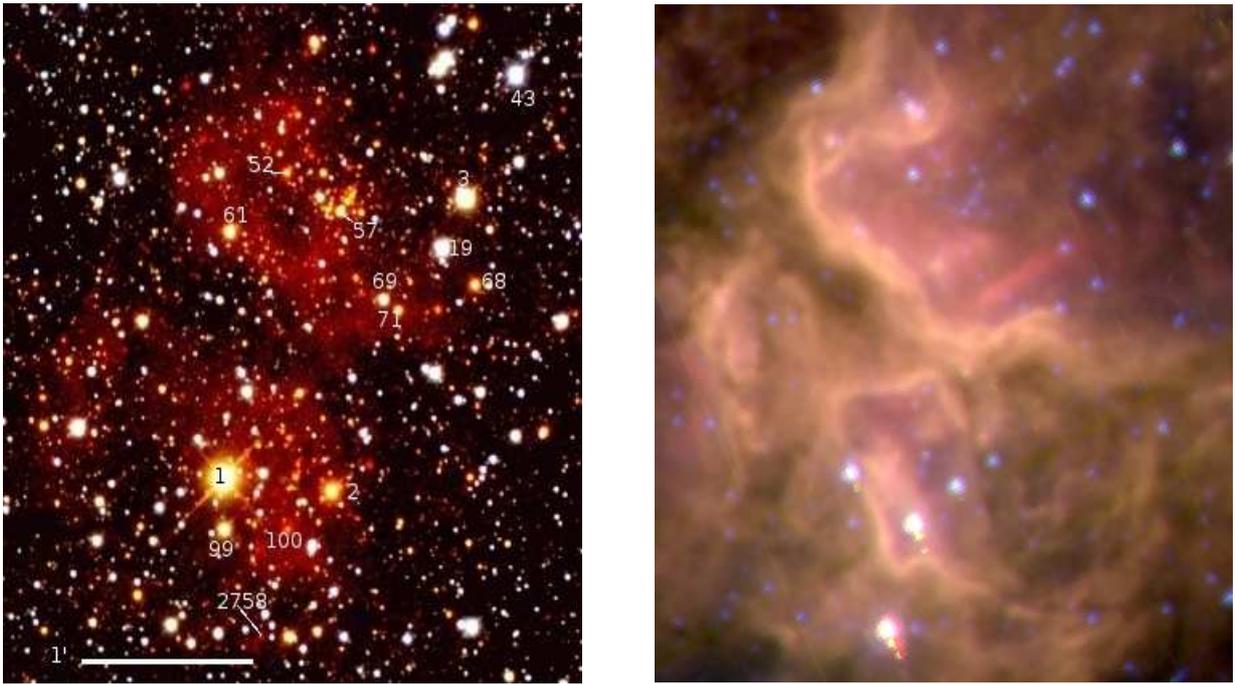


Figura 3.53: Imagens coloridas de G331.5-0.1. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o campo de visão é  $\approx 3,0 \times 4,0$  minutos de arco.

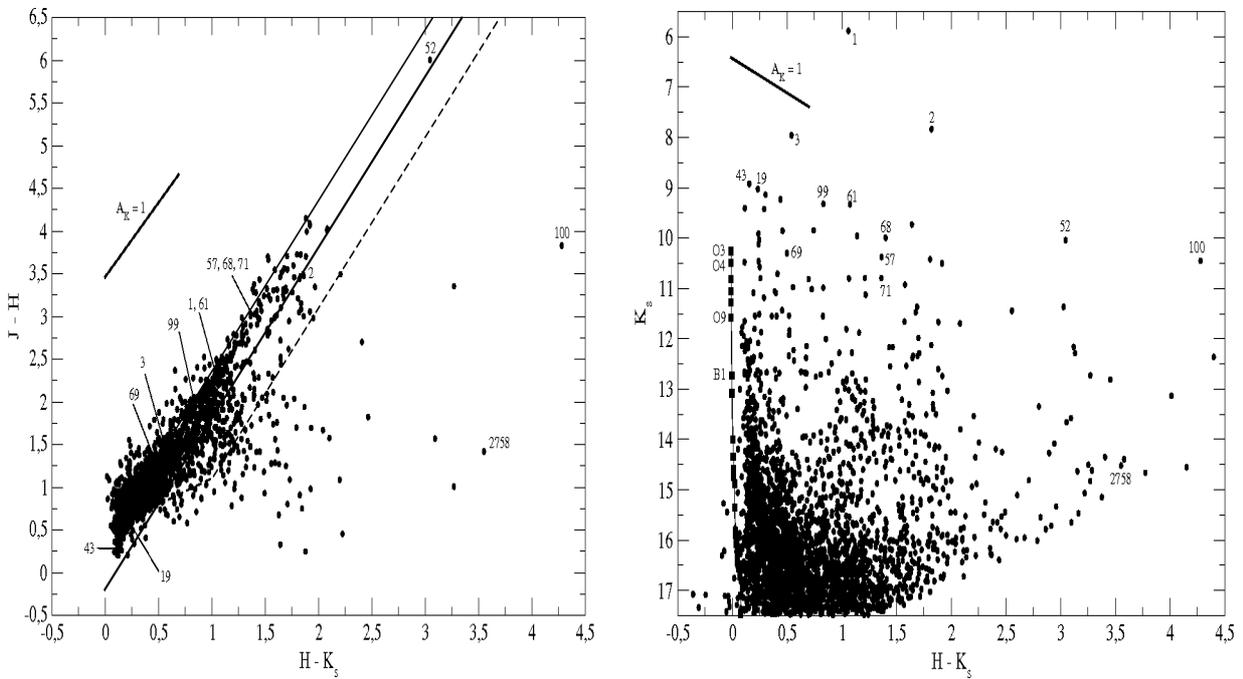


Figura 3.54: Região H II G331.5-0.1. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Os objetos #1, #2 e #3 estão saturados em nossas imagens, nestes casos utilizamos fotometria do catálogo do 2MASS. A distância cinemática adotada para esta região é de 10,8 kpc (Russeil, 2003), a qual, segundo o ajuste da sequência principal no diagrama C-M, aparenta ser sobre-estimada.

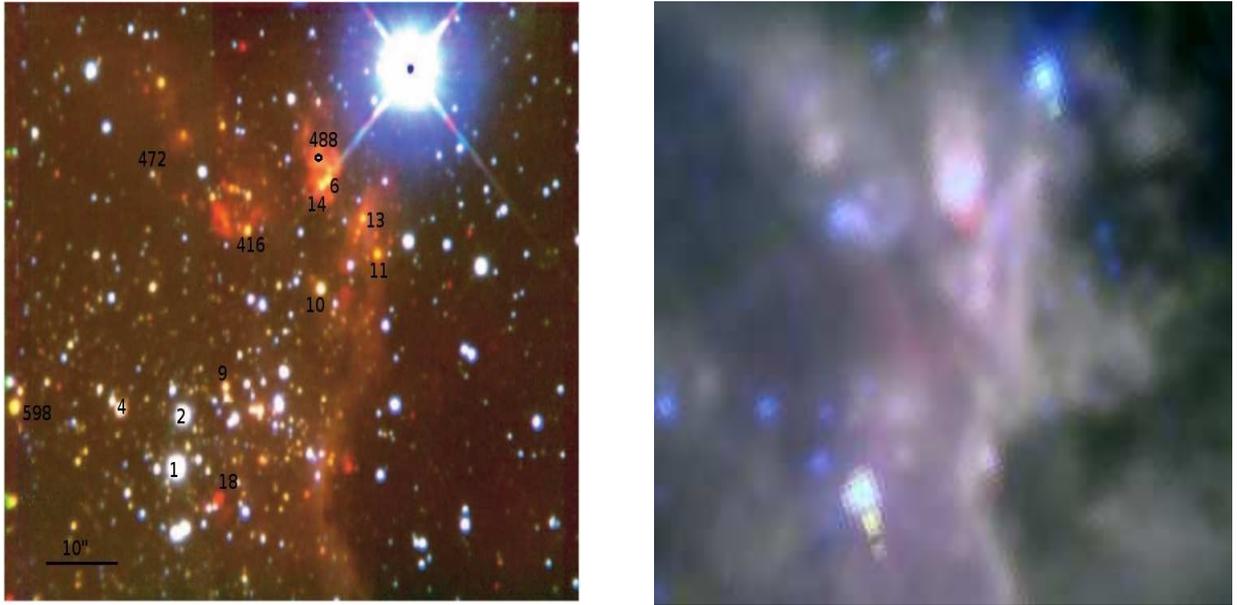


Figura 3.55: Imagens coloridas de G333.1-0.4. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ , reproduzida de Figuerêdo et al. (2005). Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 1,5$  minutos de arco de lado.

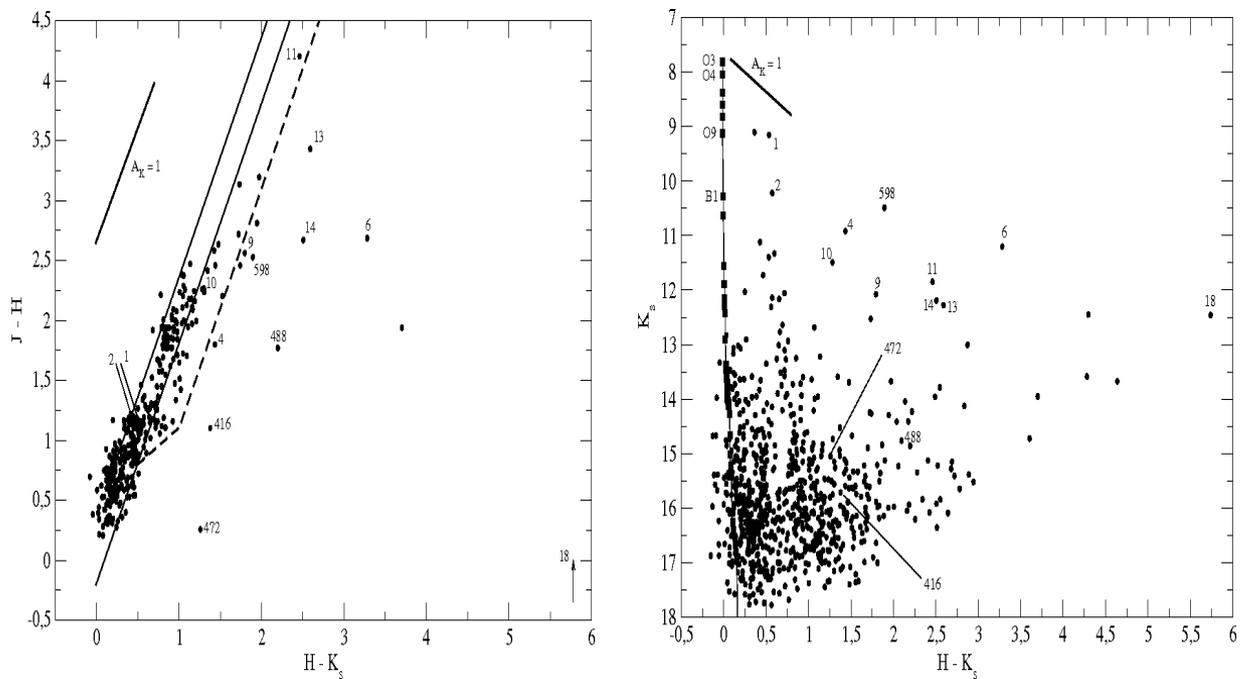


Figura 3.56: Região H II G333.1-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A distância adotada aqui é de 3,5 kpc (Russeil, 2003). Figuerêdo et al. (2005) determinaram uma distância espectrofotométrica de 2,6 kpc utilizando espectroscopia na banda  $K$  das estrelas #1 e #2. A magnitude limite na banda  $J$  é de 18,0 mag.



Figura 3.57: Imagens coloridas de G333.3-0.4. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens o campo de visão é de  $\approx 3,7 \times 5,0$  minutos de arco.

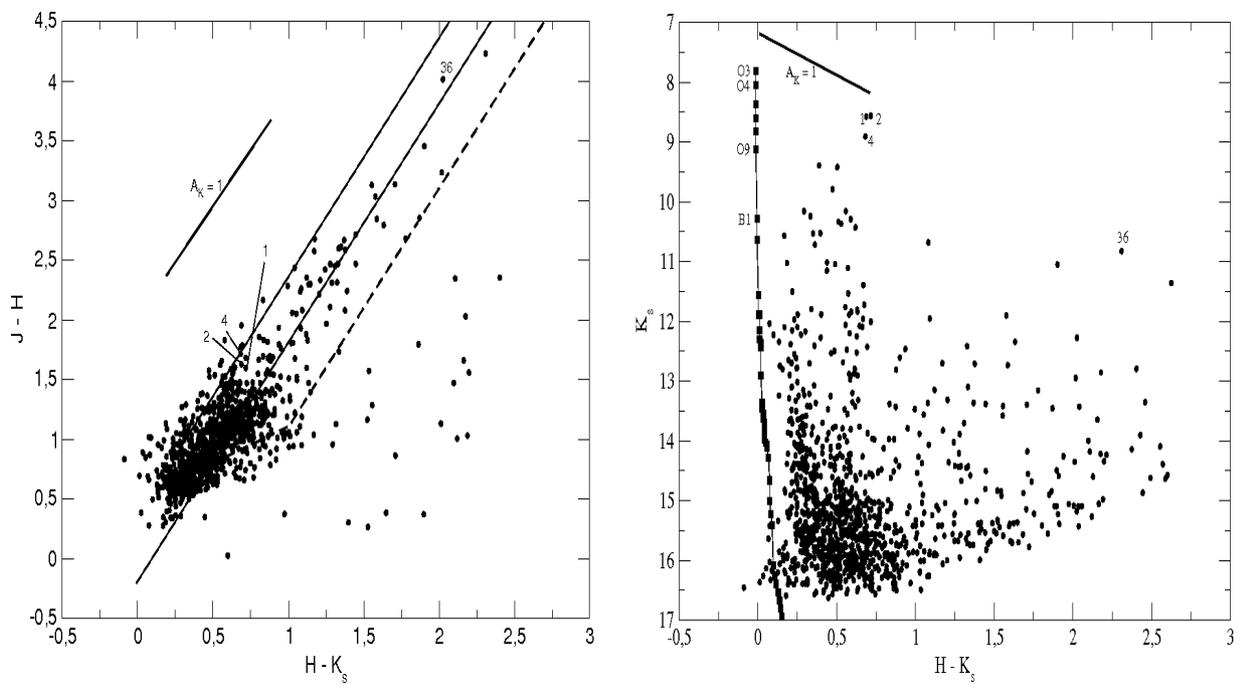


Figura 3.58: Região H II G333.3-0.4. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M).

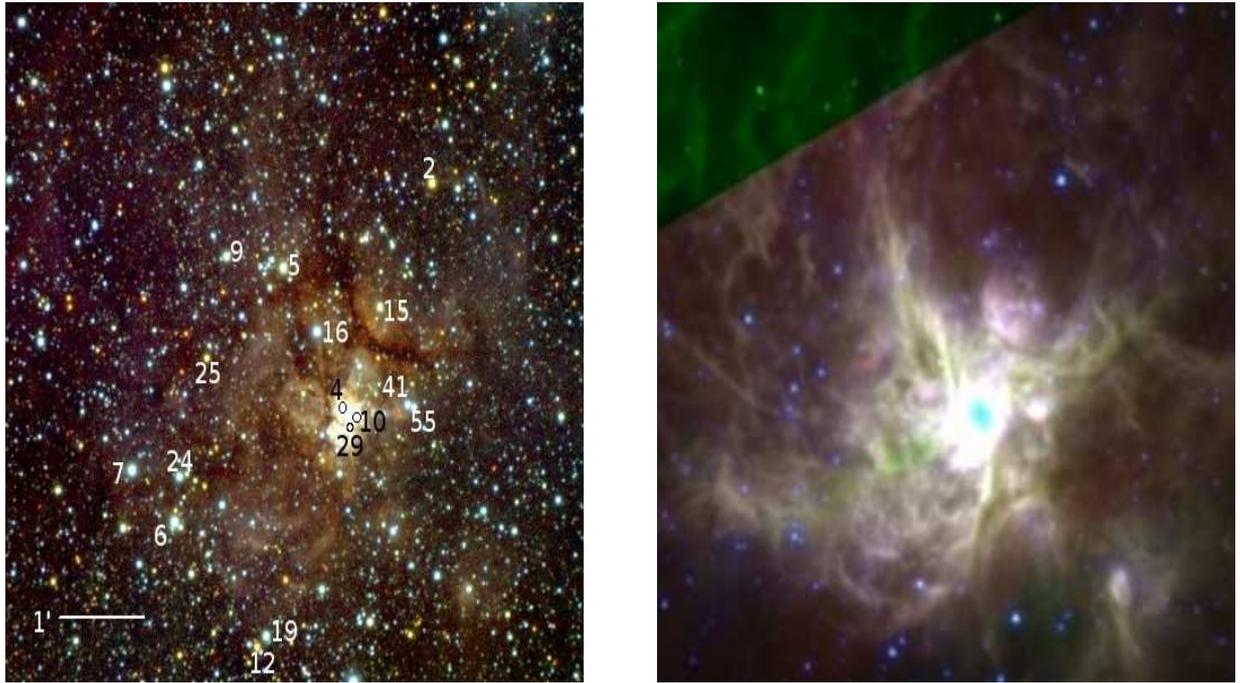


Figura 3.59: Imagens coloridas de G333.6-0.2. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 5,0$  minutos de arco de lado.

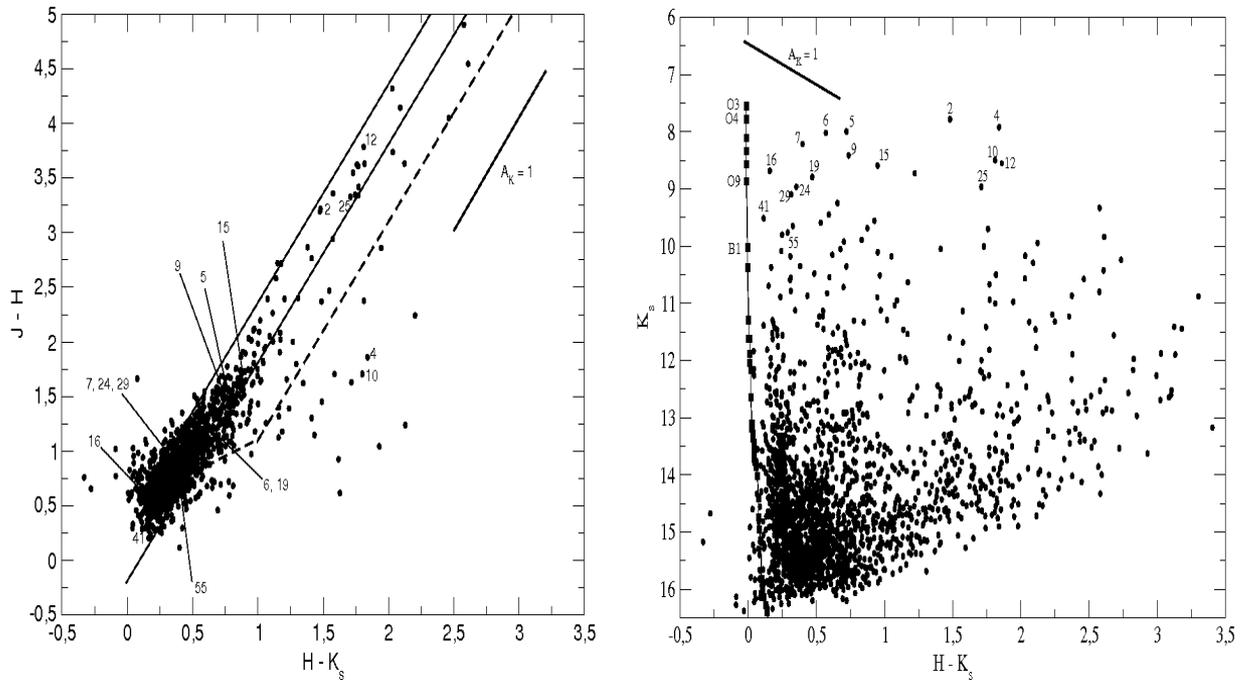


Figura 3.60: Regiões HII G333.6-0.2. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M).

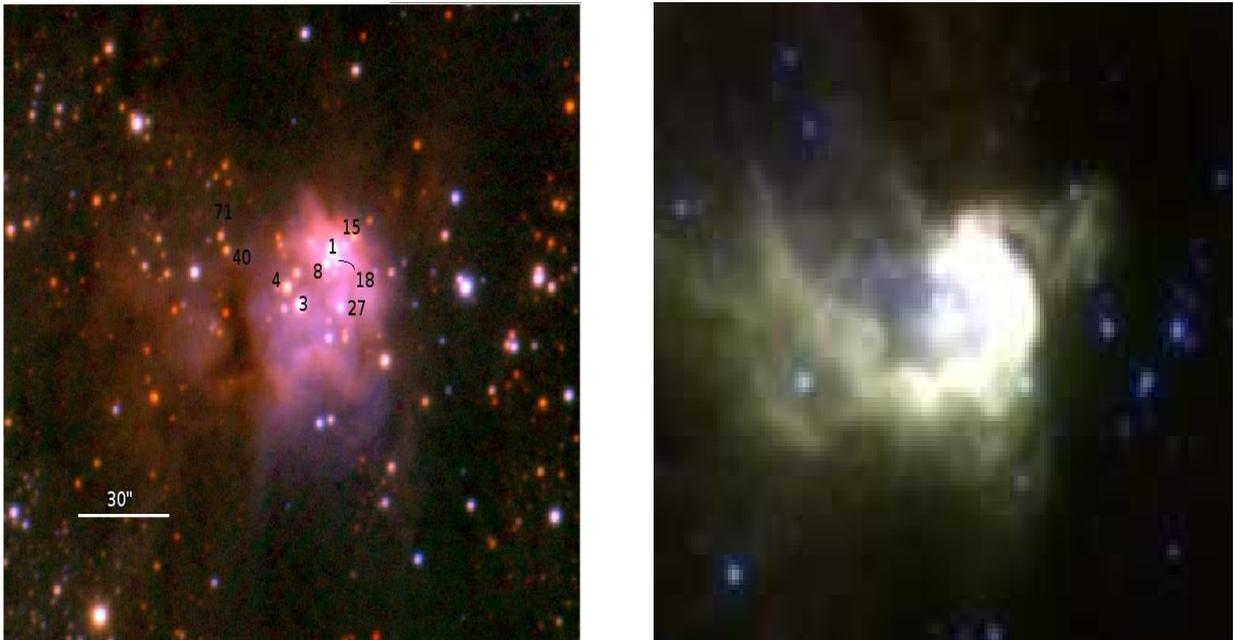


Figura 3.61: Imagens coloridas de G336.5-1.5 (RCW108). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas imagens, o tamanho é  $\approx 3,0$  minutos de arco de lado.

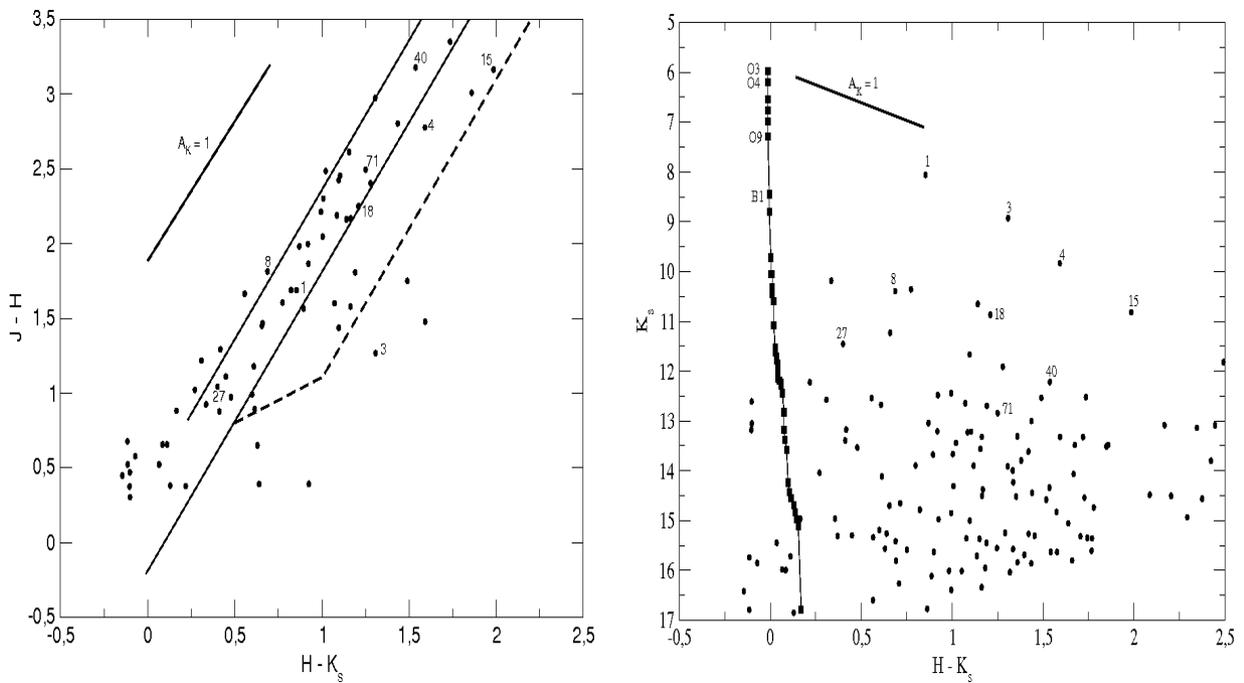


Figura 3.62: Região H II G336.5-1.5 (RCW108). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Devido à intensa nebulosidade, somente algumas estrelas foram detectadas nesta região.

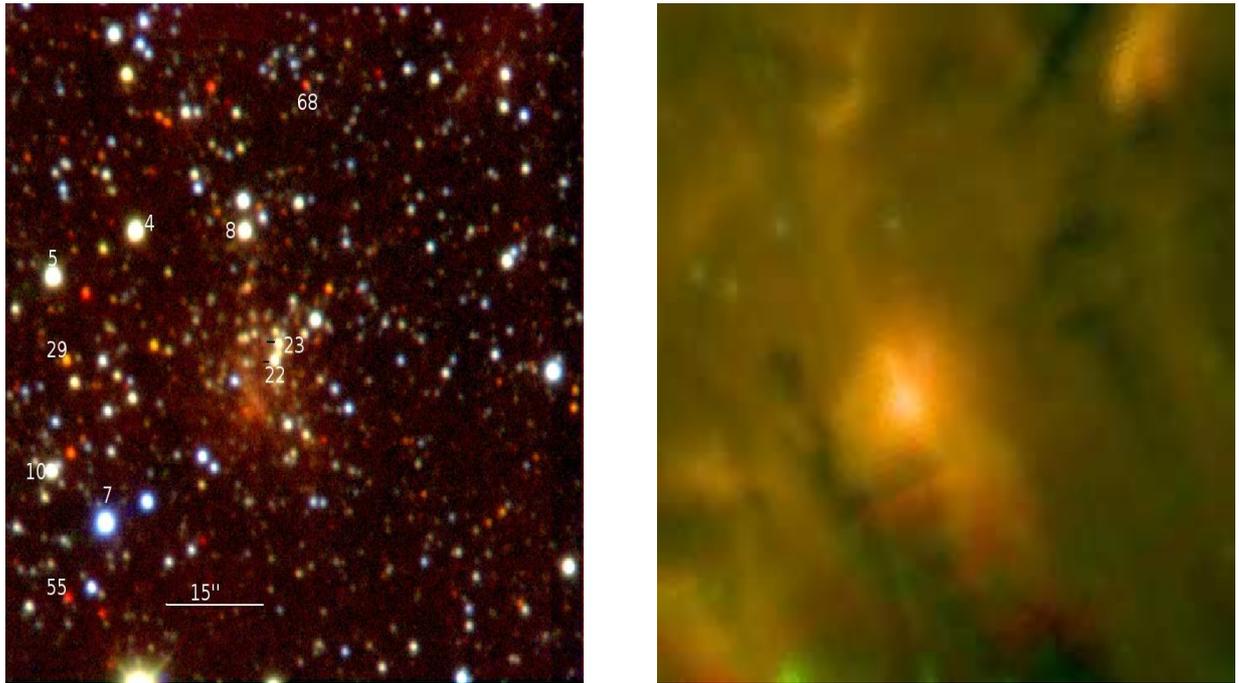


Figura 3.63: Imagens coloridas de G336.8-0.0. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 1,8$  minutos de arco de lado.

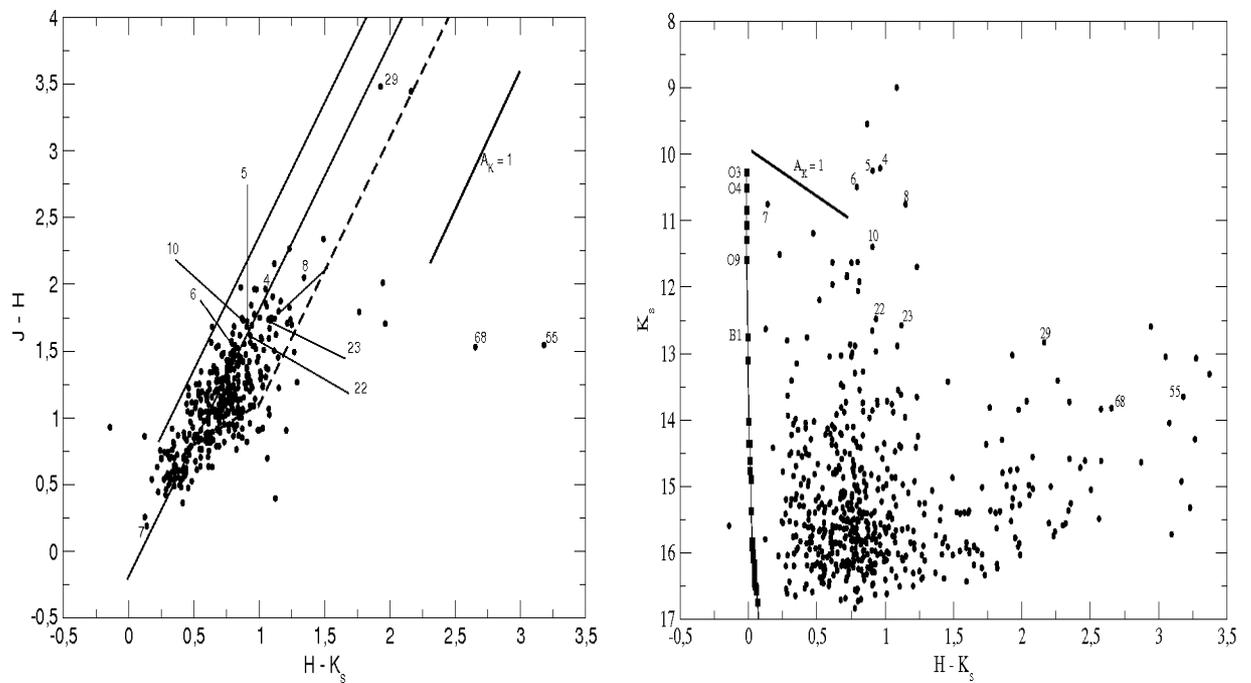


Figura 3.64: Região H II G336.8-0.0. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). O tamanho projetado do aglomerado é pequeno e o campo bastante cerrado, além da nebulosidade, isto dificultou a detecção de membros do aglomerado.

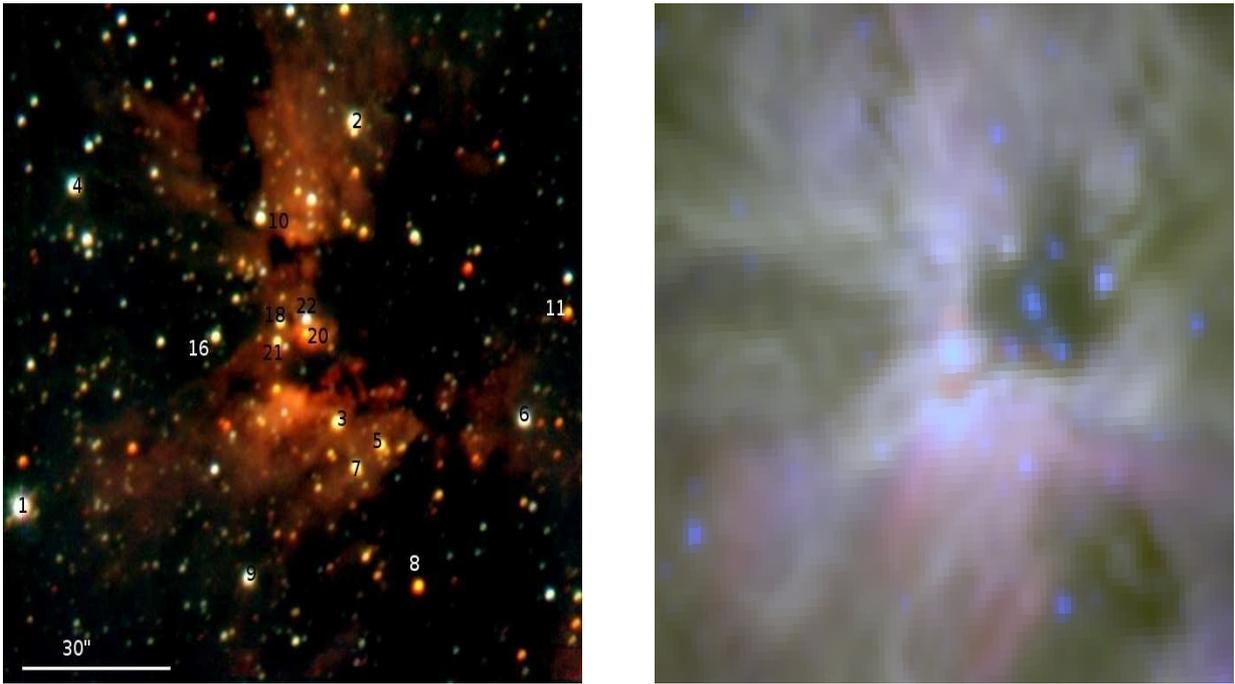


Figura 3.65: Imagens coloridas de G348.7-1.0 (RCW122). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 1,8$  minutos de arco de lado.

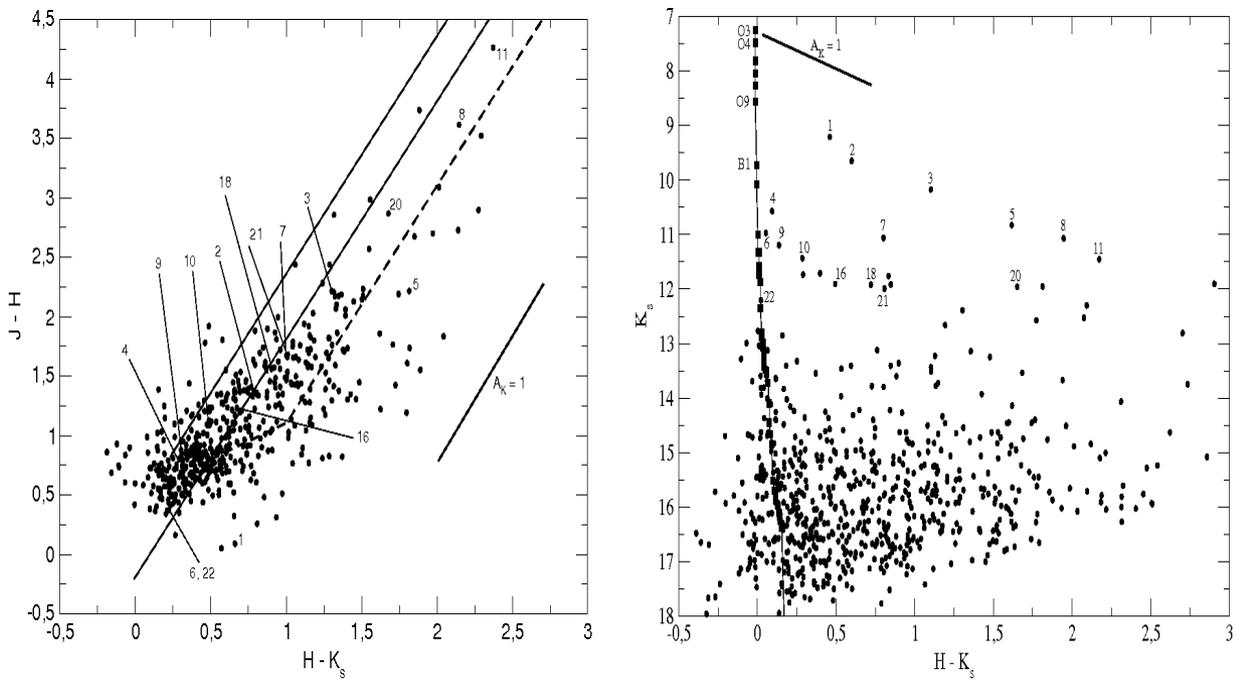


Figura 3.66: Região H II G348.7-1.0 (RCW122). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). A maior parte das estrelas deste campo é composta de objetos em primeiro plano, além disso, não foi detectado um aglomerado estelar bem definido. Na imagem do Spitzer, é possível ver algumas estrelas altamente obscurecidas que estão atrás da nuvem escura.

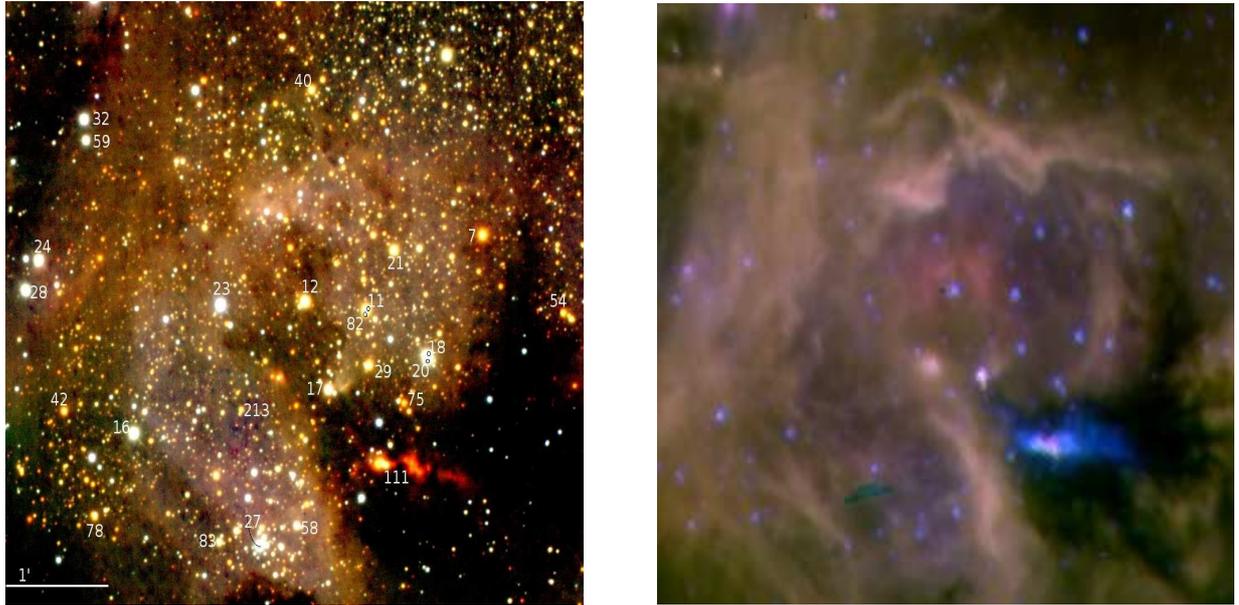


Figura 3.67: Imagens coloridas de G351.2+0.7. Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é de  $\approx 5,0$  minutos de arco de lado.

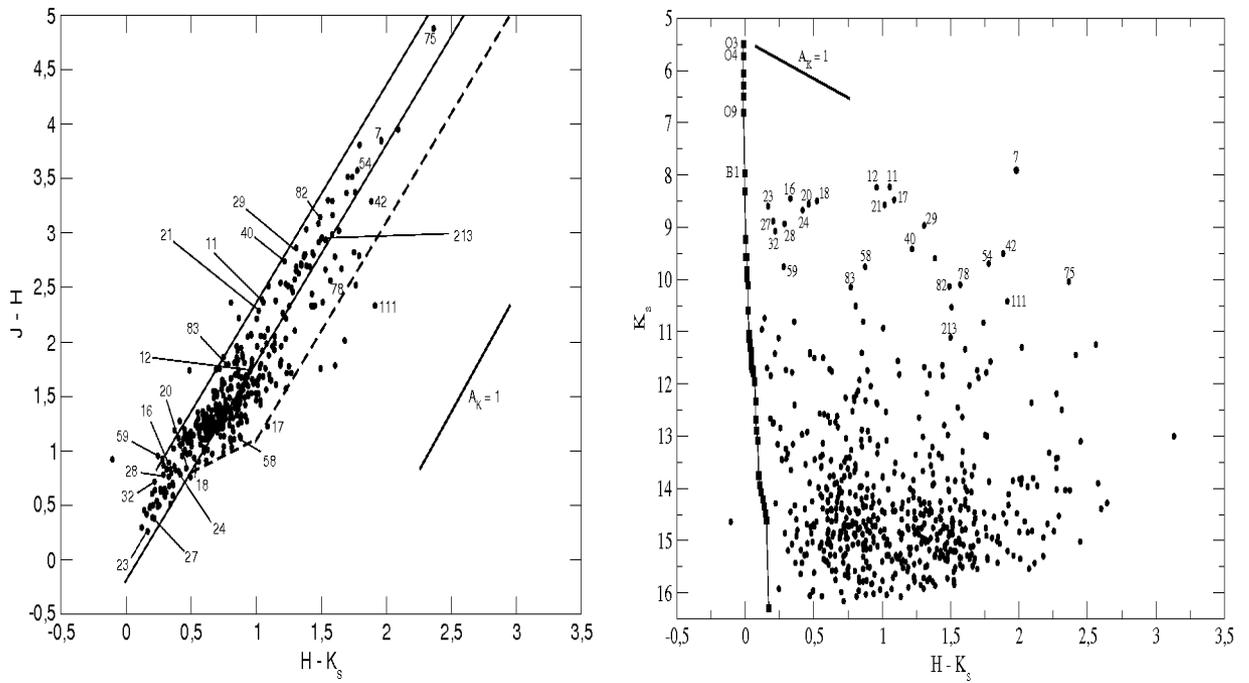


Figura 3.68: Região HII G351.2+0.7. Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M).

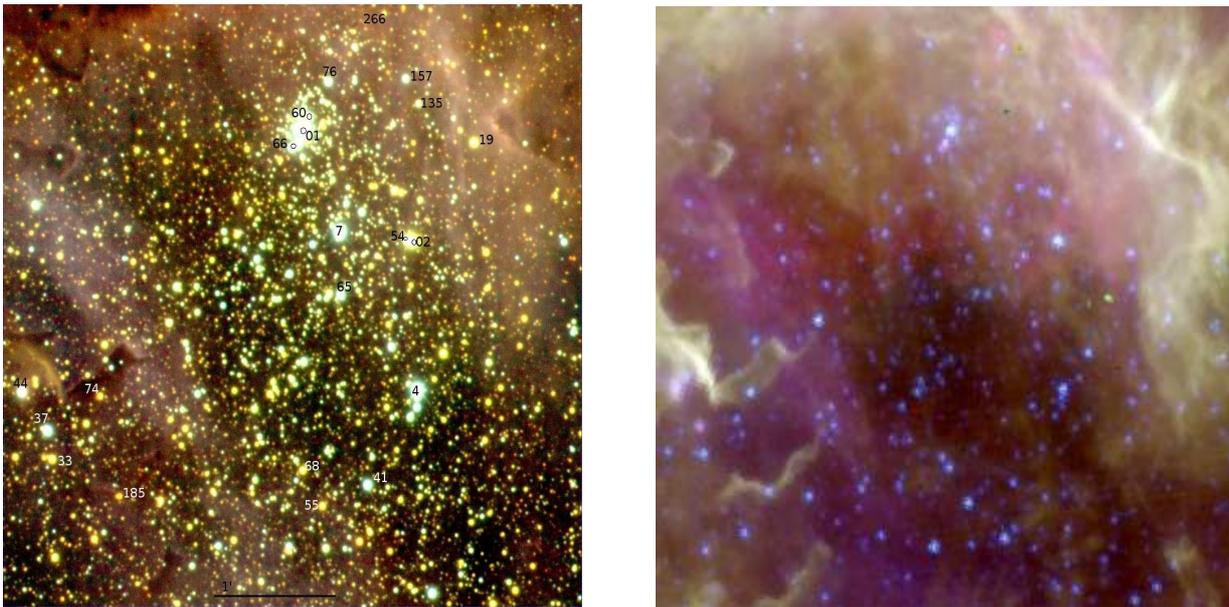


Figura 3.69: Imagens coloridas de G353.2+0.6 (RCW131). Esquerda: Imagem colorida  $JHK_s$ . Direita: Imagem colorida do IRAC-Spitzer. Em ambas as imagens, o tamanho é  $\approx 4,0$  minutos de arco de lado.

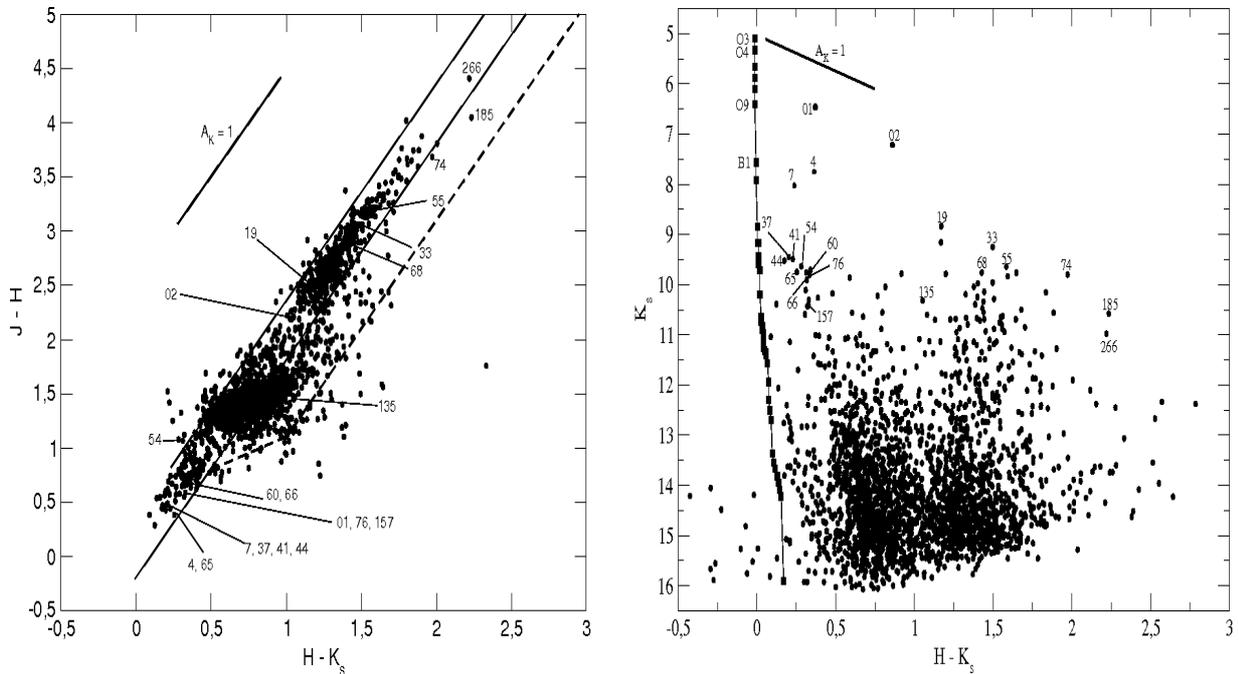


Figura 3.70: Região H II G353.2+0.6 (RCW131). Esquerda: Diagrama cor-cor (C-C). Direita: Diagrama cor-magnitude (C-M). Ambos diagramas indicam, no mínimo, três grupos de objetos. O primeiro é um grupo de objetos quase não afetado por avermelhamento interestelar. O segundo grupo está em  $H - K_s \approx 0,75$  mag. E o último situa-se em  $H - K_s \approx 1,5$  mag.

### 3.6 Discussão

Neste capítulo foi apresentado um estudo no infravermelho próximo e médio (Spitzer) envolvendo 35 regiões H II Galácticas. Estas regiões foram escolhidas a partir dos catálogos de Conti e Crowther (2004), Bica et al. (2003) e Dutra et al. (2003). Conti e Crowther (2004) realizaram um censo completo de regiões H II gigantes em 6,0  $\mu\text{m}$ , baseado em parte em fluxos no infravermelho médio e distante, utilizando MSX e IRAS. Bica et al. (2003) e Dutra et al. (2003) realizaram um levantamento de aglomerados estelares no infravermelho próximo ao longo da Via Láctea utilizando o banco de dados do 2MASS.

As distâncias iniciais adotadas aqui são de origem cinemática (velocidade rotacional mais um modelo de rotação galáctica). Dentre as 35 regiões H II de nossa amostra, 24 delas foram indicadas como sendo regiões H II gigantes, baseado em suas distâncias cinemáticas e em suas luminosidades no contínuo em rádio.

O foco deste trabalho foi as propriedades fotométricas destas regiões nas bandas  $J$ ,  $H$ ,  $K_s$ . Utilizando informações morfológicas no infravermelho próximo e imagens do IRAC-Spitzer, junto com diagramas C-C e C-M, cada região foi colocada em um estágio de evolução qualitativo. Estes estágios foram denominados  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ou  $D$ .

Utilizando a sequência principal em diagramas C-M foi possível verificar se as distâncias cinemáticas são consistentes com a distribuição dos membros dos aglomerados nestes diagramas. Em 14 (catorze) regiões H II houve grandes discrepâncias, onde o topo da linha da sequência principal (estrelas de tipo espectral O) é menos brilhante que alguns dos membros destes aglomerados. Isto implica que a distância verdadeira é menor que a adotada por metodologias cinemáticas. Outras determinações de distâncias, como paralaxes trigonométricas e espectrofotométricas têm (tipicamente) apontado valores menores para as distâncias de regiões de formação estelar que as respectivas distâncias cinemáticas. Nessa amostra de 35 regiões H II Galácticas, 14 (catorze) apresentam distâncias menores que as respectivas distâncias cinemáticas. Estas regiões estão demarcadas como “P” (Próximas) nas Tabelas 3.1 e 3.2. Foi apontada a existência de 09 (nove) regiões H II que apresentam distâncias cinemáticas que são compatíveis com a localização da sequência principal nos diagramas C-M. Estas regiões estão demarcadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 como “C” (Concordam). Não foi possível checar esta concordância entre as distâncias cinemáticas e a localização do topo da sequência principal em diagramas C-M para 10 (dez) regiões H II

da amostra, devido a um pequeno número de objetos detectados ou à presença de objetos estelares mais evoluídos, e portanto fora da sequência principal. Estas regiões estão demarcadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 como “D” (Desconhecido). Finalmente, 02 (duas) regiões H II podem estar mais distantes do que o suposto por metodologias cinemáticas. Estas duas estão demarcadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 como “L” (Longínquas). Mais interessante ainda, elas estão próximas à linha de visada ao Centro Galáctico. As imagens e diagramas C-M e C-C fornecem excelentes candidatos a fotosferas “nuas” para observações espectroscópicas, de forma a expandir a amostra de regiões H II com distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica.

Também foi identificado um conjunto de MYSOs, utilizando as imagens e diagramas C-M e C-C. Como esperado, a presença destes MYSOs, é mais proeminente em regiões menos evoluídas, onde o gás e a poeira ainda estão presentes. Uma lista de MYSOs detectados neste trabalho está exibida (no Apêndice) nas Tabelas A.1, A.2 e A.3. Lá estão apresentadas a identificação do objeto, as coordenadas equatoriais (J2000) e suas respectivas magnitudes na banda  $K_s$ .

## Distâncias Espectrofotométricas na Banda K

O desenho da estrutura espiral da Galáxia ainda tem grandes incertezas, mesmo para braços próximos ao Sol. O número de braços, seus tamanhos e sua distribuição ainda são temas controversos na comunidade científica. Uma vez que estamos localizados no plano da Via Láctea, temos uma vista de perfil e enxergamos os braços espirais projetados numa faixa da ordem de 1 grau de altura.

A distribuição espacial dos braços espirais da Via Láctea foi esboçada por vários autores, por exemplo: Georgelin e Georgelin (1976); Russeil (2003). O termo esboço ainda é o mais apropriado para uma distribuição destes braços porque estes trabalhos carecem de testes apurados por técnicas diferentes. Alguns trabalhos indicam que a Via Láctea tem dois braços espirais (Lin e Shu, 1964) enquanto outros apontam a existência de quatro braços espirais (Georgelin e Georgelin, 1976; Russeil, 2003).

O valor exato da distância do Sol ao centro galáctico ( $R_{\odot}$ ) está diretamente relacionado a qualquer metodologia que utilize modelos de rotação galáctica. Um exemplo clássico é a determinação de distâncias através da velocidade radial de regiões H II. Para isso, mede-se a componente radial da velocidade de rotação galáctica do gás ionizado, por meio da determinação do deslocamento de linhas espectrais de recombinação, e daí se obtém a distância através do uso de algum modelo de rotação galáctica. Ao longo desta tese, sempre que tratarmos de resultados obtidos por meio de metodologias cinemáticas os valores adotados são aqueles recomendados pela IAU (*International Astronomical Union*):  $R_{\odot} = 8,5$  kpc e  $V_{LSR} = 220$  km s<sup>-1</sup>.

Para se ter acesso aos objetos nos braços espirais deve-se usar alvos que sejam bons traçadores da estrutura galáctica. Ou seja, que acompanhem o padrão espiral do gás,

uma vez que não se tem como ver nossa galáxia “de topo”. Os melhores objetos para esta finalidade são as regiões H II gigantes. Todas estas regiões gigantes estão inseridas no plano galáctico, e portanto, são obscurecidas pelo gás e pela poeira do meio interestelar. O método mais comum utilizado para vencer este obstáculo é medindo as componentes radiais de suas velocidades de rotação em torno do Centro Galáctico. Esta técnica, conhecida como “cinemática”, usa a faixa rádio do espectro eletromagnético porque o efeito da extinção interestelar é pequeno. Nesta faixa de (grandes) comprimentos de onda, o plano galáctico é, praticamente, transparente e um mapa de velocidades radiais ao longo do plano galáctico é simples de se obter. Porém, apenas o gás é detectado, já que estrelas normais não são rádio-fontes.

Determinações de distâncias destes objetos obscurecidos, sem lançar mão de modelos, tornaram-se factíveis. E assim, é possível agora confrontar os resultados obtidos por estas novas metodologias com os resultados cinemáticos.

Neste capítulo, revisamos os resultados espectrofotométricos para 27 (vinte e sete) regiões de formação estelar no plano da Galáxia. Todas estas regiões são da amostra de Conti e Crowther (2004) e têm distâncias determinadas pelas duas metodologias aqui comentadas. Distâncias determinadas pelo método cinemático e distâncias determinadas via paralaxe espectrofotométrica. Destas 27 regiões, 12 estão classificadas como gigantes. As demais regiões não-gigantes também são analisadas quanto à concordância, ou não, entre as distâncias cinemáticas e espectrofotométricas.

Além destas regiões com distâncias determinadas via paralaxe espectrofotométrica, também apresentamos resultados obtidos da literatura determinados através de paralaxe trigonométrica. A paralaxe trigonométrica, que usa um objeto extragaláctico (e extremamente distante da Via Láctea) como referencial fixo para se verificar o movimento anual (projetado no céu) do alvo em questão, e durante uma translação completa da Terra em torno do Sol, é um método de determinação de distâncias direto. Ele independe de modelos de rotação para a Via Láctea, bem como de leis de extinção interestelar, uma vez que o efeito medido (movimento anual projetado no céu) é puramente geométrico. Seu problema é que só fornece resultados precisos nas vizinhanças do Sol, onde existem poucas regiões de formação estelar. Mas ele é importante para testar outros métodos.

## 4.1 Amostra das Regiões com Distâncias Espectrofotométricas

Os dados utilizados aqui são um apanhado do que já foi publicado na literatura, revisando as magnitudes absolutas e cores intrínsecas, bem como as leis de extinção interestelar no infravermelho próximo e, portanto, de distâncias. Os alvos com distâncias determinadas via paralaxe espectrofotométrica foram selecionados a partir de trabalhos de Hanson et al. (1997) na região H II gigante M17, Bik et al. (2005) em uma amostra de 44 fontes de infravermelho do IRAS, onde a maioria faz parte de regiões H II ultracompactas, mas com algumas fontes embebidas em regiões H II gigantes. Das 44 fontes estudadas por Bik et al. (2005), 39 estavam fotosfericamente “nuas”, as demais apresentavam espectros dominados por características nebulares. Usamos também resultados de trabalhos do nosso grupo (Blum et al., 1999, 2000, 2001; Figuerêdo et al., 2005, 2008). Os dados espectroscópicos de Hanson et al. (1997) foram obtidos utilizando o detector OSIRIS no telescópio de 4 metros (Blanco) e o detector IRS no telescópio de 1,5 metros, ambos do CTIO. Os dados espectroscópicos de Bik et al. (2005) foram obtidos por meio do detector ISAAC acoplado ao telescópio Antu do VLT. Já os dados de nosso grupo (Blum et al., 1999, 2000, 2001; Figuerêdo et al., 2005, 2008) foram obtidos ao longo dos últimos 10 anos e, para isso, fizemos uso de diversos instrumentos disponíveis em telescópios no Chile e nos Estados Unidos. Os do Chile pertencem ao CTIO: 1,5 metros e Blanco 4 metros. Também, temos dados do telescópio Mayall do Kitt Peak de 4 metros. Estes são imagens nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K_s$  obtidas por meio dos detectores CIRIM, ISPI e OSIRIS. Além disso, espectros na banda  $K_s$ , de estrelas candidatas ao tipo espectral O (fontes ionizantes das regiões H II), também foram tomados com o detector IRS.

## 4.2 Modelos Cinemáticos

No Capítulo 1, discutimos brevemente sobre a dificuldade em se determinar o tipo morfológico da Via Látea. Foi apontado que a técnica mais usada para isto é a que utiliza modelos de rotação Galáctica, bem como suas vantagens e desvantagens com relação a outros métodos. Estes outros métodos de determinação de distância, que são utilizados em traçadores da estrutura em espiral, também foram discutidos: as paralaxes espectrofotométrica e trigonométrica.

Quantitativamente, na metodologia cinemática observa-se a velocidade projetada na linha de visada do objeto em estudo e, ao assumir que esta velocidade projetada é, puramente a velocidade radial, por trigonometria pode-se mostrar que:

$$V_{LSR} = R_{\odot} [\omega(d_G) - \omega_{\odot}] \sin(l) \cos(b) \quad (km \ s^{-1}), \quad (4.1)$$

onde,  $\omega$  é a velocidade angular de rotação,  $l$  e  $b$  são as coordenadas galácticas do alvo em estudo e  $d_G$  a distância galactocêntrica. Desta forma, a relação entre esta velocidade e a distância galactocêntrica define o modelo de rotação, que está inserido na variável  $\omega$ . Estas velocidades são medidas com boa precisão, com erros de apenas alguns  $km \ s^{-1}$  (Brand e Blitz, 1993).

Há várias expressões para ajustar a relação entre velocidade rotacional e distâncias aos alvos (modelos de rotação galáctica), podemos citar: Clemens (1985), Brand e Blitz (1993), Russeil (2003), entre outros. Existem outros variantes, como o de Lépine et al. (2008) que usa o modelo de Clemens (1985) com um termo de epíclio, mas neste trabalho nos atemos aos catálogos publicados.

Abaixo, estão as expressões de dois destes modelos: o de Clemens (1985) e o de Russeil (2003), respectivamente. E estão re-escritos de maneira similar (em termos de  $\omega/\omega_{\odot}$ ):

$$\frac{\omega(d_G)}{\omega_{\odot}} = 263 \left( \frac{R_{\odot}}{d_G V_{\odot}} \right) \exp \left( -\frac{d_G}{90} - \frac{0.90}{d_G} \right) + 658 \left( \frac{R_{\odot}}{d_G V_{\odot}} \right) \exp \left( -\frac{d_G}{0.69} - \frac{0.24}{d_G} \right), \quad (4.2)$$

$$\frac{\omega(d_G)}{\omega_{\odot}} = 0.705 \left( \frac{d_G}{R_{\odot}} \right)^{(0.35 \times 10^{-8})} + 0.295 \left( \frac{R_{\odot}}{d_G} \right). \quad (4.3)$$

Nos dois casos, foram utilizados constantes sugeridas pela IAU,  $R_{\odot} = 8,5$  kpc e  $V_{\odot} = 220$   $km \ s^{-1}$ . Clemens (1985) usou linhas de emissão da molécula *CO* para várias nuvens, através do plano da Galáxia, e adotou a curva que melhor ajustou seus dados. Russeil (2003) usou várias regiões de formação estelar para determinar a curva de rotação da Galáxia (Fig. 4.1). Para isto, usou uma rotina numérica para ajustar seus dados observacionais (velocidade radial projetada). Em seu trabalho, Russeil (2003) comenta que sua curva de rotação para

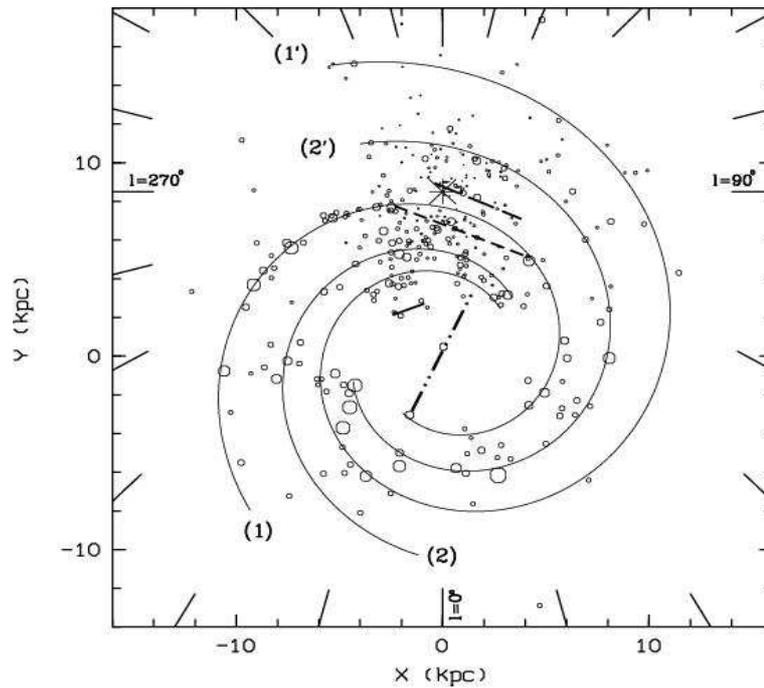


Figura 4.1: Distribuição dos objetos da amostra de Russeil (2003) no plano da Via Láctea.

a Galáxia é basicamente a mesma obtida por Brand e Blitz (1993), diferindo apenas nos expoentes e coeficientes.

No modelo de rotação galáctica, a relação entre a distância galactocêntrica  $d_G$  e a distância heliocêntrica  $d$  do alvo em questão é dada pela relação trigonométrica:

$$d_G = \sqrt{d^2 \cos^2(b) + R_\odot^2 - 2dR_\odot \cos(b) \cos(l)} \quad (kpc). \quad (4.4)$$

Salvo menção ao contrário, serão utilizados os resultados cinemáticos de Russeil (2003) por ter uma amostra grande de medidas.

### 4.3 Paralaxe Trigonométrica

Uma outra metodologia utilizada para se determinar distâncias de objetos celestes é a paralaxe trigonométrica. Este método se baseia no movimento aparente e projetado no céu ao longo do tempo. Para isso, um objeto mais distante é utilizado como referencial fixo e, quando a Terra atingir o outro lado em torno do Sol (seis meses após a primeira

observação) mede-se o quanto o objeto em estudo se deslocou em comparação ao referencial fixo ao fundo.

Utilizando interferometria de base longa (VLBI), vários autores têm determinado distâncias por paralaxe trigonométrica de regiões de formação estelar. A maior parte das medições de paralaxe trigonométrica via VLBI tem utilizado masers de metanol em 12 GHz. Estes masers associados a regiões de formação de estrelas de alta massa são alvos excelentes, uma vez que são alvos compactos, apresentam uma longa sobrevida e estão bastante próximos das respectivas estrelas de alta massa que os ionizam (Reid et al., 2009). Já os masers de  $H_2O$  não são tão bons substitutos, pois duram pouco menos de 1 ano como fontes utilizáveis para paralaxe trigonométrica (Reid et al., 2009). Para distâncias grandes, a paralaxe é pequena limitando seu uso à vizinhança do Sol.

Na Tabela 4.1, mostramos as regiões de formação estelar para as quais existem distâncias determinadas via paralaxe trigonométrica ( $d_\pi$ ). A identificação dos objetos está na primeira coluna, suas coordenadas galácticas ( $l, b$ ) na segunda e terceira colunas, suas distâncias cinemáticas ( $d_{cin}$ ) na quarta coluna, suas distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica ( $d_\pi$ ) e as respectivas referências nas duas últimas colunas. As distâncias cinemáticas utilizadas neste capítulo são as de Reid et al. (2009). Ele mediu as componentes radiais das velocidades de rotação das regiões de sua amostra e usou o modelo de rotação galáctica de Brand e Blitz (1993). Mas seus resultados não devem diferir muito do que seria obtido por Russeil (2003), uma vez que os dois trabalhos utilizaram o mesmo modelo de rotação galáctica (Brand e Blitz, 1993).

Interessante que objetos mais próximos à direção do centro galáctico apresentam distâncias que não diferem muito dos resultados cinemáticos, algumas chegam a ser até maiores. Afastando-se um pouco mais do centro, onde o método cinemático deveria dar melhores resultados, as distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica são (com exceção de duas apenas) menores que as distâncias cinemáticas.

#### 4.4 Paralaxe Espectrofotométrica na Banda K

Nesta seção, analisamos os resultados baseados em distâncias espectrofotométricas no infravermelho próximo, ou seja, obtidos através do uso de espectroscopia na banda K e fotometria em J, H e K. Para isto, em cada região H II são selecionadas estrelas candidatas

*Tabela 4.1* - Regiões com distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica. Nas colunas 1 e 2 estão as coordenadas galácticas. Na coluna 3 estão os nomes das regiões. Na coluna 4 estão as distâncias cinemáticas. Na coluna 5 estão as distâncias por paralaxe trigonométrica. Na coluna 6 estão as referências.

$l$	$b$	Região	$d_{cin.}^{15}$	$d_{\pi}$	Ref.
			<i>kpc</i>	<i>kpc</i>	
0,67	-0,03	Sgr B2	8,50	$7,90_{-0,70}^{+0,80}$	14
23,01	-0,41	G23.0-0.4	4,97	$4,59_{-0,33}^{+0,38}$	5
23,44	-0,18	G23.4-0.2	5,60	$5,88_{-0,93}^{+1,37}$	5
23,66	-0,13	G23.6-0.1	5,04	$3,19_{-0,35}^{+0,46}$	6
35,20	-0,74	G35.2-0.7	1,98	$2,19_{-0,20}^{+0,24}$	4
35,20	-1,74	G35.2-1.7	2,85	$3,27_{-0,42}^{+0,56}$	4
49,49	-0,37	W51 (IRS2)	5,52	$5,13_{-1,40}^{+2,90}$	3
59,78	+0,06	G59.7+0.1	3,07	$2,16_{-0,09}^{+0,10}$	3
109,87	+2,11	Cep A	1,09	$0,70_{-0,04}^{+0,04}$	2
111,54	+0,78	NGC7538	5,61	$2,65_{-0,11}^{+0,12}$	2
122,02	-7,07	IRAS00420	3,97	$2,17_{-0,05}^{+0,05}$	7
123,07	-6,31	NGC281	2,69	$2,82_{-0,24}^{+0,24}$	8
133,95	+1,06	W3(OH)	4,28	$1,95_{-0,04}^{+0,04}$	9
135,28	+2,80	WB 89-437	8,68	$6,00_{-0,02}^{+0,02}$	10
188,95	+0,89	S252	4,06	$2,10_{-0,03}^{+0,03}$	1
196,45	-1,68	S269	3,98	$5,28_{-0,22}^{+0,24}$	11
209,01	-19,38	Orion	0,99	$0,44_{-0,02}^{+0,02}$	12
232,62	+1,00	G232.6+1.0	1,92	$1,68_{-0,09}^{+0,11}$	1
239,35	-5,06	VY CMa	1,56	$1,14_{-0,09}^{+0,11}$	13

Referências: (1) - Reid et al. (2009, a); (2) - Moscadelli et al. (2009); (3) - Xu et al. (2009); (4) - Zhang et al. (2009); (5) - Brunthaler et al. (2009); (6) - Bartkiewicz et al. (2008); (7) - Moellenbrock et al. (2009); (8) - Sato et al. (2008); (9) - Xu et al. (2006); Hachisuka et al. (2006); (10) - Hachisuka et al. (2009); (11) - Honma et al. (2007); (12) - Hirota et al. (2007); Menten et al. (2007); (13) - Choi et al. (2008); (14) - Reid et al. (2009, c); (15) - Reid et al. (2009, b).

ao tipo espectral O. Estas são as fontes ionizantes do gás circundante ao jovem aglomerado estelar. Como este gás circundante ao aglomerado estelar é o mesmo que se utiliza na determinação de distâncias pelo método cinemático, determinar a distância de uma dada região de formação estelar usando para isso o gás ionizado ou as estrelas ionizantes, *a priori*, deveria levar a resultados similares.

A seleção dos objetos para espectroscopia foi realizada através dos procedimentos já descritos no capítulo sobre a metodologia (Capítulo 2). Os alvos são selecionados para espectroscopia na banda  $K$ , utilizando diagramas cor-cor e cor-magnitude (C-C e C-M, respectivamente), além de uma inspeção visual nas imagens no infravermelho próximo e médio (Spitzer, por exemplo).

Na banda  $K$ , a identificação do tipo espectral de uma dada estrela O segue a metodologia descrita em Hanson et al. (1996). Hanson et al. (1996) construíram um catálogo espectroscópico de estrelas quentes na banda  $K$ . Desta forma, podemos identificar o tipo espectral das fontes ionizantes das regiões H II de nossa amostra. O esquema de Hanson et al. (1996) não é sensível à classe de luminosidade. Isto pode parecer um problema, mas não é muito sério, pois assume-se que estes objetos estão na sequência principal (classe de luminosidade V) por ainda estarem associados à nebulosidade. Em alguns trabalhos anteriores, assumiu-se que a estrela associada a uma região de formação estelar estivesse na fase de sequência principal de idade zero. Porém, por tratar-se de estrelas de alta massa, o uso de classe de luminosidade V parece-nos ser a melhor alternativa. Evidentemente que uma situação oposta pode ocorrer. Uma dada região pode ser evoluída o suficiente para que as estrelas de alta massa tenham tido tempo necessário para sair da sequência principal. Mas, neste caso, já não haverá mais nebulosidade em torno do aglomerado central, e a classe de luminosidade pode ser controlada.

A partir do tipo espectral de uma dada estrela e usando a fotometria, pode-se determinar a distância de cada objeto em estudo por meio da clássica relação entre magnitudes absolutas e aparentes. A saber:

$$m_K - M_K = 5 \times \log(d) - 5 + A_K, \quad (4.5)$$

onde,  $A_K$  representa o avermelhamento interestelar. Desta forma,  $m_K$  é determinado

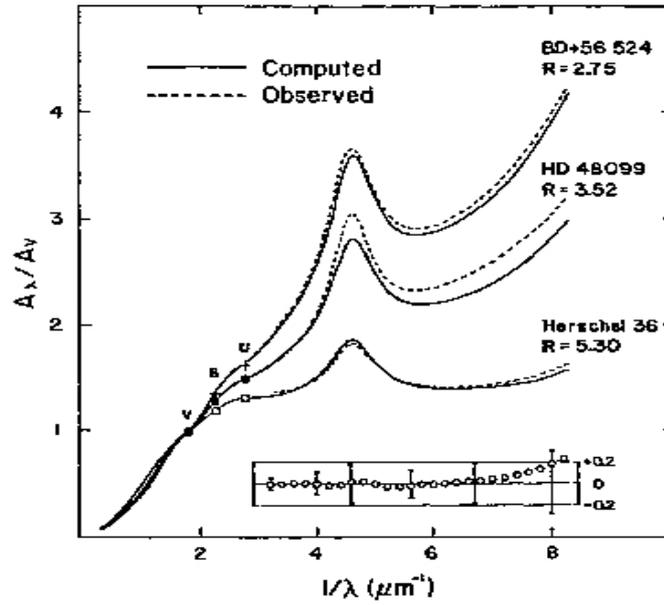


Figura 4.2: Razão entre extinções para diferentes alvos em função do comprimento de onda.

através da fotometria,  $M_K$  é determinado através da identificação do tipo espectral e a relação entre  $A_K$  e  $E(H - K)$  depende da lei de extinção. A inclinação do contínuo no espectro das estrelas quentes é degenerada no infravermelho próximo, assim o índice de cor intrínseca  $(H - K)_0$  para estrelas de tipos espectrais O e B é próximo de zero (Koorneef, 1983), e o excesso de cor é devido unicamente à extinção interestelar, se a fotosfera da estrela estiver “nua”.

Como visto no Capítulo 2, no infravermelho próximo a lei de extinção é dada por:

$$A_\lambda \propto \lambda^{-\alpha}. \quad (4.6)$$

Ou seja, uma das vantagens do infravermelho é que a extinção interestelar depende do comprimento de onda através de um expoente constante. A universalidade da lei de extinção no infravermelho pode ser vista na Fig. 4.2.

Partindo da definição:

$$E(J - K) = A_J - A_K, \quad (4.7)$$

e usando a relação entre  $A_\lambda$  e  $\lambda$ , a extinção na banda  $K$  pode ser re-escrita da seguinte maneira:

$$A_K = C \times E(J - K). \quad (4.8)$$

Ou seja, dado o excesso de cor  $E(J - K)$  é possível determinar o avermelhamento do alvo apenas por um fator constante ( $C$ ).  $A_K$  também pode ser determinado através do excesso de cor  $E(H - K)$ , mas a constante multiplicativa será, obviamente, diferente da utilizada na equação acima. Ao longo deste trabalho as cores  $J - K$  serão utilizadas, dado seu maior uso na literatura (nem todos os alvos têm  $H - K$  disponíveis). Para verificar o efeito da extinção na determinação da distância, usamos duas leis extremas de extinção interestelar. Como poderá ser visto mais adiante (Tabelas 4.5 e 4.6), na maioria dos casos a diferença entre as leis de extinção não explicam as discrepâncias com os resultados cinemáticos. Leis diferentes implicam em diferentes expoentes, e são estes expoentes que ditam o quão intensamente o meio interestelar interferirá na luz oriunda do objeto em estudo até o observador. Note que o expoente é negativo, e portanto, quanto maior o valor deste expoente menor será a extinção interestelar para um dado comprimento de onda. Neste capítulo, foram utilizadas as duas leis de extinção extremas que foram discutidas no Capítulo, Mathis (1990) e Stead e Hoare (2009), onde seus respectivos expoentes são  $\alpha = 1,70$  e  $\alpha = 2,14$ .

#### 4.5 Discrepâncias entre o Método Espectrofotométrico e o Método Cinemático

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, listam cada alvo utilizado neste trabalho. Nestas tabelas estão exibidos os tipos espectrais de cada alvo, dentro de um limite de incerteza estimado pelos autores (quando o tipo espectral foi apontado sem limites de incerteza, foi adotado um limite de um tipo espectral maior e outro menor). As magnitudes visuais absolutas foram coletadas a partir do trabalho de Vacca et al. (1996). As cores intrínsecas são de Koornneef (1983) e as magnitudes e cores aparentes foram obtidas em suas respectivas publicações.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6, estão exibidos os resultados espectrofotométricos usando as duas

Tabela 4.2 - Regiões utilizadas para obter distâncias via paralaxe espectrofotométrica. A coluna 1 mostra o nome de cada região H II, a coluna 2 está o nome de cada estrela ionizante, na coluna 3 estão listados seus respectivos tipos espectrais, as colunas 4 e 5 exibem as magnitudes absolutas  $M_V$  e cores intrínsecas  $(V - K)_0$  (Vacca et al., 1996; Koornneef, 1983, respectivamente) baseadas nos tipos espectrais, na coluna 6 está a magnitude aparente na banda  $K$  e na coluna 7 a cor  $(J - K)$  de cada objeto.

<i>Região</i>	<i>Objeto</i>	<i>Tipo Espec.</i>	$M_V$	$(V - K)_0$	$K$	$J - K$
W3	#159	O5.5V-O8V	-5, 22/-4, 66	-0, 93/-0, 93	7,6	0,3
W3	#559	O6.5V-O9V	-4, 99/-4, 43	-0, 93/-0, 89	8,5	1,1
W3	#3	O6V-B0V	-5, 11/-4, 43	-0, 93/-0, 85	8,8	1,6
W31	#2	O4.5V-O6.5V	-5, 44/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,0	3,4
W31	#3	O4.5V-O6.5V	-5, 44/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,3	3,2
W31	#4	O4.5V-O6.5V	-5, 44/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,3	2,7
W31	#5	O4.5V-O6.5V	-5, 44/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,4	3,6
W42	#1	O5V-O6V	-5, 33/-5, 11	-0, 93/-0, 93	8,8	1,6
W43*	#1	WN7	-6, 54/-6, 54	0, 12/0, 12	9,0	6,0
W43	#2	early OIa	-6, 44/-6, 44	-0, 93/-0, 93	11,0	5,5
W43	#3	early OIa	-6, 44/-6, 44	-0, 93/-0, 93	11,5	5,7
M17	B98	O8V-B0V	-5, 22/-4, 21	-0, 93/-0, 85	7,7	0,3
M17	B111	O4V-O6V	-5, 55/-5, 11	-0, 93/-0, 93	7,5	0,5
M17	B164	O6V-O9V	-5, 11/-4, 43	-0, 93/-0, 89	8,8	1,2
W51A	#44	O4V-O6V	-5, 55/-5, 11	-0, 93/-0, 93	11,2	6,0
W51A	#50	O5.5V-O7.5V	-5, 22/-4, 77	-0, 93/-0, 93	12,2	5,2
W51A	#57	O3V-O5V	-5, 78/-5, 33	-0, 93/-0, 93	10,8	5,8
W51A	#61	O6.5V-O8.5V	-4, 99/-4, 55	-0, 93/-0, 93	12,5	4,0
G189.0+0.8	06058nr534	B1V-B2.5V	-3, 14/-2, 34	-0, 76/-0, 67	10,4	1,3
G189.0+0.8	06061nr674A	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	11,8	2,0
BFS57	06567nr557	B3V-B7V	-1, 68/-0, 67	-0, 57/-0, 30	11,6	2,6
BFS57	06567nr589	B1V-B7V	-3, 14/-0, 67	-0, 76/-0, 30	10,4	3,2

Tabela 4.3 - Continuação da Tabela 4.2.

<i>Região</i>	<i>Objeto</i>	<i>Tipo Espec.</i>	$M_V$	$(V - K)_0$	$K$	$J - K$
G267.7-1.1	08563nr314	B1V-B2.5V	-3, 14/-2, 34	-0, 76/-0, 67	8,9	1,4
G267.7-1.1	08563nr317	B1V-B2.5V	-3, 14/-2, 34	-0, 76/-0, 67	10,0	2,3
G265.1+1.5	08576nr179	B1V-B2.5V	-3, 14/-2, 34	-0, 76/-0, 67	9,6	1,9
G265.1+1.5	08576nr413	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	7,5	1,8
G265.1+1.5	08576nr461	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	12,7	1,7
G265.1+1.5	08576nr462	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	7,0	1,8
RCW38	09002nr697	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	10,7	5,4
G282.0-1.2	10049nr324	O3V-O6.5V	-5, 78/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,5	2,8
G282.0-1.2	10049nr411	O3V-O4V	-5, 78/-5, 55	-0, 93/-0, 93	11,7	2,9
NGC3576	11097nr1122	B3V-B7V	-1, 68/-0, 67	-0, 57/-0, 30	10,5	2,4
G298.2-0.3	12073nr1974	O5V-O6.5V	-5, 33/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,7	2,3
G298.2-0.3	12073nr2851	O7V-O8V	-4, 88/-4, 66	-0, 93/-0, 93	10,7	2,5
RCW95	15408nr1410	O5V-O6.5V	-5, 33/-4, 99	-0, 93/-0, 93	8,6	2,2
RCW95	15408nr1454	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	9,3	2,1
G328.3+0.4	15502nr2960	B3V-B7V	-1, 68/-0, 67	-0, 57/-0, 30	13,0	2,6
G328.3+0.4	15502nr3167	O7V-O8V	-4, 88/-4, 66	-0, 93/-0, 93	11,8	1,6
G333.1-0.4	#1	O5V-O7V	-5, 33/-4, 88	-0, 93/-0, 93	9,2	1,6
G333.1-0.4	#2	O7V-O9V	-4, 88/-4, 43	-0, 93/-0, 89	10,2	1,5

Tabela 4.4 - Continuação das Tabelas 4.2 e 4.3.

<i>Região</i>	<i>Objeto</i>	<i>Tipo Espec.</i>	$M_V$	$(V - K)_0$	$K$	$J - K$
RCW106	16164nr1542	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	11,7	2,0
RCW106	16177nr271	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	11,8	3,4
RCW106	16177nr405	O5V-O6.5V	-5, 33/-4, 99	-0, 93/-0, 93	10,8	$\geq 6,7$
RCW106	16177nr1020	O5V-O6.5V	-5, 33/-4, 99	-0, 93/-0, 93	11,9	4,7
RCW116B	16571nr820	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	9,3	2,6
RCW116B	16571nr1610	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	11,0	2,5
RCW121	17149nr895	O5V-O6.5V	-5, 33/-5, 33	-0, 93/-0, 93	8,3	0,6
NGC6334	17175nr57	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	11,5	6,3
G351.6-1.3	17258nr378	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	10,2	3,4
G351.6-1.3	17258nr1558	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	10,7	1,9
M8	18006nr770	O8V-B1V	-4, 66/-3, 14	-0, 93/-0, 76	7,3	0,9
G10.3-0.1	18060nr1733	O5V-O6V	-5, 33/-5, 11	-0, 93/-0, 93	9,0	2,9
G10.3-0.1	18060nr2481	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	11,1	3,5
G31.4+0.3	18449nr319	O5V-O6V	-5, 33/-5, 11	-0, 93/-0, 93	10,8	2,4
G34.3+0.1	18507nr262	O5V-O8V	-5, 33/-4, 66	-0, 93/-0, 93	9,4	4,3
G34.3+0.1	18507nr373	B1V-B2.5V	-3, 14/-2, 34	-0, 76/-0, 67	12,3	5,4
G34.3+0.1	18507nr389	O8V-B2.5V	-4, 66/-2, 34	-0, 93/-0, 67	11,3	3,8
W49A	19078nr647	O3V-O4V	-5, 78/-5, 55	-0, 93/-0, 93	13,2	4,4

Nota: (\*) - W42 #1 é uma Wolf-Rayet (WN7), cuja magnitude e cores absolutas ( $M_V$  e  $(V - K)_0$ ) foram obtidas por Vacca e Torres-Dogden (1990) e Morris et al. (1993), respectivamente.

leis de extinção interestelar extremas utilizadas neste trabalho (Mathis, 1990; Stead e Hoare, 2009). Como pode ser verificado nas Tabelas 4.5 e 4.6, onde estão apresentadas as distâncias cinemáticas e espectrofotométricas, a lei de extinção adotada é relativamente importante nos resultados. Para um mesmo objeto, os valores de  $A_K$  variam consideravelmente de uma lei para outra. O resultado final é a média das distâncias fornecidas pelas duas leis de extinção. Se a região em estudo tiver mais de um alvo medido, é feita a média entre as distâncias espectrofotométricas de cada alvo e o erro é diminuído pela raiz quadrada do número de alvos ( $\sqrt{N}$ ). Então, quanto mais alvos tivermos para uma dada região, menor será o erro.

A concordância (ou não) entre o método da paralaxe espectrofotométrica e o método cinemático, foi testado ao se levar em conta situações extremas de leis de extinção do meio interestelar. Nota-se nas Tabelas 4.5 e 4.6 que as distâncias espectrofotométricas são, na maior parte dos casos, menores que as distâncias cinemáticas, independentemente da lei de extinção adotada. Os resultados de paralaxe trigonométrica (que independem de leis de extinção ou presunção acerca do tipo espectral) também estão discrepantes das distâncias cinemáticas. Estas discrepâncias podem ser vistas nas Figuras 4.3 e 4.4. Os gráficos na Figura 4.3 mostram as distribuições de regiões de formação estelar com distâncias obtidas por paralaxe espectrofotométrica, ou trigonométrica, e comparadas às suas respectivas distâncias cinemáticas. No painel superior esquerdo (Fig. 4.3) está representado a distribuição no plano galáctico de todas as regiões H II gigantes de Conti e Crowther (2004) e as distâncias utilizadas são cinemáticas (Russeil, 2003). No painel superior direito está exibida a distribuição das regiões de formação estelar com distâncias determinadas por meio de paralaxe trigonométrica disponíveis na literatura.

O painel inferior da Figura 4.3 mostra a distribuição das regiões H II com distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica. No painel inferior esquerdo estão os resultados utilizando a lei de Mathis (1990), enquanto que no painel inferior direito estão os resultados utilizando a lei de Stead e Hoare (2009). Nos dois casos, as respectivas distâncias cinemáticas estão representadas pelos círculos pretos e as distâncias espectrofotométricas pelos triângulos vermelhos. As discrepâncias entre os resultados cinemáticos e espectrofotométricos são bastante claros nas duas situações.

As setas nos três gráficos (painel superior direito e os dois no painel inferior, Fig. 4.3)

Tabela 4.5 - Distâncias espectrofotométricas. Nas colunas 1 e 2 estão as coordenadas galácticas. Na coluna 3 estão os nomes das regiões H II. A coluna 4 exibe o número de estrelas utilizadas. Na coluna 5 estão as distâncias cinemáticas. A coluna 6 exibe o fluxo no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ), e nas colunas 7 e 8 estão as distâncias espectrofotométricas extremas.

$l$	$b$	Região	$N^\circ$	$d_{cin}$	$N_{LyC}$	$d_{PE_{Mathis}}$	$d_{PE_{Stead}}$
				kpc	$\log(s^{-1})$	kpc	kpc
6,0	-1,2	M8	1	$2,80 \pm 1,0$	50,19	$0,90 \pm 0,35$	$0,99 \pm 0,38$
10,1	-0,3	W31-South <sup>4</sup>	4	$4,50 \pm 0,6$	50,66	$3,01 \pm 1,12$	$4,10 \pm 1,52$
10,3	-0,1	W31-Norte <sup>4</sup>	2	$15,10 \pm 1,3$	50,90	$2,02 \pm 0,77$	$2,76 \pm 1,08$
15,0	-0,7	M17	3	$2,40 \pm 0,5$	51,22	$2,01 \pm 0,75$	$2,19 \pm 0,82$
25,4	-0,2	W42	1	$11,50 \pm 0,3$	50,93	$2,46 \pm 0,90$	$2,89 \pm 1,07$
30,8	-0,0	W43	3	$6,20 \pm 0,6$	50,83	$3,64 \pm 1,37$	$6,16 \pm 2,32$
31,4	+0,3	G31.4+0.3	1	$6,20 \pm 0,6$	$48,90^3$	$4,89 \pm 1,80$	$6,20 \pm 2,28$
34,3	+0,1	G34.3+0.1	3	$10,50 \pm 0,3$	$50,35^3$	$1,68 \pm 0,66$	$2,55 \pm 1,00$
43,2	+0,0	W49A	1	$11,80 \pm 0,4$	51,23	$10,13 \pm 3,73$	$15,40 \pm 5,67$
49,5	-0,4	W51A	4	$5,50 \pm 8,0$	50,94	$3,38 \pm 1,35$	$5,41 \pm 2,11$
133,7	+1,2	W3	3	$4,20 \pm 0,7$	50,25	$1,97 \pm 0,73$	$2,19 \pm 0,82$
189,0	+0,8	G189.0+0.8	2	$0,80 \pm 1,9$	–	$3,62 \pm 1,51$	$4,33 \pm 1,82$
217,4	-0,1	BFS57	2	$2,40 \pm 0,6$	–	$1,16 \pm 0,45$	$1,52 \pm 0,59$
265,1	+1,5	G265.1+1.5 <sup>1</sup>	4	$1,40 \pm 0,8$	$48,69^3$	$0,83 \pm 0,33$	$1,00 \pm 0,40$
267,7	-1,1	G267.7-1.1	2	$1,40 \pm 1,0$	$49,85^3$	$1,13 \pm 0,42$	$1,36 \pm 0,52$
268,0	-1,0	RCW38	1	$1,40 \pm 1,0$	$48,42^3$	$1,05 \pm 0,42$	$1,75 \pm 0,70$
282,0	-1,2	G282.0-1.2	2	$5,90 \pm 0,5$	50,32	$6,00 \pm 2,32$	$7,94 \pm 3,07$
291,3	-0,7	NGC3576	1	$3,10 \pm 9,8$	50,28	$0,87 \pm 0,32$	$1,09 \pm 0,41$

Tabela 4.6 - Continuação da Tabela 4.5.

$l$	$b$	Região	$N^\circ$	$d_{cin}$	$N_{LyC}$	$d_{PEMathis}$	$d_{PEStead}$
				kpc	$\log(s^{-1})$	kpc	kpc
298, 2	-0, 3	G298.2-0.3	2	$10,40 \pm 0,5$	50, 87	$4,18 \pm 1,56$	$5,29 \pm 1,97$
326, 6	+0, 6	RCW95	2	$2,80 \pm 0,3$	49, 52 <sup>3</sup>	$1,63 \pm 0,63$	$2,02 \pm 0,78$
328, 3	+0, 4	G328.3+0.4	2	$6,10 \pm 0,6$	50, 18 <sup>2</sup>	$5,27 \pm 2,18$	$6,34 \pm 2,59$
332, 6	-0, 6	RCW106	4	$3,50 \pm 0,3$	50, 04 <sup>2</sup>	$3,25 \pm 1,34$	$4,67 \pm 1,88$
333, 1	-0, 4	G333.1-0.4	2	$3,50 \pm 0,3$	50, 08	$3,29 \pm 1,23$	$3,85 \pm 1,43$
345, 2	+1, 0	RCW116B	2	$1,70 \pm 0,6$	50, 53	$2,09 \pm 0,88$	$2,68 \pm 1,13$
348, 2	-1, 0	RCW121	1	$2,70 \pm 0,5$	49, 12 <sup>3</sup>	$2,74 \pm 1,01$	$2,95 \pm 1,08$
351, 2	+0, 7	NGC6334	1	$1,20 \pm 1,1$	49, 63 <sup>3</sup>	$1,30 \pm 0,50$	$2,34 \pm 0,90$
351, 6	-1, 3	G351.6-1.3	2	$14,30 \pm 0,8$	50, 04 <sup>2</sup>	$2,28 \pm 0,94$	$2,90 \pm 1,17$

Notas: (1) O objeto 08576nr461 da região H II G265.1+1.5 não foi considerado, uma vez que seus valores de distância estão em completa discordância com os outros três objetos da mesma região (a saber, 08576nrs: 179, 413 e 462); (2) -  $N_{LyC}$  extraído do trabalho de Smith et al. (1978); (3) -  $N_{LyC}$  determinado neste trabalho e seguindo a metodologia de Smith et al. (1978). Para cada situação,  $T_e$  foi extraído de Downes et al. (1980) e Caswell e Haynes (1987), e os fluxos em 5 GHz ( $S_\nu$ ) e diâmetros angulares ( $\theta$ ) a partir do trabalho de Kuchar e Clark (1997). Exceto para W31 (Norte e Sul) cujas distâncias foram obtidas de Corbel e Eikenberry (2004), as demais distâncias cinemáticas foram obtidas por Russeil (2003). Quando não houver identificação  $N_{LyC}$  foi extraído de Conti e Crowther (2004).

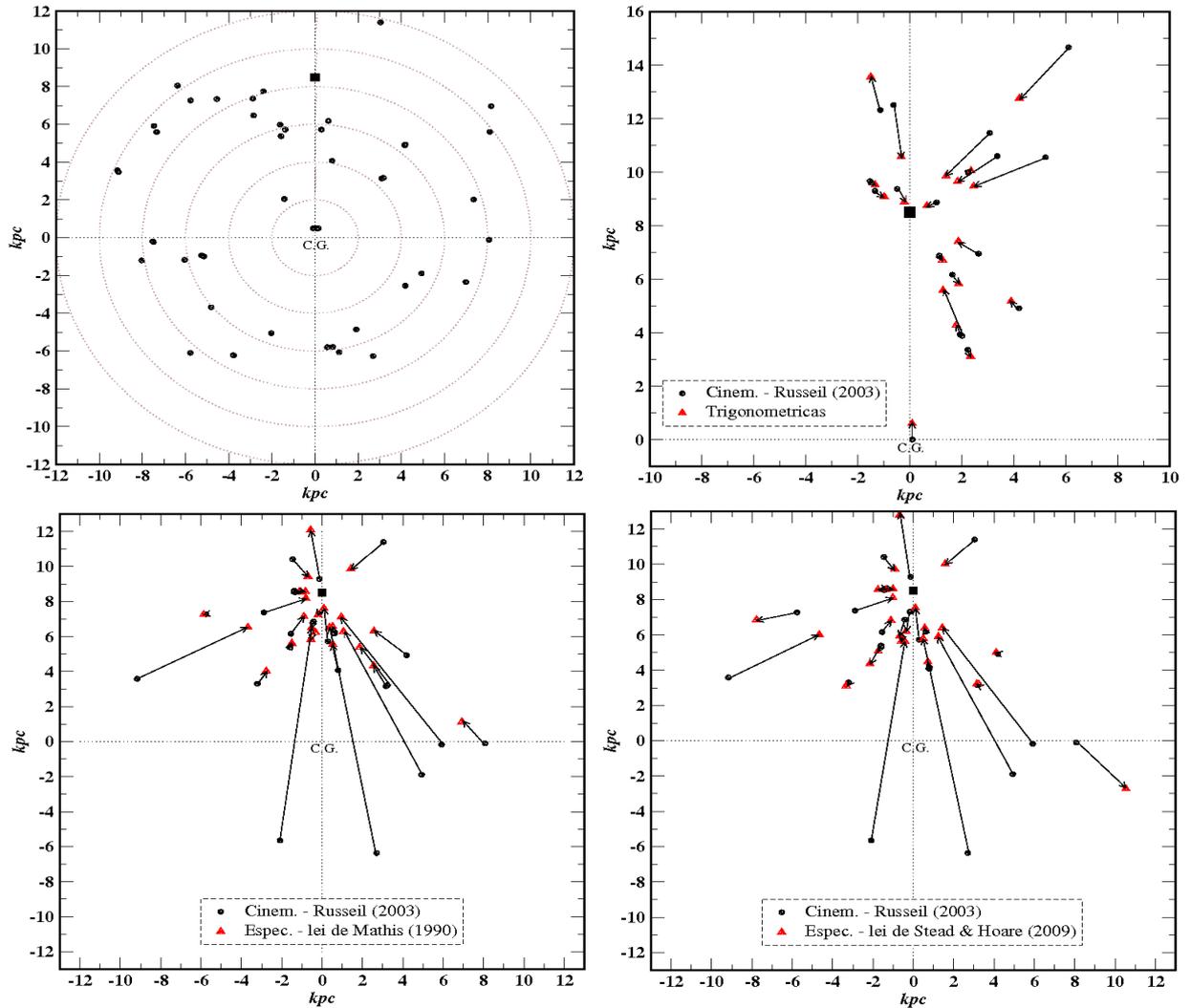


Figura 4.3: Projeção no plano Galáctico das regiões H II estudadas neste capítulo. Na parte superior esquerda (4.3-a) está a distribuição das regiões H II gigantes de Conti e Crowther (2004). A distribuição das distâncias determinadas via paralaxe trigonométrica está no painel superior direito (4.3-b). No painel inferior estão as distribuições de distâncias determinadas via paralaxe espectrofotométrica, à esquerda usando lei de extinção de Mathis (1990) e no painel inferior direito utilizando a lei de Stead e Hoare (2009).

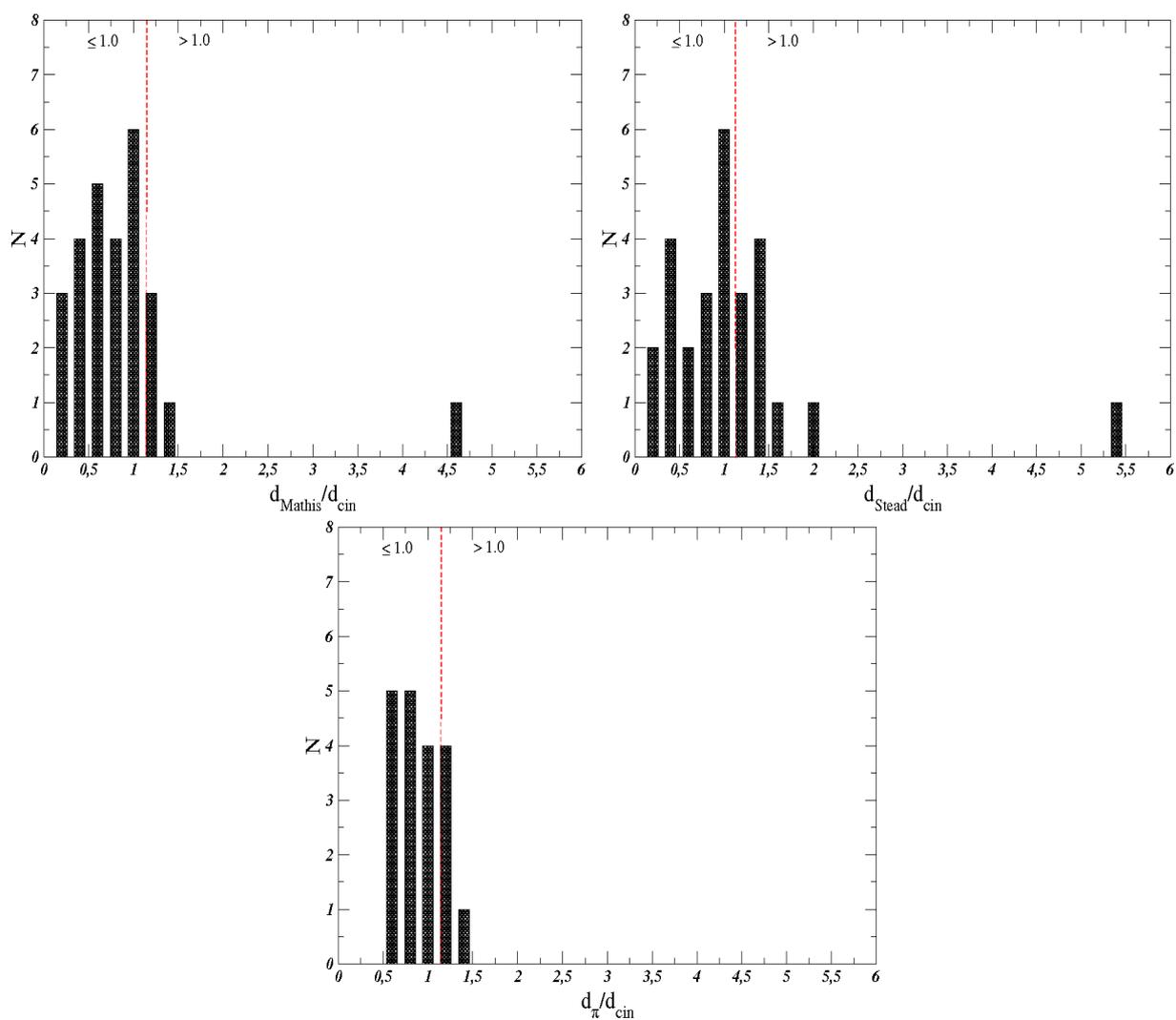


Figura 4.4: Nos dois histogramas acima, estão comparadas as distâncias espectrofotométricas com as distâncias cinemáticas. O histograma da esquerda é para os resultados utilizando a lei de Mathis (1990), e o da direita para a lei de Stead e Hoare (2009). A razão  $d_{\text{espec.}}/d_{\text{cin.}}$ , para as duas leis de extinção, foi separada em intervalos (bins) de 0,20. O histograma abaixo mostra a razão  $d_{\pi}/d_{\text{cin.}}$ . Note que o número de objetos, nas três situações, é bem maior para razões menores que 1,0.

indicam se as distâncias cinemáticas são maiores, ou menores, que as respectivas distâncias por paralaxe (espectrofotométrica e trigonométrica). O tamanho das setas é proporcional à discrepância entre as medidas. E, como pode ser visto, as setas exibem claramente estas discrepâncias.

Na Figura 4.4 estão representados histogramas que mostram de forma quantitativa as razões entre as distâncias cinemáticas e suas respectivas distâncias obtidas por outros métodos. Estas razões de distâncias foram separadas em intervalos (bins) de 0,50. Os dois histogramas do painel superior (esquerda e direita) mostram a distribuição de objetos por intervalo de razão entre as distâncias espectrofotométricas e as respectivas distâncias cinemáticas. O histograma no painel superior esquerdo representa os resultados ao se utilizar a lei de extinção interestelar de Mathis (1990), enquanto que o painel superior direito mostra os resultados ao se utilizar a lei de extinção de Stead e Hoare (2009). O painel inferior representa a razão entre as distâncias obtidas por paralaxe trigonométrica e suas respectivas distâncias cinemáticas. As linhas verticais vermelhas (tracejadas) separam as regiões no gráfico onde se encontram os objetos cujas distâncias espectrofotométricas (ou trigonométricas) são menores que as cinemáticas daqueles onde suas distâncias espectrofotométricas (ou trigonométricas) são maiores que as cinemáticas. O número de objetos onde as distâncias espectrofotométricas e trigonométricas são menores que as respectivas distâncias cinemáticas é destacadamente maior que o da situação oposta (distância cinemática menor).

## 4.6 Taxa de Formação Estelar e Tipo Morfológico da Via Láctea

A diminuição no valor das distâncias das regiões H II implica em uma menor luminosidade de fótons ionizantes e, portanto, uma menor taxa de formação estelar do que a avaliada via distâncias cinemáticas. É possível avaliar qual seria a alteração nessa taxa, se diminuirmos todas as distâncias por um fator médio igual ao que tem sido encontrado.

O número (aproximado) de estrelas que se formam por ano em uma dada galáxia pode ser inferido através do fluxo integrado de fótons no contínuo de Lyman. Esta relação entre fluxo de Lyman e taxa de formação de estrelas pode ser dada por (Smith et al., 1978):

$$\frac{dM_*}{dt} = 1,175 \times \frac{\langle M \rangle}{\langle N_{LyC} \rangle \times t(H II)} \times \sum N_{LyC} (M_\odot \text{ ano}^{-1}), \quad (4.9)$$

onde  $\langle M \rangle$ ,  $\langle N_{LyC} \rangle$  e  $t(H II)$  são a massa média, o fluxo no contínuo de Lyman médio e o tempo de vida médio de uma região H II gigante típica. Integrando a *IMF* de Salpeter (1955) de 0,01 até  $100 M_\odot$ , considerando as estrelas ainda na ZAMS com fluxos de Lyman de Panagia (1973) e assumindo uma taxa de formação estelar na vizinhança solar constante nos últimos  $10^6$  anos, Smith et al. (1978) chegaram a uma aproximação para a relação acima,

$$\frac{dM_*}{dt} = (1,1 \times 10^{-52}) \times \sum N_{LyC} (M_\odot \text{ ano}^{-1}). \quad (4.10)$$

Note que, como as distâncias às regiões de formação estelar estão diminuindo em boa parte dos casos, os novos fluxos serão dados pelo re-escalamento das distâncias.

$$N'_{LyC} = \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \times N_{LyC}. \quad (4.11)$$

Como  $d'$  (novos valores para as distâncias) são, em média, menores que  $d$ , os novos valores de  $N'_{LyC}$  são, em média, menores que os antigos ( $N_{LyC}$ ) por um fator que depende do quadrado da razão entre as distâncias. A taxa de formação estelar para a Via Láctea também diminui. Para ter um panorama completo, precisamos conhecer as verdadeiras distâncias para o maior número possível de objetos. Entretanto, pode-se ter uma estimativa na redução da taxa de formação estelar da Via Láctea com estes resultados. Utilizando a Equação 4.10, e somando os fluxos no contínuo de Lyman das regiões H II do catálogo de Conti e Crowther (2004), a taxa de formação estelar na Galáxia é de

$$\frac{dM_*}{dt} = 2,6 (M_\odot \text{ ano}^{-1}), \quad (4.12)$$

(Smith et al., 1978, determinaram  $5 M_\odot \text{ ano}^{-1}$ ). Os fluxos no contínuo de Lyman de Conti e Crowther (2004) foram determinados utilizando distâncias cinemáticas. Uma estimativa

do quanto esta taxa de formação estelar seria diminuída pode ser feita ao se tomar as medianas das distribuições das razões entre as distâncias por paralaxe (espectrofotométrica e trigonométrica) e as cinemáticas (Figura 4.4). A mediana da distribuição das razões de distâncias utilizando a lei de Mathis (1990) é de 0,67, para as distâncias determinadas utilizando a lei de Stead e Hoare (2009) a mediana da distribuição é de 0,97, já para as distâncias por paralaxe trigonométrica a distribuição tem uma mediana de 0,73, um valor bem parecido com o da lei de Mathis (1990).

Utilizando a Equação 4.11 e assumindo que a razão entre as distâncias ( $\frac{d'}{d}$ ) será a mediana das distribuições (Fig. 4.4) para cada caso, os novos valores para a taxa de formação de estrelas na Via Láctea podem ser determinados.

Para as distâncias espectrofotométricas utilizando a lei de Mathis (1990):

$$\frac{dM_*}{dt} = 1,2 \quad (M_\odot \text{ ano}^{-1}), \quad (4.13)$$

utilizando a lei de Stead e Hoare (2009):

$$\frac{dM_*}{dt} = 2,4 \quad (M_\odot \text{ ano}^{-1}), \quad (4.14)$$

para as distâncias por paralaxe trigonométricas:

$$\frac{dM_*}{dt} = 1,4 \quad (M_\odot \text{ ano}^{-1}). \quad (4.15)$$

O tipo morfológico da Via Láctea também pode ser inferido, indiretamente, através do fluxo no contínuo de Lyman. Na verdade, o tipo morfológico depende da luminosidade em  $H\alpha$ , e esta apresenta uma relação com o fluxo no contínuo de Lyman (Brocklehurst, 1971), dada por:

$$L(H\alpha) = (1,43 \times 10^{-12}) \times N_{LyC} \quad (\text{ergs s}^{-1}). \quad (4.16)$$

Comparando esta luminosidade com a luminosidade de outras galáxias e de tipo morfológico conhecido, Smith e Kennicutt Jr (1989) inferiram o tipo morfológico da Via Láctea. Smith e Kennicutt Jr (1989) usaram a média das três regiões H II mais brilhantes de cada galáxia de sua amostra para estimar a luminosidade em  $H\alpha$ . Da mesma forma, as três regiões H II gigantes mais brilhantes da Via Láctea (Smith et al., 1978; Conti e Crowther, 2004) foram utilizadas neste trabalho para estimar a luminosidade em  $H\alpha$  da Galáxia.

Na Tabela 4.7, estão os fluxos no contínuo de Lyman para estas três regiões gigantes (M17, W49A e NGC3603). Para cada região, os fluxos estão associados a três diferentes distâncias: distância cinemática (Russeil, 2003) e distâncias espectrofotométricas para duas leis de extinção (Mathis, 1990; Stead e Hoare, 2009). Para a região H II NGC3603 não há distâncias espectrofotométricas no infravermelho disponíveis na literatura. Assim, foi utilizada uma distância de 6,00 kpc obtida via ajuste de isócronas no infravermelho próximo por Stolte et al. (2004). Esta distância foi utilizada para as duas situações de distâncias alternativas à cinemática. Note que, também neste caso, a distância cinemática é maior que a distância obtida por outra metodologia (ajuste de isócronas no infravermelho).

Seguindo a metodologia de Smith e Kennicutt Jr (1989), o valor de  $\langle N_{LyC} \rangle$  pode ser determinado utilizando as médias dos fluxos no contínuo de Lyman destas três regiões para as três distâncias (cinemática e as duas espectrofotométricas).

Utilizando distâncias cinemáticas o valor encontrado é:

$$\langle N_{LyC} \rangle : 21,73 \times 10^{50} \text{ (fótons } s^{-1}\text{)}, \quad (4.17)$$

usando distâncias espectrofotométricas com a lei de Mathis (1990):

$$\langle N_{LyC} \rangle : 14,19 \times 10^{50} \text{ (fótons } s^{-1}\text{)}, \quad (4.18)$$

e com as distâncias espectrofotométricas com a lei de Stead e Hoare (2009):

$$\langle N_{LyC} \rangle : 20,29 \times 10^{50} \text{ (fótons } s^{-1}\text{)}. \quad (4.19)$$

Com estes resultados, as respectivas luminosidades médias podem ser determinadas.

Utilizando distâncias cinemáticas:

$$\langle L\alpha \rangle : 3,11 \times 10^{39} \text{ (ergs } s^{-1}\text{)}, \quad (4.20)$$

Tabela 4.7 - Três regiões H II mais brilhantes da Via Láctea.

<i>Região</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>d<sub>cin</sub></i>	<i>N<sub>LyC</sub></i>	<i>d<sub>PE<sub>Mathis</sub></sub></i>	<i>N<sub>LyC</sub></i>	<i>d<sub>PE<sub>Stead</sub></sub></i>	<i>N<sub>LyC</sub></i>
			kpc	( $10^{50} s^{-1}$ )	kpc	( $10^{50} s^{-1}$ )	kpc	( $10^{50} s^{-1}$ )
M17	15,0	-0,7	2,40	16,60	2,01	11,75	2,19	13,80
W49A	43,2	+0,0	11,80	16,98	10,13	12,59	15,40	28,84
NGC3603	291,6	-0,5	7,90	31,62	6,00 <sup>1</sup>	18,24	6,00 <sup>1</sup>	18,24

Nota: NGC3603 tem uma distância determinada por paralaxe espectrofotométrica no visível (Moffat, 1983,  $d = 7,0$  kpc) e em um trabalho mais recente por ajuste de isócronas no infravermelho (Referência 1, Stolte et al., 2004,  $d = 6,0$  kpc).

utilizando distâncias espectrofotométricas com a lei de Mathis (1990):

$$\langle L\alpha \rangle : 2,03 \times 10^{39} \text{ (ergs } s^{-1}\text{)}, \quad (4.21)$$

e com as distâncias espectrofotométricas com a lei de Stead e Hoare (2009):

$$\langle L\alpha \rangle : 2,90 \times 10^{39} \text{ (ergs } s^{-1}\text{)}. \quad (4.22)$$

Na Figura 4.5 (dados extraídos de Kennicutt Jr, 1988), pode-se ver que a classificação do tipo morfológico da Via Láctea não muda muito e continua compatível com morfologia *Sbc-Sc*. Isto porque apesar de duas das regiões (M17 e NGC3603) terem apresentado distâncias espectrofotométricas menores que as cinemáticas, a região H II gigante W49A (que é a mais brilhante das três) apresentou distâncias (paralaxe espectrofotométrica no visível e ajuste de isócronas) compatíveis com a cinemática. A magnitude bolométrica para a Via Láctea foi a adotada por de Vaucouleurs e Pence (1978),  $M_B = -20,1$  e está demarcada pela linha vertical verde.

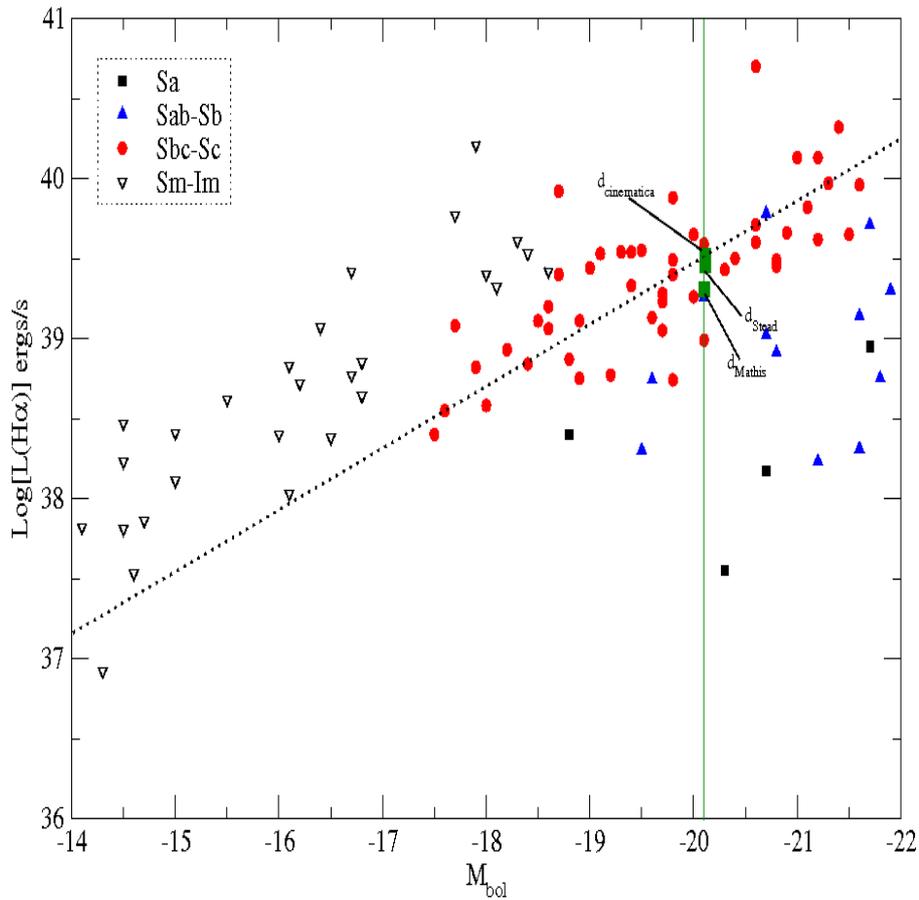


Figura 4.5: Utilizando  $M_B = -20,1$  (de Vaucouleurs e Pence, 1978, linha verde vertical), e tomando a média dos fluxos no contínuo de Lyman das três regiões H II mais brilhantes da Galáxia, percebemos que a classificação morfológica da Via Láctea continua sendo *Sbc-Sc*. A linha pontilhada inclinada representa o ajuste linear para galáxias *Sc* (Kennicutt Jr, 1988).

## 4.7 Discussão

Utilizando duas leis extremas de extinção no infravermelho próximo, verificou-se que nos dois casos as distâncias cinemáticas de regiões H II são sistematicamente maiores que as obtidas por outros métodos (paralaxes trigonométrica e espectrofotométrica). Além disso, os resultados obtidos por estes dois métodos não cinemáticos têm apresentado boa concordância entre si. Estes resultados indicam que algumas regiões que são consideradas próximas pelo método cinemático, provavelmente estão distantes e, portanto, são mais luminosas. De fato, para algumas regiões H II catalogadas em rádio, o aglomerado estelar não foi detectado, o que indica que estão muito distantes. Somente um levantamento completo nas bandas *J*, *H* e *K* de todas as regiões H II em rádio, inclusive as fracas, pode

revelar a existência de regiões H II pertencentes ao lado da Galáxia que fica além de seu centro.

O efeito de menores distâncias das regiões H II, e portanto o efeito de diminuição da luminosidade destes objetos, influe na taxa de formação estelar e no tipo morfológico da Galáxia. Ambos dependem da luminosidade destas regiões. Como o número de estrelas que se formam por ano na Galáxia dependerá da soma dos fluxos no contínuo de Lyman ( $N_{LyC}$ ), este efeito de diminuição nas distâncias das regiões de formação estelar, se persistir para as demais regiões, levará a uma diminuição na taxa de formação estelar da Galáxia. Mas, seria necessário determinar as distâncias não cinemáticas (espectrofotométricas ou trigonométricas) para o maior número possível de regiões H II. Com os resultados apresentados neste capítulo já foi possível estimar o quanto a taxa de formação estelar seria diminuída. Para as distâncias cinemáticas, Smith et al. (1978) estimaram esta taxa em  $5 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , e com os valores atualizados de Conti e Crowther (2004) ela foi estimada em  $2,6 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Já para as distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica a taxa vale  $1,2\text{--}2,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  ao se utilizar a lei de extinção interestelar de Mathis (1990) ou Stead e Hoare (2009). Para as distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica a taxa de formação estelar é de  $1,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ .

O tipo morfológico da Galáxia pode ser inferido pela média dos fluxos das três regiões H II mais brilhantes. Utilizando as distâncias espectrofotométricas e as duas leis de extinção extremas não houve uma alteração significativa na classificação do tipo morfológico da Galáxia, como pode ser verificado na Figura 4.5.



## Conclusões

Nesta tese foi apresentado um estudo no infravermelho próximo e médio (Spitzer) envolvendo 35 regiões H II Galácticas. Dentre estas 35 regiões H II de nossa amostra, 24 delas foram indicadas como sendo regiões H II gigantes, baseado em suas distâncias cinemáticas e em suas luminosidades no contínuo em rádio.

Inspecionando as imagens no infravermelho próximo e médio, além dos diagramas cor e cor-magnitude, foi possível indicar um estágio evolutivo para os objetos de nossa amostra. 09 (nove) regiões foram classificadas como estando no estágio evolutivo *A*, 13 (treze) no estágio *B*, 09 (nove) no estágio *C* e 01 (uma) no estágio *D*. Algumas regiões foram classificadas em estágios intermediários: 04 (quatro) entre os estágios *A* e *B*, 04 (quatro) entre os estágios evolutivos *B* e *C* e 01 (uma) entre os estágios *C* e *D*.

Baseado na comparação entre a posição do topo da sequência principal em diagramas cor-magnitude e os dados fotométricos, quando possível, foi realizada uma avaliação se a distância cinemática adotada estava correta. De fato, nesta amostra de 35 regiões H II Galácticas, 14 (catorze) apresentam distâncias menores que as respectivas distâncias cinemáticas. Estas regiões estão demarcadas como “P” (Próximas) na Tabela 3.1. Foi apontada a existência de 09 (nove) regiões H II que apresentam distâncias cinemáticas que são compatíveis com a localização da sequência principal nos diagramas C-M. Estas regiões estão demarcadas na Tabela 3.1 como “C” (Concordam). E, não foi possível checar esta concordância entre as distâncias cinemáticas e a localização do topo da sequência principal em diagramas cor-magnitude para 10 (dez) regiões H II da amostra. Isto pode acontecer devido a um pequeno número de objetos detectados ou à presença de objetos estelares mais evoluídos, e portanto fora da sequência principal. Estas regiões estão demarcadas na

Tabela 3.1 como “D” (Desconhecido). Finalmente, 02 (duas) regiões H II podem estar mais distantes do que o suposto por metodologias cinemáticas. Estas duas estão demarcadas na Tabela 3.1 como “L” (Longínquas). Mais interessante ainda, elas estão próximas à linha de visada ao Centro Galáctico. As imagens e diagramas C-M e C-C fornecem excelentes candidatos a fotosferas “nuas” para observações espectroscópicas, de forma a expandir a amostra de regiões H II com distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica.

Também foi identificado um conjunto de candidatos a MYSOs. Para isso, foram utilizadas as imagens e diagramas cor-cor e cor-magnitude. Como esperado, a presença destes candidatos a MYSOs é mais proeminente em regiões menos evoluídas, onde o gás e a poeira ainda estão presentes.

Como estas regiões de formação estelar, em particular as gigantes ( $N_{LyC} > 10^{50}$  fótons por segundo), são ótimos traçadores da estrutura espiral da Via Láctea, foi realizado um levantamento de distâncias não cinemáticas para estes objetos. Utilizando duas leis extremas de extinção no infravermelho próximo, verificou-se que nos dois casos as distâncias cinemáticas são sistematicamente maiores que as obtidas por outros métodos (paralaxes trigonométrica e espectrofotométrica). Além disso, os resultados obtidos por metodologias que não fazem uso de modelos cinemáticos têm apresentado boa concordância entre si. Estes resultados indicam, também, que algumas regiões que são consideradas próximas pelo método cinemático, provavelmente estão distantes e, portanto, são mais luminosas. De fato, para algumas regiões H II catalogadas em rádio, o aglomerado estelar não foi detectado, o que indica que estão muito distantes. Somente um levantamento profundo nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$  de todas as regiões H II em rádio, inclusive as fracas, pode revelar a existência de regiões H II pertencentes ao lado da Galáxia que fica além do centro Galáctico.

O efeito sistemático de menores distâncias das regiões H II, e portanto o efeito de diminuição da luminosidade destes objetos, influem na taxa de formação estelar e no tipo morfológico da Galáxia. Como ainda não há um catálogo completo com distâncias não cinemáticas para todas as regiões H II Galácticas, foi estimado o quanto estas diminuições (aqui determinadas) nas distâncias poderiam interferir nestes parâmetros considerando que o efeito é sistemático, e portanto, pode ser aplicado para os demais objetos. Para as distâncias cinemáticas, Smith et al. (1978) estimaram esta taxa em  $5 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , e com os valores atualizados de Conti e Crowther (2004) ela foi estimada em  $2,6 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Já para

as distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica a taxa vale  $1,2\text{--}2,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  ao se utilizar a lei de extinção interestelar de Mathis (1990) ou Stead e Hoare (2009). Para as distâncias determinadas por paralaxe trigonométrica a taxa de formação estelar é de  $1,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ .

Para o tipo morfológico da Galáxia não houve uma alteração significativa. Isto ocorreu mesmo com estes novos e menores fluxos, uma vez que só se utilizam as três regiões mais luminosas da Galáxia e a região mais luminosa (W49A) não apresentou distâncias não cinemáticas muito diferentes da obtida utilizando métodos cinemáticos.

Para se ter um panorâma completo da estrutura em espiral da Via Láctea é necessário um número maior de regiões H II com distâncias determinadas por paralaxe espectrofotométrica. Com este catálogo fotométrico, vários objetos candidatos a tipo espectral O foram identificados. Um próximo passo é a espectroscopia na banda  $K$ , utilizando telescópios dos quais o Brasil dispõe de tempo (SOAR e Gemini). E, com estas novas distâncias, podemos refinar as estimativas da taxa de formação estelar, bem como do tipo morfológico da Galáxia. Além de um melhor mapeamento da estrutura em espiral da Via Láctea.



## Referências Bibliográficas

- Barbosa C. L., Blum R. D., Conti P. S., Daminieli A., Figuerêdo E., High Spatial Resolution Spectroscopy of W51 IRS 2E and IRS 2W: Two Very Massive Young Stars in Early Formation Stages, *ApJ*, 2008, vol. 678, p. L55
- Bartkiewicz A., Brunthaler A., Szynczack M., van Langevelde H. J., Reid M. J., The nature of the methanol maser ring G23.657-00.127. I. The distance through trigonometric parallax measurements, *A&A*, 2008, vol. 490, p. 787
- Beck S. C., Kelly D. M., Lacy J. H., Infrared Ionic Line Emission in W33, *AJ*, 1998, vol. 115, p. 2504
- Becklin E. E., Frogel J. A., Neugebauer G., Persson S. E., Wynn-Williams C. G., The H II Region G333.6-0.2, a Very Powerful 1-20 Micron Source, *ApJ*, 1973, vol. 182, p. 125B
- Bica E., Dutra C. M., Soares J., Barbuy B., New infrared star clusters in the Northern and Equatorial Milky Way with 2MASS, *A&A*, 2003, vol. 404, p. 223
- Bik A., Kaper L., Hanson M. M., Smits M., VLT K-band spectroscopy of massive stars deeply embedded in IRAS sources with UCHII colours, *A&A*, 2005, vol. 440, p. 121
- Blitz L., . In *The Physics of Star Formation and Early Evolution* , vol. 342, NATO Sci. Ser., 1991, p. 3
- Blum R. D., Conti P. S., Daminieli A., The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. II. W42, *AJ*, 2000, vol. 119, p. 1860
- Blum R. D., Daminieli A., Conti P. S., The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. I. W43, *AJ*, 1999, vol. 117, p. 1392

- Blum R. D., Daminieli A., Conti P. S., The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. III. W31, *ApJ*, 2001, vol. 121, p. 3149
- Brand J., Blitz L., The Velocity Field of the Outer Galaxy, *A&A*, 1993, vol. 275, p. 67
- Brocklehurst M., Calculations of level populations for the low levels of hydrogenic ions in gaseous nebulae., *MNRAS*, 1971, vol. 153, p. 471
- Brunthaler A., Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Moscadelli L., Xu Y., Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. V. G23.01-0.41 and G23.44-0.18, *ApJ*, 2009, vol. 693, p. 424
- Carpenter J. M., Color Transformations for the 2MASS Second Incremental Data Release, *AJ*, 2001, vol. 121, p. 2851
- Caswell J. L., Haynes R. F., Southern H II regions - an extensive study of radio recombination line emission, *A&A*, 1987, vol. 171, p. 261
- Chini R., Elsässer H., Neckel T., Multicolour UBVRI photometry of stars in M 17, *A&A*, 1980, vol. 91, p. 186
- Chini R., Hoffmeister V., Kimeswenger S., Nielbock M., et al. The formation of a massive protostar through the disk accretion of gas, *Nature*, 2004, vol. 429, p. 155
- Chini R., Wargau W. F., Young stellar objects and abnormal extinction within M17, *A&A*, 1998, vol. 329, p. 161
- Choi Y. K., Hirota T., Honma M., Kobayashi et al. Distance to VY Canis Majoris with VERA, *PASJ*, 2008, vol. 60, p. 1007
- Churchwell E., Ultra-Compact HII Regions and Massive Star Formation, *ARA&A*, 2002, vol. 40, p. 27C
- Clemens D. P., Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey - The Galactic disk rotation curve, *ApJ*, 1985, vol. 295, p. 422
- Conti P. S., Crowther P. A., MSX mid-infrared imaging of massive star birth environments - II. Giant HII regions, *MNRAS*, 2004, vol. 355, p. 899

- Corbel S., Eikenberry S. S., The connection between W31, SGR 1806-20, and LBV 1806-20: Distance, extinction, and structure, *A&A*, 2004, vol. 419, p. 191
- de Vaucouleurs G., Pence W. D., An outsider's view of the Galaxy - Photometric parameters, scale lengths, and absolute magnitudes of the spheroidal and disk components of our Galaxy, *AJ*, 1978, vol. 83, p. 1163
- Diolaiti E., Bedinelli O., Bonaccini D., Close L., Currie D., Parmeggiani G., Analysis of isoplanatic high resolution stellar fields by the StarFinder code, *A&ASS*, 2000, vol. 147, p. 335
- Downes D., Wilson T. L., Bieging J., Wink J., H110-alpha and H2CO survey of galactic radio sources, *A&AS*, 1980, vol. 40, p. 379
- Dutra C. M., Bica E., Soares J., Barbuy B., New infrared star clusters in the southern Milky Way with 2MASS, *A&A*, 2003, vol. 400, p. 533
- Fazio G. G., et al. The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope, *ApJS*, 2004, vol. 154, p. 10
- Figer D. F., McLean I. S., Najarro F., A K-Band Spectral Atlas of Wolf-Rayet Stars, *ApJ*, 1997, vol. 486, p. 420
- Figuerêdo E., Blum R. D., Damineli A., Conti P. S., The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. V. G333.1-0.4, *AJ*, 2005, vol. 129, p. 1523
- Figuerêdo E., Blum R. D., Damineli A., Conti P. S., Barbosa C. L., The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. Vi. W51A, *AJ*, 2008, vol. 136, p. 221F
- Frogel J. A., Persson S. E., Matthews K., Aaronson M., Photometric studies of composite stellar systems. I - CO and JHK observations of E and S0 galaxies, *ApJ*, 1978, vol. 220, p. 75
- Fuller G. A., Myers P. C., Dense cores in dark clouds, in: *Physical Process in Interstellar Clouds*, 1987, vol. de Scholer, M., Dordrecht, Reidel, p. 137

- Furness J. P., Crowther P. A., Morris P. W., Barbosa C. L., et al. Mid-Infrared diagnostics of metal-rich HII regions from VLT and Spitzer Spectroscopy of Young Massive Stars in W31, submitted to MNRAS, 2009
- Garay G., Lizano S., Massive Stars: Their Environment and Formation, PASP, 1999, vol. 111, p. 1049
- Garmany C. D., Conti P. S., Chiosi C., The initial mass function for massive stars, ApJ, 1982, vol. 263, p. 777
- Georgelin Y. M., Georgelin Y. P., The spiral structure of our Galaxy determined from H II regions, A&A, 1976, vol. 49, p. 57
- Goldader J. D., Wynn-Williams C. G., Near-infrared observations of W51, ApJ, 1994, vol. 433, p. 164
- Goto M., Stecklum B., Linz H., Feldt M., Henning T., Pascucci I., Usuda T., High-Resolution Infrared Imaging of Herschel 36 SE: A Showcase for the Influence of Massive Stars in Cluster Environments, ApJ, 2006, vol. 649, p. 299
- Hachisuka K., Brunthaler A., Menten K. M., Reid M. J., et al. Water Maser Motions in W3(OH) and a Determination of Its Distance, ApJ, 2006, vol. 645, p. 337
- Hachisuka K., Brunthaler A., Menten K. M., Reid M. J., Hagiwara Y., Mochizuki N., The Distance to a Star-Forming Region in the Outer Arm of the Galaxy, ApJ, 2009, vol. 696, p. 1981
- Hanson M. M., Conti P. S., Rieke M. J., A Spectral Atlas of Hot, Luminous Stars at 2 Microns, ApJ, 1996, vol. 107, p. 281
- Hanson M. M., Howarth I. D., Conti P. S., The Young Massive Stellar Objects of M17, ApJ, 1997, vol. 489, p. 698
- Hartmann L., Accretion Processes in Star Formation, 1998
- Hirota T., Bushimata T., Choi Y. K., Honma M., Imai H., et al. Distance to Orion KL Measured with VERA, PASJ, 2007, vol. 59, p. 897

- Honma M., Bushimata T., Choi Y. K., Hirota T., Imai H., et al. Astrometry of Galactic Star-Forming Region Sharpless 269 with VERA: Parallax Measurements and Constraint on Outer Rotation Curve, *PASJ*, 2007, vol. 59, p. 889
- Humphreys R. M., Studies of luminous stars in nearby galaxies. I. Supergiants and O stars in the Milky Way., *ApJS*, 1978, vol. 38, p. 309
- Hyland A. R., McGregor P. J., Robinson G., Thomas J. A., et al. The infrared emission of G333.6-0.2 - an extremely nonspherical H II region, *ApJ*, 1980, vol. 241, p. 709
- Indebetouw R., Mathis J. S., Babler B. L., Meade M. R., et al. The Wavelength Dependence of Interstellar Extinction from 1.25 to 8.0 microns Using GLIMPSE Data, *ApJ*, 2005, vol. 619, p. 931
- Jackson J. M., Kraemer K. E., Photodissociation Regions and H II Regions in NGC 6334, *ApJ*, 1999, vol. 512, p. 260
- Kang M., Bieging J. H., Povich M. S., Lee Y., Embedded Young Stellar Object Candidates in the Active Star-Forming Complex W51: Mass Function and Spatial Distribution, *ApJ*, 2009, vol. 706, p. 83
- Kennicutt Jr R. C., Properties of H II region populations in galaxies. I - The first-ranked H II regions, 1988
- Keto E. R., Ho P. T. P., NH<sub>3</sub> observations of compressed postshock molecular gas in ionization-shock fronts around W33, *ApJ*, 1989, vol. 347, p. 349
- Kim K.-T., Koo B.-C., Interaction between Ionized and Molecular Gas in the Active Star-forming Region W31, *ApJ*, 2002, vol. 575, p. 327
- Koornneef J., Near-infrared photometry. II - Intrinsic colours and the absolute calibration from one to five micron, *A&A*, 1983, vol. 128, p. 84
- Kuchar T. A., Clark F. O., All-Sky 4.85 GHz Flux Measurements of H II Regions, *ApJ*, 1997, vol. 488, p. 224
- Kumar M. S. N., Kamath U. S., Davis C. J., Embedded star clusters in the W51 giant molecular cloud, *MNRAS*, 2004, vol. 353, p. 1025

- Kurtz S., Cesaroni R., Churchwell E., Hofner P., Wamsley C. M., . In *Protostars and Planets IV* , vol. 299, Tucson, Univ. Arizona Press, 2000
- Kurtz S., Franco J., *Ultracompact H II Regions*, RMxAC, 2002, vol. 12, p. 16
- Lépine J. R. D., Dias W. S., Mishurov Y., Measurement of the epicycle frequency in the Galactic disc and initial velocities of open clusters, *MNRAS*, 2008, vol. 386, p. 2081
- Lester D. F., Dinerstein H. L., Werner M. W., Harvey P. M., Evans N. J., Brown R. L., *Star formation in the inner Galaxy - A far-infrared and radio study of two H II regions*, *AJ*, 1985, vol. 296, p. 565
- Lin C. C., Shu F. H., *On the Spiral Structure of Disk Galaxies.*, *ApJ*, 1964, vol. 140, p. 646
- McClure-Griffiths N. M., Dickey J. M., Gaensler B. M., Green A. J., *Loops, Drips, and Walls in the Galactic Chimney GSH 277+00+36*, *ApJ*, 2003, vol. 594, p. 833
- McKee C. T., Tan J., *The Formation of Massive Stars from Turbulent Cores*, *ApJ*, 2003, vol. 585, p. 850
- Massi F., Brand J., Felli M., *Molecular cloud/HII region interfaces in the star forming region NGC 6357.*, *A&A*, 1997, vol. 320, p. 972
- Mathis J. S., *Interstellar dust and extinction*, *ARA&A*, 1990, vol. 28, p. 37
- Melena N. W., Massey P., Morrell N. I., Zangari M., *The Massive Star Content of NGC 3603*, *AJ*, 2008, vol. 135, p. 878
- Menten K. M., Reid M. J., Forbrich J., Brunthaler A., *The distance to the Orion Nebula*, *A&A*, 2007, vol. 474, p. 515
- Mercer E. P., Clemens D. P., Meade M. R., et al. *New Star Clusters Discovered in the GLIMPSE Survey*, *ApJ*, 2005, vol. 635, p. 560
- Mezger P. G., Henderson A. P., *Galactic H II Regions. I. Observations of Their Continuum Radiation at the Frequency 5 GHz*, *ApJ*, 1967, vol. 147, p. 471

- Mezger P. G., Smith L. F., Churchwell E., IR-excess Radiation and the Absorption Characteristics of Dust in Galactic H II Regions, *A&A*, 1974, vol. 32, p. 269
- Moellenbrock G. A., Claussen M. J., Goss W. M., A Precise Distance to IRAS 00420+5530 via Water Maser Parallax with the VLBA, *ApJ*, 2009, vol. 694, p. 192
- Moffat A. F. J., The bright stellar content of the giant galactic H II region NGC 3603, *A&A*, 1983, vol. 124, p. 273
- Moran J. M., Rodríguez L. F., Greene B., Backer D. C., The large scattering disk of NGC 6334B, *ApJ*, 1990, vol. 348, p. 147
- Morris P. W., Brownsberger K. R., Conti P. S., Massey P., Vacca W. D., Spectrophotometry of Wolf-Rayet stars. I - Continuum energy distributions, *ApJ*, 1993, vol. 412, p. 324
- Moscadelli L., Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Xu Y., Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. II. Cep A and NGC 7538, *ApJ*, 2009, vol. 693, p. 406
- Nishiyama S., Nagata T., Kusakabe N., Matsunaga N., Naoi T., et al. Interstellar Extinction Law in the  $J$ ,  $H$ , and  $K_s$  Bands toward the Galactic Center, *ApJ*, 2006, vol. 638, p. 839
- Panagia N., Some Physical parameters of early-type stars, *AJ*, 1973, vol. 78, p. 929
- Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Moscadelli L., Xu Y., Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. I. S 252 and G232.6+1.0, *ApJ*, 2009, vol. 693, p. 397
- Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Brunthaler A., Moscadelli L., et al. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions, *ApJ*, 2009
- Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Brunthaler A., Xu Y., A Trigonometric Parallax of Sgr B2, *ApJ*, 2009, vol. 705, p. 1548

- Rubin R. H., Hollenbach D. J., Erickson E. F., Modeling of G333.6-0.2 as a spherical H II region, *ApJ*, 1983, vol. 265, p. 239
- Russeil D., Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy, *A&A*, 2003, vol. 397, p. 133
- Salpeter E. E., The Luminosity Function and Stellar Evolution., *ApJ*, 1955, vol. 121, p. 161S
- Sato M., Hirota T., Honma M., Kobayashi H., Sasao T., et al. Distance to NGC 281 in a Galactic Fragmenting Superbubble: Parallax Measurements with VERA, *PASJ*, 2008, vol. 60, p. 975
- Schraml J., Mezger P. G., Galactic H II Regions.IV. 1.95-CM Observations with High Angular Resolution and High Positional Accuracy, *ApJ*, 1969, vol. 156, p. 269
- Shaver P. A., Goss W. M., Galactic Radio Sources II: High Resolution 408 MHz observations, *Austr. J. Phys., Astrophys. Suppl.*, 1970, vol. 14, p. 77
- Shu F. H., Milione V., Gebel W., Yuan C., Goldsmith D. W., Roberts W. W., Galactic Shocks in an Interstellar Medium with Two Stable Phases, *ApJ*, 1972, vol. 173, p. 557
- Smith L. F., Mezger P. G., Biermann P., Star formation rates in the Galaxy, *A&A*, 1978, vol. 66, p. 65
- Smith T. R., Kennicutt Jr R. C., The H II region luminosity function of the Milky Way, *PASP*, 1989, vol. 101, p. 649
- Stead J. J., Hoare M. G., The slope of the near-infrared extinction law, *MNRAS*, 2009, vol. 400, p. 731
- Stolte A., Brandner W., Brandl B., Zinnecker H., Grebel E., The Secrets of the Nearest Starburst Cluster. I. Very Large Telescope/ISAAC Photometry of NGC 3603, *AJ*, 2004, vol. 128, p. 765
- Straižys V., Laugalys V., 2MASS Two-Color Interstellar Reddening Lines in the Inner Galaxy, *Baltic Astronomy*, 2008, vol. 17, p. 253

- Thompson M. A., Hatchell J., Walsh A. J., Macdonald G. H., Millar T. J., A SCUBA imaging survey of ultracompact HII regions. The environments of massive star formation, *A&A*, 2006, vol. 453, p. 1003
- Vacca W. D., Garmany C. D., Shull J. M., The Lyman-Continuum Fluxes and Stellar Parameters of O and Early B-Type Stars, *ApJ*, 1996, vol. 460, p. 914
- Vacca W. D., Torres-Dogden A. V., Color excesses, intrinsic colors, and absolute magnitudes of Galactic and Large Magellanic Cloud Wolf-Rayet stars, *ApJS*, 1990, vol. 73, p. 685
- Ward-Thompson D., André P., . In *The Universe as seen by ISO* , vol. 463, 1998
- Ward-Thompson D., Scott P. F., Hills R. E., André P., A Submillimetre Continuum Survey of Pre Protostellar Cores, *MNRAS*, 1994, vol. 268, p. 276
- Wegner W., Absolute magnitudes of OB and Be stars based on Hipparcos parallaxes - III, *MNRAS*, 2007, vol. 374, p. 1549
- Wilson T. L., 4830 MILz Observations of the Formaldehyde Molecule in the Direction of Discrete Radio Sources, *A&A*, 1972, vol. 19, p. 354
- Wilson T. L., OH and H<sub>2</sub>CO Absorption Line Measurements toward Sources in W 31, *A&A*, 1974, vol. 31, p. 83
- Wilson T. L., Mezger P. G., Gardner F. F., Milne D. K., H<sub>109</sub> $\alpha$  Recombination Line Measurements of the W 51 Region, *Astrophys. Lett.*, 1970, vol. 5, p. 99
- Wood D. O. S., Churchwell E., The morphologies and physical properties of ultracompact H II regions, *ApJS*, 1989, vol. 69, p. 831
- Xu Y., Reid M., Zheng X., Menten K., The Distance to the Perseus Spiral Arm in the Milky Way, *Science*, 2006, vol. 311, p. 54
- Xu Y., Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Moscadelli L., Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions: III. G59.7+0.1 and W 51 IRS2, *ApJ*, 2009, vol. 693, p. 413

Zhang B., Zheng X. W., Reid M. J., Menten K. M., Xu Y., et al. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. IV. G35.20-0.74 and G35.20-1.74, *ApJ*, 2009, vol. 693, p. 419

# Apêndice



## Objetos Jovens e de Alta Massa

### A.1 Tabela com os Candidatos a MYSOs

Todos os candidatos a MYSOs identificados neste trabalho estão listados nas tabelas deste Apêndice (Tabelas A.1, A.2 e A.3). Foram utilizadas as imagens coloridas no infravermelho próximo ( $J$ ,  $H$  e  $K_s$ , em azul, verde e vermelho, respectivamente), as imagens coloridas no infravermelho médio (IRAC-Spitzer, canais de 4, 5, 5, 8 e 8,0  $\mu\text{m}$ , em azul, verde e vermelho respectivamente) além dos diagramas cor-cor e cor-magnitude. A metodologia está descrita no Capítulo 2 e os resultados no Capítulo 3 (Metodologia e Catálogo de Regiões H II Gigantes Galácticas, respectivamente). Como esperado, a presença destes candidatos a MYSOs é mais proeminente em regiões menos evoluídas, onde o gás e a poeira ainda estão presentes.

Tabela A.1 - Candidatos a MYSOs identificados neste trabalho. Foram utilizados diagramas cor-cor e cormagnitude, além de imagens coloridas no infravermelho próximo ( $J$ ,  $H$ , e  $K_s$ ) e imagens do Spitzer. Na coluna 1 estão os nomes das regiões HII onde houve detecção de candidatos a MYSOs. Na coluna 2 estão as identificações de cada objeto. Nas colunas 3 e 4 estão as coordenadas dos objetos. Na coluna 5 estão as magnitudes na banda  $K_s$  e na coluna 6 estão as cores  $H - K_s$ .

<i>Região</i>	<i>Obj.</i>	<i>R.A. (2000)</i>	<i>Dec. (2000)</i>	$K_s$	$H - K_s$
G5.97-1.18	#01	18 : 03 : 40,32	-24 : 22 : 42,70	6,91	0,54
G5.97-1.18	#41	18 : 03 : 40,37	-24 : 22 : 39,42	9,18	1,51
G5.97-1.18	#432	18 : 03 : 38,63	-24 : 22 : 24,20	11,52	1,04
G10.2-0.3 <sup>a</sup>	#01	18 : 09 : 27,64	-20 : 19 : 13,02	9,45	2,52
G10.2-0.3 <sup>a</sup>	#09	18 : 09 : 26,98	-20 : 19 : 08,53	10,67	2,86
G10.2-0.3 <sup>a</sup>	#15	18 : 09 : 27,28	-20 : 19 : 35,74	11,02	2,83
G10.2-0.3 <sup>a</sup>	#26	18 : 09 : 26,28	-20 : 19 : 23,40	11,49	2,82
G10.2-0.3 <sup>a</sup>	#30	18 : 09 : 25,80	-20 : 19 : 17,79	11,83	2,66
G10.3-0.1	#96	18 : 08 : 58,20	-20 : 05 : 14,00	11,49	2,64
G12.8-0.2	#01	18 : 14 : 13,46	-17 : 55 : 38,95	12,50	3,69
G12.8-0.2	#02	18 : 14 : 12,53	-17 : 55 : 43,09	12,63	3,15
G12.8-0.2	#07	18 : 14 : 13,01	-17 : 55 : 27,94	13,74	1,62
G12.8-0.2	#08	18 : 14 : 14,58	-17 : 55 : 50,79	13,95	3,55
G12.8-0.2	#10	18 : 14 : 14,32	-17 : 55 : 56,71	14,02	2,07
G15.0-0.7	#10	18 : 20 : 30,55	-16 : 11 : 04,71	10,08	2,39
G15.0-0.7	#24	18 : 20 : 30,73	-16 : 10 : 53,42	19,97	2,83
G25.4-0.2 <sup>b</sup>	#03	18 : 38 : 15,30	-06 : 47 : 51,88	10,42	2,26
G25.4-0.2 <sup>b</sup>	#57	18 : 38 : 14,57	-06 : 48 : 02,34	12,96	3,47
G30.8-0.2 <sup>c</sup>	#09	18 : 47 : 37,12	-01 : 56 : 42,54	11,63	3,88
G30.8-0.2 <sup>c</sup>	#10	18 : 47 : 38,51	-01 : 56 : 43,17	11,68	2,77
G45.5+0.1	#20	19 : 14 : 22,09	+11 : 08 : 24,35	13,28	2,58
G48.9-0.3	#203	19 : 22 : 15,26	+14 : 04 : 27,88	11,43	2,58
G48.9-0.3	#238	19 : 22 : 11,64	+14 : 02 : 16,63	11,61	3,76
G48.9-0.3	#526	19 : 22 : 07,82	+14 : 03 : 13,37	12,66	3,44
G48.9-0.3	#1063	19 : 22 : 19,02	+14 : 05 : 07,18	13,59	2,41

Tabela A.2 - Continuação da Tabela A.1.

<i>Região</i>	<i>Obj.</i>	<i>R.A. (2000)</i>	<i>Dec. (2000)</i>	$K_s$	$H - K_s$
G49.5-0.4 <sup>d</sup>	#45	19 : 23 : 42, 67	+14 : 30 : 27, 56	12, 46	2, 85
G49.5-0.4 <sup>d</sup>	#61	19 : 23 : 47, 21	+14 : 29 : 43, 69	12, 49	2, 53
G49.5-0.4 <sup>d</sup>	#62	19 : 23 : 40, 42	+14 : 29 : 32, 22	12, 26	1, 83
G49.5-0.4 <sup>d</sup>	#73	19 : 23 : 52, 05	+14 : 28 : 50, 30	11, 55	1, 68
G49.5-0.4 <sup>d</sup>	#98	19 : 23 : 42, 80	+14 : 30 : 29, 70	12, 98	3, 50
G274.0-1.1	#21	09 : 24 : 25, 76	-51 : 59 : 25, 08	11, 04	1, 25
G274.0-1.1	#31	09 : 24 : 25, 97	-51 : 59 : 23, 59	11, 62	1, 86
G274.0-1.1	#33	09 : 24 : 26, 39	-51 : 59 : 19, 96	11, 80	1, 78
G282.0-1.2	#31	10 : 06 : 38, 99	-57 : 11 : 58, 35	12, 01	2, 11
G282.0-1.2	#46	10 : 06 : 36, 89	-57 : 12 : 31, 69	12, 56	1, 54
G284.3-0.3	#54	10 : 24 : 01, 13	-57 : 45 : 35, 46	10, 25	1, 23
G284.3-0.3	#60	10 : 23 : 55, 74	-57 : 45 : 08, 48	10, 39	1, 16
G287.4-0.6	#138	10 : 43 : 35, 12	-59 : 31 : 48, 57	11, 17	2, 53
G291.6-0.5	#19	11 : 15 : 11, 38	-61 : 16 : 44, 91	8, 91	1, 77
G298.9-0.4	#21	12 : 15 : 20, 01	-63 : 01 : 10, 49	10, 70	3, 26
G305.2+0.0	#873	13 : 11 : 16, 22	-62 : 46 : 21, 57	13, 01	1, 95
G305.2+0.2	#134	13 : 11 : 31, 72	-62 : 32 : 30, 14	11, 25	1, 85
G320.1+0.8	#15	15 : 05 : 17, 21	-57 : 30 : 02, 31	8, 57	3, 69
G322.2+0.6	#07	15 : 18 : 38, 78	-56 : 38 : 49, 70	11, 17	2, 16
G327.3-0.5	#16	15 : 53 : 09, 68	-54 : 34 : 31, 13	9, 78	3, 67
G327.3-0.5	#87	15 : 53 : 03, 15	-54 : 35 : 24, 43	11, 82	3, 44
G331.5-0.1	#100	16 : 12 : 08, 98	-51 : 28 : 02, 93	10, 50	4, 28
G331.5-0.1	#2758	16 : 12 : 10, 01	-51 : 28 : 37, 84	14, 52	3, 55
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#04	16 : 21 : 04, 56	-50 : 35 : 42, 00	10, 93	1, 45
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#09	16 : 21 : 02, 47	-50 : 35 : 38, 72	12, 12	1, 80

Tabela A.3 - Continuação das Tabelas A.1 e A.2.

<i>Região</i>	<i>Obj.</i>	<i>R.A. (2000)</i>	<i>Dec. (2000)</i>	$K_s$	$H - K_s$
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#06	16 : 21 : 00,43	-50 : 35 : 08,37	11,20	3,28
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#13	16 : 20 : 59,70	-50 : 35 : 14,34	12,28	2,59
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#14	16 : 21 : 00,50	-50 : 35 : 09,37	12,19	2,52
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#18	16 : 21 : 02,62	-50 : 35 : 54,85	12,46	5,75
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#416	16 : 21 : 02,07	-50 : 35 : 16,02	15,72	1,38
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#472	16 : 21 : 04,02	-50 : 35 : 07,41	15,05	1,25
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#488	16 : 21 : 00,71	-50 : 35 : 05,39	14,86	2,20
G333.1-0.4 <sup>e</sup>	#598	16 : 21 : 06,68	-50 : 35 : 41,39	10,50	1,89
G333.6-0.2	#04	16 : 22 : 09,60	-50 : 05 : 59,13	7,92	1,84
G333.6-0.2	#10	16 : 22 : 09,37	-50 : 06 : 00,59	8,46	1,81
G336.5-1.5	#03	16 : 40 : 01,06	-48 : 51 : 51,83	8,93	1,31
G336.8-0.0	#55	16 : 34 : 51,22	-47 : 33 : 16,11	13,65	3,18
G336.8-0.0	#68	16 : 34 : 47,51	-47 : 32 : 10,16	13,82	2,65
G348.7-1.0	#05	17 : 20 : 06,65	-38 : 57 : 30,38	10,83	1,82
G351.2+0.7	#111	17 : 19 : 57,87	-35 : 57 : 50,84	10,42	1,91

Notas: (a) Blum et al. (2001); (b) Blum et al. (2000); (c) Blum et al. (1999); (d) Figuerêdo et al. (2008); (e) Figuerêdo et al. (2005).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)